



HAL
open science

Évaluation non destructive de la contamination du béton par les chlorures avec la technique radar

Wahabi Ali M'Zé

► **To cite this version:**

Wahabi Ali M'Zé. Évaluation non destructive de la contamination du béton par les chlorures avec la technique radar. Génie civil. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2018. Français. NNT : 2018TOU30278 . tel-02418666

HAL Id: tel-02418666

<https://theses.hal.science/tel-02418666>

Submitted on 19 Dec 2019

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

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

Université Fédérale



Toulouse Midi-Pyrénées

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Université Toulouse III - Paul Sabatier*

Discipline ou spécialité : *Génie civil*

Présentée et soutenue par **Wahabi ALI M'ZÉ**

Le **21 mars 2018**

Titre :

**Évaluation non destructive de la contamination du béton par
les chlorures avec la technique radar**

Jury

M. Jean-Paul BALAYSSAC	Pr. Université Paul Sabatier Toulouse III	Examinateur
Mme Ginette ARLIGUIE	Pr. émérite Université Paul Sabatier Toulouse III	Examinatrice
M. Gilles KLYSZ	MCF. Université Paul Sabatier Toulouse III	Examinateur
Mme Stéphanie BONNET	MCF. Université de Nantes	Examinatrice
Mme Fattoum KHARCHI	Pr. USTHB Alger (Algérie)	Rapporteur
M. Firas AL MAHMOUD	MCF. Université de Nancy Lorraine	Rapporteur

Ecole doctorale : Mécanique Energétique Génie Civil Procédés

Unité de recherche : Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions

Directeur de Thèse : M. Jean-Paul BALAYSSAC

Remerciements :

Ce travail de thèse doctorale effectué au sein du Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) de l'université Paul Sabatier de Toulouse, intitulé « Évaluation non destructive de la contamination du béton par les chlorures avec la technique radar », a été financé par la Direction des Politiques Scolaires et Universitaires (DPSU) de Mayotte.

Je les remercie donc en premier lieu de m'avoir octroyé cette bourse doctorale qui m'a permis de mener à bien cette thèse durant ces trois années.

Je tiens aussi à remercier l'ancien directeur du LMDC M. Gilles ESCADEILLAS et le nouveau directeur du LMDC M. Alain SELIER de m'avoir accueilli au sein du laboratoire.

Je tiens tout particulièrement à remercier M. Jean Paul BALAYSSAC d'avoir accepté de m'encadrer malgré un emploi du temps chargé. Il a su rester patient en me guidant et m'orientant tout au long de ces trois années de thèse. Je tiens également à le remercier de m'avoir conseillé durant les périodes difficiles comme la perte de mon cher père.

Je remercie les membres du jury Mme Ginette ARLIGUIE, M. Gilles KLYSZ et Mme Stéphanie BONNET, d'avoir accepté d'examiner et de juger ce travail de thèse. Je remercie également les rapporteurs, Mme Fattoum KHARCHI et M. Firas AL MAHMOUD, pour leur lecture critique et éclairante de ce manuscrit.

Je remercie l'équipe du LMDC notamment, Fabienne LACOSTE, ceux du service mécanique : Sylvain DOS SANTOS, René BOUJOU, Yann BOUASKEUR et Frédéric LECLERC, du service chimie-microstructure : Vanessa MAZARS, Maud SCHIETTEKATTE et Guillaume LAMBARÉ et du service physique : David GUILLOUSET.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement ma famille, ma chère mère, Mme Zahara MADI (ALI M'ZÉ) et mon défunt père, M. Ali A. M'ZÉ ainsi que mes frères et sœurs de m'avoir toujours soutenue, cru en moi et donné le courage d'aller jusqu'au bout de mes études et de mes rêves.

Résumé : Le géoradar, ou Ground Penetrating Radar (GPR) en anglais, est une méthode non destructive couramment utilisée pour l'auscultation des ouvrages en béton. L'intérêt de cette méthode réside sur sa capacité à ausculter rapidement des très grandes surfaces, elle est de plus en plus employée en Génie Civil. Habituellement, cette méthode est utilisée en Génie Civil pour la localisation des aciers de renforcements, ou bien pour l'estimation de l'épaisseur d'enrobage du béton. Toutefois, la méthode GPR peut aussi être utilisée pour l'auscultation du béton. En effet, le béton est un matériau diélectrique poreux qui peut modifier la propagation des ondes électromagnétiques (EM). Les résultats les plus récents présentent la capacité du GPR à évaluer la teneur en eau. Cependant, le GPR pourrait très bien aussi être utilisé pour la détection des ions chlorure présents dans la solution interstitielle du béton, car comme les chlorures modifient la conductivité du béton ils sont susceptibles d'atténuer les ondes électromagnétiques. Néanmoins, seulement quelques études ont été menées dans ce domaine.

Par conséquent, dans cette étude, nous proposons d'utiliser les ondes EM du géoradar pour estimer conjointement la teneur en eau et la teneur en chlorure du béton pour différents corps d'épreuves. Pour cela, plusieurs séries de corps d'épreuves sont utilisées avec des modes de contaminations par les chlorures différents. Une procédure de mesure de la vitesse à partir de l'analyse des signaux réfléchis est proposée. On démontre que la vitesse des ondes EM est essentiellement affectée par la teneur en eau alors que l'atténuation est sensible à la fois à la teneur en eau et à la teneur en chlorures.

Ensuite, dans un second temps, nous testons différents modèles de permittivité pour prédire les mesures de constante diélectrique et du facteur de pertes évalués à partir des mesures par GPR ou de résistivité électrique.

Mots clés : GPR, ondes électromagnétiques, vitesse de propagation, atténuation du signal, teneur en eau, teneur en chlorure, modèle de permittivité, béton.

Abstract : Ground Penetrating Radar (GPR) is an usual nondestructive testing method for the assessment of concrete structures. The benefit of this method lies within its ability to assess quickly a large scale of concrete surface. Generally, GPR is used for the localization of reinforcements or for the thickness measurements. However, GPR can be also used for the diagnosis of concrete because concrete is a porous dielectric material which can modify the propagation of the electromagnetic (EM) waves. Most common results present the ability of GPR to assess moisture. But, GPR could be also used to detect the presence of chlorides into the interstitial concrete solution as chlorides can modify the concrete conductivity and altered the electromagnetic signal waves. However, only few studies have been carry-out on that field.

Therefore, in this study, we propose to use GPR electromagnetic waves to evaluate both the water content and the chloride content inside the interstitial concrete solution of several tests concrete samples. So, several groups of concrete samples with the same formulation will be conditioned for different chloride contamination modes. Thereafter, a velocity measurement process will be proposed from the reflected signal wave analysis. In that process, we will show that the velocity is only affected by the water content while the attenuation strongly affected by both the water content and the chloride content.

Furthermore, we will test several permittivity models to predict the dielectric permittivity and the loss factor estimated from the concrete samples measurements with the GPR device and the electrical resistivity device.

Keywords : GPR, electromagnetic waves, velocities, attenuation, water content, chloride content, dielectric permittivity model, concrete.

Unité de recherche :

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Construction (LMDC) de Toulouse
135, Avenue de Rangueil – 31077 Toulouse Cedex 4 – France

Communication :

W. ALI-M'ZE, J.-P. BALAYSSAC. (2016). "Nondestructive evaluation of chlorides contamination in concrete with ground penetrating radar". XII International Conference on Structural Repair and Rehabilitation, 26-29 Octobre, 2016, Porto, Portugal.

Table des matières

Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	XI
Principales notations	XIII
Chapitre I	1
Introduction	1
I. Introduction	3
I.1 Préambule	3
I.2 Objectifs et plan de thèse	4
I.3 Références	6
Chapitre II	7
Bibliographie	7
II. Pathologies des ouvrages en béton et méthodes d'auscultation.	9
II.1 Les différents types de dégradations observées sur les ouvrages en béton de Génie Civil.	9
II.1.1 Les phénomènes responsables de la corrosion des armatures	9
II.1.2 Les conséquences des cycles de gel-dégel	10
II.1.3 L'action des eaux agressives sur les structures en béton.....	10
II.2 Les conséquences de la présence d'eau et des ions chlorures dans les milieux poreux	12
II.2.1 Processus de corrosion des aciers dans ouvrages en béton	12
II.2.2 Généralité sur les méthodes d'évaluation de la teneur en chlorure	13
II.3 Les méthodes de contrôle non destructif (CND) des structures en béton.....	17
II.4 Notions théoriques sur la propagation des ondes électromagnétisme (EM).....	20
II.4.1 Définition d'une onde électromagnétique (EM)	20
II.4.2 Propagation des ondes électromagnétiques dans le vide.....	21
II.4.3 Propagation des ondes électromagnétique dans un milieu matériel.....	24
II.4.4 Réflexion et transmission des ondes électromagnétiques à l'interface de deux milieux.	28
II.5 Phénomènes d'atténuation dans les milieux matériels.....	31
II.5.1 Atténuation par diffusion	31
II.5.2 Atténuation géométrique	32
II.6 Propriétés électromagnétiques des bétons	34
II.6.1 Conductivité électrique.....	34
II.6.2 Permittivité diélectrique, phénomène de polarisation électrique	36
II.6.3 Permittivité diélectrique et conductivité électrique effectives	39
II.6.4 Perméabilité magnétique	40
II.7 Le Radar GPR et ses applications usuelles en génie civil	41
II.7.1 Le radar GPR.....	41
II.7.2 Calibration du radar GPR	42
II.7.3 Les dispositifs de rayonnement d'une onde électromagnétique.....	45
II.7.4 Les applications usuelles en Génie Civil.....	50
II.8 Utilisation des ondes EM pour la caractérisation d'un béton contaminé ou sain	53
II.8.1 Sensibilité des ondes EM en présence d'eau et des ions chlorures	53
II.8.2 Propagation des ondes EM dans le béton	56
II.9 Conclusion	58
II.10 Références	60
Chapitre III	63
Procédures expérimentales	63
III Etudes expérimentales : Procédures techniques.....	65

III.1 Matériaux et préparations	65
III.2 Les méthodes de conditionnements et de contaminations.....	66
III.2.1 Répartition homogène de la solution saline : Séries d'échantillons S1, S1.2 et S066	
III.2.2 Gradient de teneur en chlorure : Série d'échantillons S2.....	67
III.2.3 Introduction des chlorures dans l'eau de gâchage : Série d'échantillons S3	68
III.2.4 Exposition à des embruns salins intermittents : Série d'échantillons S4.....	68
III.3 Les différents modes de conditionnement	69
III.4 Moyens de mesure	71
III.4.1 Méthode de mesure de vitesse en transmission	71
III.4.2 Méthode de mesure de vitesse en « fixed-offset »	73
III.4.3 Vitesses des ondes réfléchies sur le fond des échantillons	79
III.5 Calcul de l'atténuation du signal EM : amplitudes normalisées	80
III.6 Méthode de dosage en chlorure	82
III.6.1 Mode d'échantillonnage.....	82
III.6.2 Préparation des solutions pour les dosages en chlorure.....	83
III.6.3 Résultats du dosage en chlorure.....	83
III.7 Porosité et masse volumique apparente.....	85
III.8 Méthode de mesure de la permittivité diélectrique	86
III.8.1 Présentation de la sonde coaxiale.....	86
III.8.2 Exemple de résultats de la sonde coaxiale	88
III.9 Conclusion	92
III.10 Références	93
Chapitre IV	95
Résultats et analyses	95
IV. Résultats et analyses.....	97
IV.1 Séries d'échantillons S0, S1 et S1.2	97
IV.1.1 Les signaux radar	97
IV.1.2 Vitesses de propagation : Séries S0, S1 et S1.2.....	99
IV.1.3 Amplitudes radar : Séries S0, S1 et S1.2	101
IV.2 Séries d'échantillons S2 (S0 et S1)	107
IV.2.1 Vitesses de propagation : Série S2 (S0 et S1).....	107
IV.2.2 Amplitudes radar : Série S2 (S0 et S1).....	110
IV.3 Séries d'échantillons S3 (S0, S1 et S2)	115
IV.3.1 Vitesses de propagation : Série S3.....	116
IV.3.2 Amplitudes radar : Série S3 (S0, S1 et S2).....	118
IV.4 Comparaison des résultats pour toutes les séries d'échantillons.....	123
IV.4.1 Comparaison des vitesses de propagations de toutes les séries d'échantillons ...	123
IV.4.2 Comparaison des amplitudes normalisées de toutes les séries d'échantillons ...	125
IV.5 Proposition d'un modèle à deux variables	129
IV.5.1 Vitesse de propagation : Séries S1, S2 et S1.2	130
IV.5.2 Amplitude normalisée d'onde directe : Séries S1, S2 et S1.2	131
IV.6 Analyses fréquentielles des signaux radar.....	133
IV.6.1 Analyse fréquentielle des séries d'échantillons S0, S1 et S1.2	133
IV.7 Conclusion.....	134
IV.8 Références	136
Chapitre V	137
Modèles de permittivité	137
V. Modèles de permittivité diélectrique	139
V.1 Introduction.....	139
V.2 Les modèles	139

V.2.1 Modèles volumiques	139
V.2.2 Modèle géométrique.....	140
V.2.3 Modèle d'homogénéisation.....	141
V.3 Données d'entrée des modèles.....	141
V.4 Valeurs mesurées	144
V.5 Résultats.....	146
V.5.1 Simulation d'un béton sain	146
V.5.2 Simulation pour un béton contaminé à 30 g/L de NaCl.....	154
V.5.3 Simulation pour un béton contaminé à 120 g/L de NaCl.....	163
V.6 Conclusion	171
V.7 Références.....	173
Chapitre VI	175
Conclusion générale	175
VI.1 Conclusion générale	177
VI.2 Perspectives	179
Annexes	181

Liste des figures

Chapitre II

FIGURE II. 1 : DELAMINATION ET ECLATEMENT DU BETON [5].....	10
FIGURE II. 2 : PRINCIPE DES ESSAIS DE DIFFUSION DES IONS CHLORURES [22].....	16
FIGURE II. 3 : PRINCIPE DE LA CELLULE D'ESSAI DE MIGRATION DES IONS CHLORURE SOUS UN CHAMP ELECTRIQUE [GRANDUBE, 2007]	16
FIGURE II. 4 : LES DIFFERENTES METHODES BASEES SUR LA RESISTIVITE ELECTRIQUE. (A) METHODE DE RESISTIVIMETRE ET (B) METHODE A DISQUE [14]	19
FIGURE II. 5 : EXEMPLE DE PROPAGATION D'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE (EM)	21
FIGURE II. 6 : SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE (EM) [5].....	22
FIGURE II. 7 : PROPAGATION D'UNE ONDE EM ENTRE DEUX MILIEUX POSSEDANT DES PROPRIETES EM DIFFERENTES	29
FIGURE II. 8 : PHENOMENE DE DIFFRACTION DE L'ONDE EM [10]	32
FIGURE II. 9 : PROPAGATION DE L'ONDE EM DANS LE BETON SELON WIELEN [9].....	33
FIGURE II. 10 : VARIATIONS DE LA CONDUCTIVITE EN FONCTION DE LA FREQUENCE ET DE LA TENEUR EAU [12].....	35
FIGURE II. 11 : CARACTERISTIQUES DES ONDES EM INCIDENTES ET REFLECHIES [13]	36
FIGURE II. 12 : VARIATION DE LA PERMITTIVITE RELATIVE EN FONCTION DE LA FREQUENCE ET DE LA TENEUR EN EAU [12].....	37
FIGURE II. 13 : REPRESENTATION DES DIFFERENTS TYPES DE POLARISATIONS EN FONCTION DE LA FREQUENCE [10]	38
FIGURE II. 14 : VARIATIONS DE LA PERMITTIVITE ET DE LA CONDUCTIVITE EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU A UNE FREQUENCE DE 500MHZ [12]	40
FIGURE II. 15 : ILLUSTRATION DES COMPOSANTS PRINCIPAUX D'UN GPR [10]	42
FIGURE II. 16 : RESOLUTION LONGITUDINALE ET LATERALE D'UN GPR [10].....	44
FIGURE II. 17 : DEMI-LARGEUR, W, POUR DIFFERENTS TYPES DE PULSIONS TEMPORELLES [10]	45
FIGURE II. 18 : PRINCIPE DE RAYONNEMENT D'UNE ONDE EM	46
FIGURE II. 19 : SCHEMATISATION DE LA PROPAGATION D'UNE ONDE EM RAYONNEE A PARTIR D'UN DIPOLE [10].....	47
FIGURE II. 20 : RAYONNEMENT D'UNE ANTENNE ADAPTEE A L'AIR (A) ET D'UNE ANTENNE COUPLEE AU MATERIAU (B)	47
FIGURE II. 21 : REPRESENTATION DES TROIS ZONES DE RAYONNEMENTS D'UNE ONDE EM [5].....	49
FIGURE II. 22 : DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT : BETON SATURE ($\epsilon r' = 12$) OU BETON SEC ($\epsilon r' = 4$) [10]	49
FIGURE II. 23 : EXEMPLE DE FRONT D'ONDE POUR DEUX MILIEUX DE CONSTANTE DIELECTRIQUE DE 9 EN (A) ET DE 80 EN (B) [11] ...	50
FIGURE II. 24 : ILLUSTRATION DU PRINCIPE D'ACQUISITION D'UN GPR EN GENIE CIVIL [14]	51
FIGURE II. 25 : LES DIFFERENTS TYPES D'AFFICHAGES, A-SCAN, B-SCAN ET C-SCAN [15]	51
FIGURE II. 26 : B-SCAN (GAUCHE) ET A-SCAN (DROITE) ENREGISTRES SUR UN ELEMENT EN BETON [16]	52
FIGURE II. 27 : DETECTIONS DES INTERFACES BETON-AIR ET BETON-PLAQUE D'ACIER EN A-SCAN [17]	52
FIGURE II. 28 : VARIATION DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE DE L'EAU EN FONCTION DE LA FREQUENCE ET DE LA SALINITE A 20°C [20]	54
FIGURE II. 29 : VARIATION DU FACTEUR DE PERTES DE L'EAU EN FONCTION DE LA FREQUENCE ET DE LA SALINITE POUR 20°C [20] ...	54
FIGURE II. 30 : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LA CONSTANTE DIELECTRIQUE DE L'EAU [20]	55
FIGURE II. 31 : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LE FACTEUR DE PERTES DE L'EAU [20]	56
FIGURE II. 32 : VARIATION DE L'ATTENUATION DU SIGNAL DIRECT (SD) EN FONCTION DE LA TENEUR EN CHLORURE [18]	57
FIGURE II. 33 : VARIATION DE L'ATTENUATION DU SIGNAL REFLECHI (SR) EN FONCTION DE LA TENEUR EN CHLORURE [18].....	57

Chapitre III

FIGURE III. 1 : ÉCHANTILLONS EN PHASE DE CONDITIONNEMENT	67
--	----

FIGURE III. 2 : COFFRAGE EN PVC POSE SUR LE HAUT DES ECHANTILLONS.....	67
FIGURE III. 3 : HYPOTHESE DE PENETRATION DE LA SOLUTION SALINE DANS LE CORPS D'EPREUVE.....	68
FIGURE III. 4 : ILLUSTRATION DES DIFFERENTS MODES DE CONDITIONNEMENTS ET DE CONTAMINATIONS POUR CHAQUE SERIE D'ECHANTILLON.....	70
FIGURE III. 5 : METHODE D'ENREGISTREMENT EN TRANSMISSION.....	72
FIGURE III. 6 : TYPES DE SIGNAUX EM OBTENUS AVEC LA METHODE EN TRANSMISSION.....	72
FIGURE III. 7 : PRISE DE MESURE EN FIXED-OFFSET.....	74
FIGURE III. 8 : LES DIFFERENTS POINTS DE MESURES AU-DESSUS DE L'ECHANTILLON DE BETON.....	74
FIGURE III. 9 : PARCOURS DE L'ONDE EM DANS L'ECHANTILLON.....	75
FIGURE III. 10 : SIGNAL "A-SCAN" OBTENU PAR LA METHODE FIXED-OFFSET.....	77
FIGURE III. 11 : POSITIONS DE DELTA T1 ET DELTA T2.....	77
FIGURE III. 12 : MISE EN EVIDENCE DE DEUX ONDES DIRECTES PAR LA METHODE D'OUVERTURE D'ANGLE (WARR).....	79
FIGURE III. 13 : VARIATION DES VITESSES EN FIXED-OFFSET EN FONCTION DES VITESSES EN TRANSMISSION.....	80
FIGURE III. 14 : SIGNAL EM SE PROPAGEANT DANS L'AIR.....	81
FIGURE III. 15 : SIGNAL EM PARCOURANT UN ECHANTILLON DE BETON.....	81
FIGURE III. 16 : LES DIFFERENTES ETAPES DE BROUAGE.....	83
FIGURE III. 17 : TENEUR EN CHLORURE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION CHLORURE ET DU DEGRE DE SATURATION POUR LES SERIES S1 ET S1.2.....	84
FIGURE III. 18 : VARIATION DE LA TENEUR EN CHLORURES LIBRES EN FONCTION DE LA TENEUR EN CHLORURES TOTAUX POUR LES SERIES S1, S2 ET S1.2.....	85
FIGURE III. 19 : SYSTEME DE MESURE DE LA SONDE COAXIALE.....	87
FIGURE III. 20 : ILLUSTRATION DU SYSTEME DE MESURE DE LA SONDE COAXIALE.....	87
FIGURE III. 21 : CONSTANTE DIELECTRIQUE (PARTIE REELLE) D'UN BETON SEC (SR=0%).....	88
FIGURE III. 22 : FACTEUR DE PERTES (PARTIE IMAGINAIRE) D'UN BETON SEC (SR=0%).....	89
FIGURE III. 23 : CONSTANTE DIELECTRIQUE D'UN BETON CONTAMINE AVEC 30G/L DE NaCl (SR=100%).....	90
FIGURE III. 24 : FACTEUR DE PERTES D'UN BETON CONTAMINE AVEC 30G/L DE NaCl (SR=100%).....	90
FIGURE III. 25 : CONSTANTE DIELECTRIQUE D'UN BETON CONTAMINE AVEC 120G/L DE NaCl (SR=100%).....	91
FIGURE III. 26 : FACTEUR DE PERTES D'UN BETON CONTAMINE AVEC 120G/L DE NaCl (SR=100%).....	91

Chapitre IV

FIGURE IV. 1-A : SIGNAUX RADAR POUR DES CORPS D'EPREUVE SATURES ET CONTAMINES OU NON PAR DES CHLORURES.....	97
FIGURE IV. 2-A : VARIATION DE LA VITESSE DE PROPAGATION EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU POUR LES SERIES S0, S1 ET S1.2.....	99
FIGURE IV. 3-A : VARIATION DE L'AMPLITUDE NORMALISEE DE L'O.D. EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU POUR LES SERIES S0, S1 ET S1.2.....	102
FIGURE IV. 4-A : VARIATION DE L'AMPLITUDE NORMALISEE DE L'O.R. EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU LES SERIES S0, S1 ET S1.2.	105
FIGURE IV. 5-A : VARIATION DE LA VITESSE DE PROPAGATION EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU POUR LES SERIES S0, S1 ET S2.....	108
FIGURE IV. 6-A : VARIATION DE L'AMPLITUDE NORMALISEE DE L'O.D. DE LA SERIE S2 EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU VOLUMIQUE.....	110
FIGURE IV. 7-A : VARIATION DE L'AMPLITUDE NORMALISEE DE L'O.R. DES SERIES S0, S1 ET S2 EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU.	113
FIGURE IV. 8-A : VARIATION DE LA VITESSE DE PROPAGATION DES SERIES S0, S1, S2 ET S3 EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU....	116
FIGURE IV. 9-A : VARIATION DE L'AMPLITUDE NORMALISEE DE L'O. D. EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU POUR LES SERIES S0, S1, S2 ET S3.....	119

FIGURE IV. 10-A : VARIATION DES AMPLITUDES NORMALISEES DES OR EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU POUR LES SERIES S0, S1, S2 ET S3.....	121
FIGURE IV. 11-A : VARIATION DE LA VITESSE DE PROPAGATION EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU POUR TOUTES LES SERIES D'ECHANTILLONS DE BETON.	124
FIGURE IV. 12-A : VARIATION DE L'AMPLITUDE NORMALISEE DE L'O.D. EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU POUR TOUTES LES SERIES D'ECHANTILLONS DE BETON.	125
FIGURE IV. 13-A : VARIATION D'AMPLITUDE NORMALISEE DE L'O.R. EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU POUR TOUTES LES SERIES D'ECHANTILLONS DE BETON.	127
FIGURE IV. 14 : VARIATION DE LA VITESSE EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU ET DE LA TENEUR EN CHLORURE LIBRES POUR LES SERIES S1, S2 ET S1.2.	130
FIGURE IV. 15 : VARIATION DE L'AMPLITUDE NORMALISEE DE L'O.D. EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU ET DE LA TENEUR EN CHLORURE LIBRES POUR LES SERIES S1, S2 ET S1.2.	132
FIGURE IV. 16 : TRANSFORMEE DE FOURIER RAPIDE SUR LES SIGNAUX EM DES SERIES S0, S1 ET S1.2.	133

Chapitre V

FIGURE V. 1 : RESISTIVITE EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU (MESURES PROJET SENSO).	145
FIGURE V. 2-A : VARIATION DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE EN FONCTION DE LA TENEUR EN SOLUTION INTERSTITIELLE – MODELE VOLUMIQUE AVEC $A=1/3$	147
FIGURE V. 3-A : VARIATION DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE EN FONCTION DE LA TENEUR EN SOLUTION INTERSTITIELLE – MODELE DE DE LOOR.....	151
FIGURE V. 4-A : VARIATION DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE EN FONCTION DE LA TENEUR EN INTERSTITIELLE – MODELE DE MAXWELL-GARNETT.	153
FIGURE V. 5-A : VARIATION DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU – MODELE VOLUMIQUE AVEC $A=1/3$	155
FIGURE V. 6-A : VARIATION DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU – MODELE DE DE LOOR.	159
FIGURE V. 7-A : VARIATION DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU – MODELE DE MAXWELL-GARNETT	161
FIGURE V. 8-A : VARIATION DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU – MODELE VOLUMIQUE AVEC $A=1/3$	163
FIGURE V. 9-A : VARIATION DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU – MODELE DE DE LOOR.	167
FIGURE V. 10-A : VARIATION DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU – MODELE DE MAXWELL-GARNETT.	169

Liste des tableaux

Chapitre II

TABEAU II. 1 : QUELQUES METHODES DESTRUCTIVES UTILISEES EN GENIE CIVIL POUR LA CARACTERISATION DES CHLORURES.....	14
TABEAU II. 2 : AVANTAGES ET LIMITES DE QUELQUES METHODES NON DESTRUCTIVES [5], (COMPLETE PAR Z.M. SBARTAÏ, J-P. BALAYSSAC ET S. LAURENS, 2005).	17
TABEAU II. 3 : CONSTANTE DIELECTRIQUE RELATIVE, CONDUCTIVITE ET VITESSE DE PROPAGATION DE QUELQUES MATERIAUX [9]....	28

Chapitre III

TABEAU III. 1 : FORMULATION DU BETON POUR $1M^3$	65
TABEAU III. 2 : CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES SERIES D'ECHANTILLONS DE BETON.	65
TABEAU III. 3 : COMPARAISON DES VITESSES EN TRANSMISSION ET EN FIXED-OFFSET POUR DIFFERENTS ETATS DE CONDITIONNEMENTS DE LA SERIE S0. (TR. ET F.O. POUR DE TRANSMISSION ET DE FIXED-OFFSET).	78
TABEAU III. 4 : ECARTS RELATIFS ENTRE LES VITESSES EN FIXED-OFFSET ET EN TRANSMISSION SUIVANT LES POSITIONS DES PICS CHOISIS.	78
TABEAU III. 5 : POROSITE ACCESSIBLE A L'EAU ET MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DES DIFFERENTES SERIES.	86
TABEAU III. 6 : COMPARAISON DES CONSTANTES DIELECTRIQUES DES DEUX METHODES POUR $Sr=0\%$. (C.D. POUR CONSTANTE DIELECTRIQUE).....	89
TABEAU III. 7 : COMPARAISON DES CONSTANTES DIELECTRIQUES (C.D.) MOYENNES DE LA METHODE RADAR ET DE LA SONDE COAXIALE POUR UNE FREQUENCE DE 1GHZ.	92

Chapitre IV

TABEAU IV. 1 : TESTS DE VALIDATIONS DES COEFFICIENTS DE L'EQUATION DE PLAN DE VITESSE.....	131
TABEAU IV. 2 : TESTS DE VALIDATION DES COEFFICIENTS DE L'EQUATION DE PLAN DE L'AMPLITUDE NORMALISEE DE L'O.D.	132
TABEAU IV. 3 : FREQUENCES CENTRALES EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN CHLORURE ET DU DEGRE DE SATURATION.	134

Chapitre V

TABEAU V. 1 : CARACTERISTIQUES DES SOLUTIONS INTERSTITIELLES SYNTHETIQUES.....	143
TABEAU V. 2 : SYNTHESE DES VALEURS UTILISEES DANS LES MODELES.	143
TABEAU V. 3 : CONSTANTES DIELECTRIQUES OBTENUES A PARTIR DE LA MESURE DE VITESSE QUI SERONT UTILISEES DANS LES MODELES.	144
TABEAU V. 4 : RESISTIVITES DE LA SERIE S0 ESTIMEES A PARTIR DES RESULTATS DU PROJET SENSO.	145
TABEAU V. 5 : VALEURS DES FACTEURS DE PERTES UTILISES DANS LES MODELES EM.	146
TABEAU V. 6 : EQM POUR LA CONSTANTE DIELECTRIQUE – MODELE VOLUMIQUE AVEC $A=1/3$	147
TABEAU V. 7 : EQM DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE – MODELE DE CRIM.	148
TABEAU V. 8 : EQM POUR LE FACTEUR DE PERTES – MODELE VOLUMIQUE AVEC $A=1/3$	149
TABEAU V. 9 : EQM POUR LE FACTEUR DE PERTES – MODELE DE CRIM.	150
TABEAU V. 10 : EQM DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE – MODELE DE DE LOOR.	151
TABEAU V. 11 : EQM POUR LE FACTEUR DE PERTES – MODELE DE DE LOOR.....	152
TABEAU V. 12 : EQM DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE – MODELE DE MAXWELL-GARNETT.....	153
TABEAU V. 13 : EQM POUR LE FACTEUR DE PERTES – MODELE DE MAXWELL-GARNETT.	154
TABEAU V. 14 : EQM DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE POUR 30G/L DE NaCl – MODELE VOLUMIQUE $A=1/3$	155
TABEAU V. 15 : EQM DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE POUR 30G/L DE NaCl – MODELE DE CRIM.	156

TABLEAU V. 16 : EQM DU FACTEUR DE PERTES POUR 30G/L DE NaCl - MODELE VOLUMIQUE AVEC $\alpha = 1/3$.	157
TABLEAU V. 17 : EQM DU FACTEUR DE PERTES POUR 30G/L DE NaCl – MODELE DE CRIM.	158
TABLEAU V. 18 : EQM DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE POUR 30G/L DE NaCl – MODELE DE DE LOOR.	159
TABLEAU V. 19 : EQM DU FACTEUR DE PERTES POUR 30G/L DE NaCl – MODELE DE DE LOOR.	160
TABLEAU V. 20 : EQM DU FACTEUR DE PERTES POUR 30G/L DE NaCl – MODELE DE DE LOOR.	161
TABLEAU V. 21 : EQM DU FACTEUR DE PERTES POUR 30G/L DE NaCl – MODELE DE DE LOOR.	162
TABLEAU V. 22 : EQM DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE POUR 120G/L DE NaCl – MODELE VOLUMIQUE A $\alpha = 1/3$.	163
TABLEAU V. 23 : EQM DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE POUR 120G/L DE NaCl – MODELE DE CRIM.	164
TABLEAU V. 24 : EQM DU FACTEUR DE PERTES POUR 120G/L DE NaCl – MODELE VOLUMIQUE AVEC $\alpha = 1/3$.	165
TABLEAU V. 25 : EQM DU FACTEUR DE PERTES POUR 120G/L DE NaCl – MODELE DE CRIM.	166
TABLEAU V. 26 : EQM POUR LA CONSTANTE DIELECTRIQUE A 120G/L DE NaCl – MODELE DE DE LOOR.	167
TABLEAU V. 27 : EQM DU FACTEUR DE PERTES POUR 120G/L DE NaCl – MODELE DE DE LOOR.	168
TABLEAU V. 28 : EQM POUR LA CONSTANTE DIELECTRIQUE A 120G/L DE NaCl – MODELE DE MAXWELL-GARNETT.	169
TABLEAU V. 29 : EQM DU FACTEUR DE PERTES POUR 120G/L DE NaCl – MODELE DE MAXWELL-GARNETT.	170

Principales notations

Unités

A	Ampère
C	Coulomb
F	Farad
H	Henry
m	mètre
S	Siemens
s	seconde
T	Tesla
V	Volt
W	Watt
Ω	Ohm

Constantes

c	Vitesse de la lumière dans le vide ou dans l'air ($c = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 3 \cdot 10^8$ [m/s])
ϵ_0	Permittivité diélectrique du vide ou de l'air ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ [F/m])
μ_0	Perméabilité magnétique du vide ou de l'air ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m])
$i^2 = -1$	
$e = 2,718$	

Grandeurs vectorielles

\vec{B}	Champ magnétique [Tesla]
\vec{D}	Déplacement électrique [As/m ²]
\vec{E}	Champ électrique [V/m]
\vec{H}	Excitation magnétique [A/m]
\vec{M}	Aimantation ou moment magnétique par unité de volume [A/m]
\vec{P}	Polarisation électrique [C/m ²].
\vec{j}	Densité de courant [A/m ²]

\vec{k} Vecteur d'ondes

Grandeurs scalaires

α	Coefficient d'atténuation
β	Constante de propagation
γ	Constante de propagation complexe ($\gamma = \alpha + i\beta$)
ε	Permittivité diélectrique absolue [F/m]
ε_r	Permittivité diélectrique relative [sans dimension]
ε_e^*	Permittivité diélectrique effective complexe
ε_r^*	Permittivité diélectrique relative complexe ($\varepsilon_r^* = \frac{\varepsilon_e^*}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r' - i\varepsilon_r''$)
ε_r'	Constante diélectrique
ε_r''	Facteur de perte
θ_i	Angle d'incidence
θ_r	Angle de réflexion
λ	Longueur d'onde
μ	Perméabilité magnétique [H/m]
μ_r	Perméabilité magnétique relative [sans dimension]
ν	Mobilité du porteur de charge
ρ	Densité de charges [C/m ³]
ρ_p	Densité de charge de polarisation [C/m ³]
σ	Conductivité électrique
σ_e^*	Conductivité effective complexe ($\sigma_e^* = \frac{\sigma_e^*}{i\omega}$)
φ	Phase
χ	Susceptibilité diélectrique du milieu considéré
χ_m	Susceptibilité magnétique [sans dimension]
ω	Pulsation $\omega = 2\pi f$
f	Fréquence
f_c	Fréquence centrale d'une antenne
$I = \frac{dq}{dt}$	Courant électrique
n	Nombre d'ions par unité de volume

P_p	La profondeur de pénétration d'une onde électromagnétique
q	La charge
$r = \frac{E_{0r}}{E_{0i}}$	Coefficient de réflexion
$t = \frac{E_{0t}}{E_{0i}}$	Coefficient de transmission
t	Temps
T	Période temporelle
v	Vitesse de propagation
v_g	Vitesse de groupe
v_φ	Vitesse de phase
Z_i	Impédance électromagnétique du milieu i ($Z_i = \sqrt{\frac{\mu_i}{\varepsilon_i}}$)

Opérateurs

div	Divergence [m^{-1}]
\vec{rot}	Rotationnel [m^{-1}]
$grad$	Gradient [m^{-1}]
Δ	Laplacien [m^{-2}]
$\frac{\partial}{\partial t}$	Dérivé par rapport au temps [s^{-1}]

Cigles et abréviations

EM	ÉlectroMagnétique
CND	Contrôle Non Destructif
CRIM	Complex Refractive Index Model
FDTD	Finite Difference Time Domain
GPR	Ground Penetrating Radar
OPPM	Onde Plane Progressive Monochromatique
RADAR	RAdio Detection And Ranging
WARR	Wide Angle Reflexion Refraction

Chapitre I

Introduction

I. Introduction

I.1 Préambule

L'évaluation non destructive des ouvrages en béton est de plus en plus utilisée en Génie Civil. En effet, le patrimoine bâti en béton est très important en nombre et en diversité et, dans la plupart des pays occidentaux, il atteint un âge critique auquel les dégradations peuvent rapidement devenir irréversibles. L'une des dégradations les plus importantes est la corrosion des armatures et en particulier lorsque les ouvrages en béton sont exposés à un environnement contenant des chlorures (bord de mer ou dans le cas d'utilisation de sels de déverglaçage pour les ouvrages routiers). De plus, ces phénomènes de corrosion sont difficilement prévisibles tant que l'acier n'est pas sévèrement attaqué au point que les produits de corrosion n'apparaissent en surface ou bien que, sous l'effet de l'expansion de la rouille, le béton n'éclate. De ce fait, les gestionnaires d'ouvrages cherchent à éviter l'apparition de ces phénomènes graves et irréversibles par une démarche préventive qui consiste à mesurer le degré de contamination par les chlorures, afin de vérifier si le seuil critique, au-delà duquel la corrosion peut démarrer, est atteint.

Les méthodes actuelles de quantification du taux de chlorures dans le béton nécessitent de réaliser un prélèvement destructif de béton et à en extraire les chlorures afin d'en déterminer la concentration. Cette opération, longue, est le plus souvent limitée à quelques points de l'ouvrage. Par conséquent, si une méthode non destructive existait, elle permettrait de limiter le nombre de prélèvements et de caractériser un plus grand nombre de points. Parmi les méthodes non destructives envisageables pour cet objectif, il est désormais démontré que les ondes électromagnétiques dans la fréquence des radars GPR usuels sont sensibles à la présence de chlorures dans le béton [1, 2]. L'avantage essentiel de la technique GPR vient de son caractère de technique à grand rendement permettant d'investiguer rapidement de grandes surfaces. Mais le verrou scientifique réside dans la difficulté à dissocier les effets des chlorures de ceux de la teneur en eau présente dans la porosité du béton et qui modifie également les paramètres de propagation des ondes radar.

Les résultats les plus récents ont néanmoins mis en évidence que la présence des chlorures affecte de façon significative l'atténuation des signaux mais est quasiment sans effet sur leur vitesse de propagation [2]. Ce travail va permettre de vérifier cette assertion en utilisant différents modes de contamination par les chlorures. Un autre volet va consister à quantifier l'atténuation de l'onde directe et de l'onde réfléchie pour ces différents modes de contamination. La vitesse de propagation de l'onde réfléchie, l'atténuation des ondes directe et réfléchie seront extraites des signaux EM. Les contenus fréquentiels des signaux seront

également analysés. Les chlorures libres et liés seront dosés et les volumes de la solution interstitielle seront quantifiés afin d'établir des corrélations. En parallèle, des mesures radar et des mesures de résistivité seront également réalisées.

I.2 Objectifs et plan de thèse

L'objectif principal de la thèse est de contribuer à évaluer la contamination du béton par les chlorures avec la technique GPR. Le travail proposé ici se déroulera en deux temps. Dans un premier temps, plusieurs séries d'échantillons seront réalisées avec la même formulation et seront étudiées, à l'aide de l'appareil GPR, pour différents modes de conditionnements et de contaminations. Une répartition homogène de la solution interstitielle contaminée avec des niveaux de salinité sera tout d'abord mise en œuvre. L'effet d'un gradient de répartition de la solution sera également analysé. Enfin, l'introduction des chlorures au moment du gâchage sera le dernier mode de contamination traité.

Ensuite, dans un deuxième temps, nous proposerons d'utiliser des modèles de permittivité pour reproduire le comportement diélectrique des différents corps d'épreuves. On utilisera le modèle de CRIM (Complex Refractive Index Model, ou bien Modèle d'Indice de Réfraction Complexe), le modèle de De Looer et le modèle de Maxwell-Garnett. Les paramètres d'entrée de ces modèles seront choisis après avoir analysé les résultats issus des différentes séries d'échantillons de béton. L'efficacité de ces modèles sera alors validée en comparant les résultats des modèles avec les valeurs des constantes diélectriques des différents échantillons de béton.

Ce manuscrit se composera donc de quatre grands chapitres. Le chapitre II sera consacré à un état de l'art. Au cours de ce chapitre, nous verrons les différentes pathologies qui conduisent aux dégradations observées sur la plupart des ouvrages en béton et ainsi que leur origine, un état de l'art des méthodes actuelles pour la caractérisation de la teneur en chlorure dans le béton, les méthodes non destructives utilisées en Génie Civil, les lois et les principes physiques liés à la technologie GPR, et enfin l'intérêt de l'utilisation de la technique GPR pour la détection de la teneur en eau et de la teneur en chlorure dans le béton.

Dans le chapitre III, les procédures techniques qui ont servi à la préparation des différentes séries d'échantillons de béton seront présentés. Ce chapitre va décrire, entre autres, les différentes étapes de fabrication, de conditionnement et de contamination des différentes séries d'échantillons de béton.

Ensuite dans le chapitre IV, les résultats obtenus pour chaque série d'échantillons de béton seront présentés. Il présentera, entre autres, les effets des différents modes de conditionnements et de contaminations des échantillons de béton sur la sensibilité des ondes EM (vitesse, atténuation et contenu fréquentiel).

Enfin, le chapitre V sera dédié à la modélisation de la permittivité diélectrique complexe du béton. Dans ce chapitre, les différents modèles de permittivités seront présentés et comparés entre eux. Ces modèles seront confrontés aux paramètres électromagnétiques extraits des mesures radar présentées au chapitre IV et de résistivité.

I.3 Références

- [1] G. Villain, Z-M. Sbartai, X. Dérobert, V. Garnier and J.-P. Balayssac (2012). “Durability diagnosis of a concrete structure in a tidal zone by combining NDT methods: Laboratory tests and case study”, *Construction and Building Materials*, Volume 37, p. 893–903 ;
- [2] J.-P. Balayssac, S. Laurens, G. Klysz, J.F. Lataste, X. Dérobert (2011). “Non-destructive evaluation of concrete contamination by chloride: comparison of methods”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Volume 15, p. 1073-1084.

Chapitre II

Bibliographie

II. Pathologies des ouvrages en béton et méthodes d'auscultation.

II.1 Les différents types de dégradations observées sur les ouvrages en béton de Génie Civil.

II.1.1 Les phénomènes responsables de la corrosion des armatures

Le phénomène de la corrosion des aciers de renforcement est reconnu comme étant la dégradation la plus fréquente qu'on peut observer sur les structures en béton armé de Génie Civil. Il a été estimé par l'Image Qualité des Ouvrages d'Art (IQOA) qu'environ 28% des ouvrages français sont victimes de la corrosion des armatures [4]. Cette corrosion est provoquée soit par des phénomènes de carbonatation du béton d'enrobage, soit par la pénétration d'agents chimiques extérieurs (en particulier par la pénétration des chlorures).

II.1.1.1 La carbonatation du béton d'enrobage

La carbonatation du béton d'enrobage est amorcée par la pénétration, à travers les fissures et la porosité, du dioxyde de carbone présent dans l'air. Lorsque le béton est placé dans un environnement avec une humidité relative autour de 65%, la cinétique des réactions de carbonatation est maximale. Le dioxyde de carbone va alors réagir avec les différents types d'hydrates présents dans le béton et spécialement avec la portlandite pour former du carbonate de calcium. Ce phénomène entraîne une diminution du pH de la solution interstitielle du béton, jusqu'à des valeurs où la couche passivante (protectrice) des armatures devienne instable. À partir de là, et lorsque les conditions le permettent (présence d'oxygène et humidité suffisante), les processus de corrosions se déclenchent (§II.4.2).

II.1.1.2 La pénétration des chlorures dans le béton

Dans la plupart des cas, la pénétration des ions chlorure dans le béton se fait, soit par le biais des constituants lors du gâchage, soit par une exposition de la structure en béton armé à un environnement marin, ou bien dans des conditions d'utilisation fréquente du sel de déverglaçage avec des cycles de gel-dégel fréquents. Dans ce cas, la pénétration des chlorures se fait principalement par diffusion lorsque le béton est suffisamment saturé. Lorsque les ions chlorure ont atteint les armatures en quantité suffisante pour les dépassiver, les processus de corrosion peuvent alors débuter. En général, on admet que le seuil critique pour lequel la corrosion des aciers peut débuter correspond au rapport $[CL^-]/[OH^-]$ de 0.6.

Les dégradations observées sur les structures en béton de Génie Civil sont le résultat de l'expansion des produits de corrosion qui provoquent des fissurations internes du béton d'enrobage. On peut donc observer une délamination du béton d'enrobage qui se poursuit, dans la plupart des cas, par l'éclatement de ce dernier, **figure II.1** ci-dessous.



Figure II. 1 : Délamination et éclatement du béton [5]

II.1.2 Les conséquences des cycles de gel-dégel

Dans les régions froides ou en altitude, les gestionnaires d'ouvrage sont souvent confrontés aux conséquences des cycles de gel-dégel sur la durabilité des bétons. Les structures en béton armé construites dans ces régions sont les plus exposées aux mécanismes de dégradation liés à la cristallisation de l'eau dans les pores capillaires. De plus, ce phénomène de cycle de gel-dégel est amplifié par l'utilisation fréquente de sels de déverglaçage sur les routes et tabliers de ponts [6]. Ainsi, la répétition des cycles de gel-dégel provoque des contraintes à l'intérieur du béton pouvant aller jusqu'à la création des macro-fissures sur la surface du béton. Ce phénomène va accentuer l'effet des sels de déverglaçage et leur conséquence sur la corrosion des armatures et des câbles de précontraintes (§II.1.1).

II.1.3 L'action des eaux agressives sur les structures en béton

Les structures en béton de Génie Civil sont souvent construites sur des sites où il est parfois impossible d'échapper aux agents chimiques agressifs extérieurs provenant des eaux agressives de ces milieux. Ces eaux agressives peuvent se trouver sur différents sites autour de la structure et peuvent avoir diverses origines, soit des eaux de pluie, de cours d'eau, souterraines, provenant de la fonte de neige ou encore de la mer.

II.1.3.1 Milieu acide

Les milieux acides susceptibles d'agresser le béton s'étendent sur une large gamme d'eaux. Cependant, seulement l'eau pure conduit généralement à un lessivage massif des alcalins, du calcium et des ions hydroxydes par dissolution de l'hydroxyde de calcium, et décalcification des silicates de calcium hydratés et des sulfoaluminates. La sévérité de la dégradation provoquée par une eau pure sur le béton dépend de plusieurs paramètres (paramètres liés à la mise en place du béton ou à l'environnementaux) :

- La qualité du béton ;
- La qualité de l'eau ;
- La température ;
- Et la concentration d'espèce soluble présente dans l'eau.

De façon générale, ces facteurs conduisent à une augmentation de la porosité du béton, de la perméabilité et à une diminution de la résistance mécanique du béton.

II.1.3.2 Environnement sulfatique et milieu marin

D'après Duval et Hornain [7, 5], les sulfates représentent le risque le plus important d'agressivité sur la durabilité des ouvrages en bétons. L'agression des structures en béton par les sulfates engendre des désordres de type expansion due à la cristallisation d'ettringite secondaire. Néanmoins, ces agressions ne sont dangereuses que si les sulfates peuvent accéder par diffusion en solution jusqu'aux aluminates de calcium de la pâte de ciment hydratée.

D'autre part, en milieu marin, plusieurs mécanismes d'attaque peuvent être prématurés pour le béton. L'action des chlorures sur l'altération du liant (par exemple l'aluminate tricalcique) aboutit à la formation du monochloroaluminate de calcium, relation (2.1), ou encore le sel de Friedel.



On peut aussi avoir la formation d'ettringite expansive par action des sulfates de magnésium.

II.2 Les conséquences de la présence d'eau et des ions chlorures dans les milieux poreux

Nous avons vu au paragraphe (§II.1.1) que les chlorures migraient dans le béton par diffusion lorsque le béton est suffisamment saturé en eau. On sait aussi que si le béton est partiellement saturé ou soumis à des cycles de séchage/humidification, les chlorures (libres) migrent avec la phase liquide par capillarité [5]. C'est souvent le phénomène qui se produit sur les structures en béton exposées à un environnement marin ou en présence de sels de déverglaçage. Dans ce genre de configuration, il est donc facile de comprendre que l'eau libre présente à l'intérieur des pores capillaires du béton va jouer le rôle de transport, de « véhicule », pour les ions chlorures afin de migrer au cœur du béton.

La présence de l'eau à l'intérieur des pores capillaires du béton est donc un paramètre important vis à vis à la durabilité des ouvrages en béton. Car, dans la plupart des cas, elle est un élément fondamental voire nécessaire à l'application et au développement de certaines pathologies. Par conséquent, on sait aujourd'hui que :

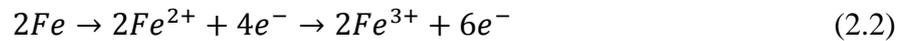
- Dans la plupart des cas, la pénétration des chlorures libres au cœur du béton n'est possible que lorsqu'on est en présence d'eau ;
- Une humidité relative interne de 65 % favorise la pénétration et l'activité du CO_2 dans le béton ;
- Le béton sec résiste naturellement aux cycles de gel-dégel sans précautions particulières et les risques de dégradations n'existent que lorsque le béton est dans un état de saturation supérieur ou égal à 80 %.

L'eau étant donc un paramètre clé à évaluer dans les processus de dégradation du béton. L'utilisation d'une technique non destructive comme moyens d'investigations afin d'évaluer ce paramètre présente donc un intérêt majeur vis à vis à la durabilité des ouvrages en béton. Mais tout d'abord, nous allons commencer par voir les différentes méthodes qui permettent de caractériser les pathologies liées à la présence d'eau et aux ions chlorures dans les ouvrages en béton.

II.2.1 Processus de corrosion des aciers dans ouvrages en béton

Au cours de la vie d'un ouvrage en béton armé, des agents agressifs extérieurs peuvent pénétrer et atteindre les aciers de services, soit par diffusion de gaze (O_2 , CO_2 ..), ou soit par pénétration d'eau et d'ions à travers les fissures et les cavités (H_2O , Cl^- , $(\text{SO}_4)^{2-}$..). Les

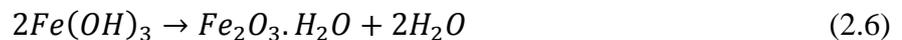
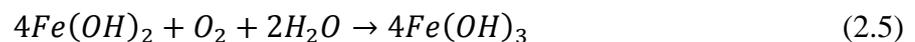
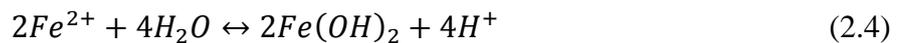
réactions qui s'en suivent au contact de ces produits sur les aciers de service aboutissent dans la plupart des cas à des produits d'expansion, généralement de la corrosion, qui dégrade fortement les ouvrages en béton armé et réduisent leurs durabilités. La corrosion débute sur une zone dite anodique par une dissolution de l'acier de service dans un pore contenant de l'eau suivant la réaction anodique (2.2).



Les électrons fournis par la réaction (2.2) doivent être consommés. Pour cela, une seconde réaction chimique, dite cathodique, a lieu quelque part le long de l'acier de service et cela selon la réaction (2.3).



A partir de là, différents produits de corrosion peuvent apparaître selon le pH de la solution, l'oxygène en excès ou bien selon la teneur en eau. Les réactions qui vont suivre débutent en consommant le Fe^{2+} créé à partir de la réaction anodique (2.2) pour aboutir à des produits d'expansion.



Dans notre cas, les ions chlorure provenant du milieu extérieur réduisent le pH autour de l'acier de service, cela a pour conséquences la dépassivation de la couche protectrice sur l'acier et l'initiation du début des processus de corrosion. Par ailleurs, les produits de corrosion obtenus à partir des réactions (2.5) (hydroxyde de fer $-Fe(OH)_3-$) et (2.6) (oxyde de fer $-Fe_2O_3-$) sont 4 à 7 fois plus volumineux que l'acier. Ce qui peut entraîner des contraintes importantes sur les ouvrages en béton armés qui finissent par se fissurer et se dégrader.

II.2.2 Généralité sur les méthodes d'évaluation de la teneur en chlorure

Il existe actuellement plusieurs méthodes de mesure pour caractériser la teneur en chlorures présente dans la solution interstitielle béton. Cependant, la plupart de ces méthodes sont des méthodes destructives, car nécessitent de prélever des carottes de béton directement sur l'ouvrage pour caractériser la teneur en chlorure. Le **tableau II.1** présente quelques méthodes destructives qui permettent d'estimer la teneur en chlorure dans un échantillon de béton,

Tableau II. 1 : Quelques méthodes destructives utilisées en Génie Civil pour la caractérisation des chlorures.

Techniques	Principe	Application principale	Avantages	Inconvénients
Essai de perméabilité de chlorure rapide (RCPT)	Mesure du coefficient de diffusion des chlorures du béton	Destiné aux ouvrages en béton exposés à un environnement agressif	Peu encombrant, accessible, facile à utiliser et ne comporte pas de risque	Pas adapter aux grandes surfaces, utilisation en laboratoire, durée relativement longue.
Essai de diffusion des chlorures en régime non permanent [21, 22]	Mesure du coefficient de diffusion des chlorures du béton.	Destiné aux ouvrages en béton exposés à un environnement contenant des agents agressifs.	Accessible, facile à utiliser et ne comporte pas de risque	Durée de mise en œuvre assez longue
Essai par migration électrique (GranDubé)	Mesure de la profondeur de pénétration des chlorures induite par une différence de potentiel électrique. Mesure d'un coefficient de diffusion des chlorures.	Destiné aux ouvrages en béton exposés à un environnement contenant des agents agressifs.	Essai rapide comparé à l'essai de diffusion naturelle d'ions chlorures. Possibilité de déterminer un coefficient de diffusion des ions chlorure.	Nécessite une cellule spécifique d'électro-diffusion, figure II.3.
Spectroscopie d'impédance électrochimique	Mesure de l'impédance de diffusion de charge des chlorures. Mesure du coefficient de diffusion des chlorures.	Destiné aux ouvrages en béton exposés à un environnement contenant des agents agressifs.	Essai rapide comparé aux autres essais du même type.	Préparation des échantillons relativement longue et fastidieuse.
Dosage en chlorure (GranDuBé)	Extraction des chlorures présents dans un échantillon de béton en poudre par de l'acide nitrique dilué, leur dosage est effectué à l'aide d'une solution de nitrate d'argent par titrage	Destiné aux ouvrages en béton exposés à un environnement contenant des agents agressifs.	Détermination des chlorures liés, libres et totaux.	Préparation des échantillons relativement longue et fastidieuse. Utilisation d'une solution de Nitrate d'argent ($AgNO_3$) et de l'acide

	potentiométrique.			chlorhydrique (HCl)
		Destiné aux		Nécessite l'utilisation
		ouvrages en		des produits
Test colorimétriques	Mise en évidence de la	béton exposés à	Détection de la	dangereux comme le
de détection des	présence des chlorures par	un	présence des	nitrate d'argent
chlorures	pulvérisation d'indicateurs	environnement	chlorures libres	(AgNO ₃) et le
(GranDuBé)	colorés	contenant des		chromate de
		agents agressifs.		potassium(K ₂ CrO ₄)

La plupart des méthodes présentées sur le **tableau II.1** nécessitent des préparations longues et rigoureuses en laboratoire. Le plus souvent, ces méthodes sont utilisées pour des prises de décision à long terme afin de minimiser les coups de réparations et de maintenance.

Par ailleurs, la méthode de perméabilité de chlorure rapide permet une vérification de la qualité d'un matériau béton. Elle consiste, entre autres, à évaluer le coefficient de diffusion des chlorures sur un échantillon de béton provenant d'un prélèvement d'une carotte sur un ouvrage en béton. Pour cela, cette méthode nécessite qu'on applique un courant continu de 60V pendant une durée relativement longue. Les résultats de mesure permettent de prédire la durée de vie de l'ouvrage sur le long terme.

D'autre part, la méthode de diffusion des chlorures en régime non permanent est principalement basée sur l'utilisation de la deuxième loi de Fick, relation (2.7).

$$\frac{\partial m_{CT}}{\partial t} = \nabla[D_c \nabla C_{CL}] \quad (2.7)$$

Avec m_{CT} masse volumique apparente des chlorures totaux (kg/m³), t le temps, D_c tenseur des coefficients de diffusion effectifs aux ions chlorures (m²/s), C_{CL} concentration de la solution interstitielle en chlorures libres (g/l ou Kg/m³), et ∇ le gradient.

Dans le cas général, la diffusion caractérise les processus de transfert d'un constituant, dans notre cas les ions chlorures, en solution sous l'effet d'une différence de concentration entre deux points d'un milieu donné, séparés par un échantillon d'épaisseur L (**figure II.2**). Ce transfert de constituant est orienté de la zone la plus concentrée, amont, vers la zone la moins concentrée, aval, comme représenté sur la **figure II.2**.

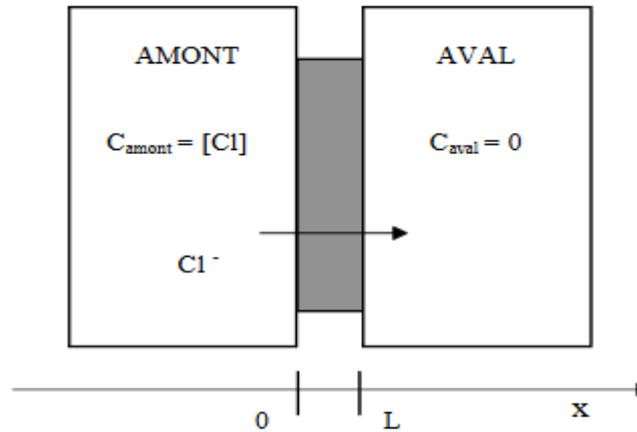


Figure II. 2 : Principe des essais de diffusion des ions chlorures [22]

Cependant, la méthode de diffusion des chlorures en régime non permanent est uniquement employée sur des petits échantillons de béton extraits des ouvrages en béton en service, ou bien sur des échantillons de béton ayant une maturation de 28 jours. Cette méthode permet aussi de prédire la durée de vie d'un ouvrage en béton sur le long terme.

Enfin, la méthode par migration électrique est un essai accéléré qui consiste à caractériser la résistance du béton à la pénétration des ions chlorures de son environnement (milieu marin, sels de déverglaçage par exemple). Pour cela, un courant compris entre 10-15V est appliqué en continue de part et d'autre des deux électrodes, cathode et anode, et on mesure la profondeur de pénétration des ions chlorures, **figure II.3**. Cette méthode permet, entre autres, de mesurer un coefficient de diffusion des chlorures sur un échantillon de béton.

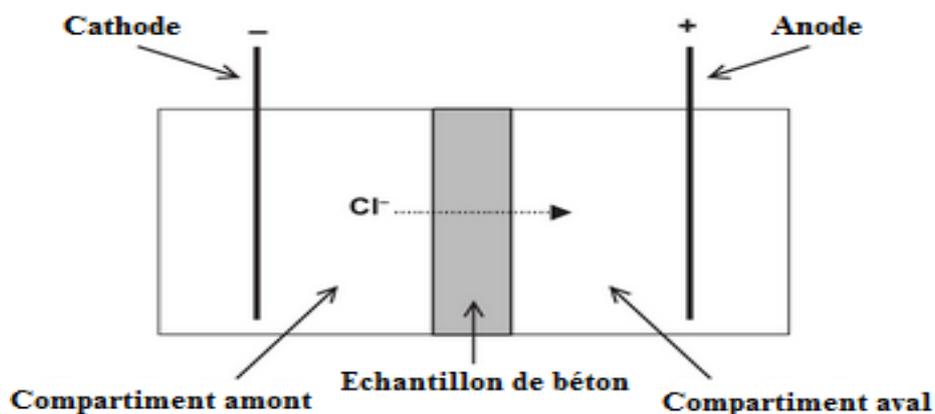


Figure II. 3 : Principe de la cellule d'essai de migration des ions chlorure sous un champ électrique [GranDuBé, 2007]

II.3 Les méthodes de contrôle non destructif (CND) des structures en béton.

À la différence des méthodes destructives, les méthodes de contrôle non destructif des ouvrages en béton ont pour objectif de fournir aux ingénieurs un nombre important d'informations sur l'ouvrage, sans pour autant nuire ou causer des dommages irréversibles sur ce dernier. Aussi, ces méthodes ont pour objectif principal de donner une idée et un état visuel de l'ensemble du « squelette » de l'ouvrage aux ingénieurs et aux maîtres d'ouvrage. De ce fait, on peut alors diagnostiquer les pathologies de l'ouvrage, prédire sa durée de vie et si besoin, intervenir sur un patrimoine donné afin de limiter les coûts de réparation. Le **tableau II.2** ci-dessous liste les différentes techniques non destructives utilisées selon, leurs principes, leurs applications principales, leurs avantages et leurs limites.

Tableau II. 2 : Avantages et limites de quelques méthodes non destructives [5], (Complété par Z.M. Sbartai, J-P. Balayssac et S. Laurens, 2005).

Technique de contrôle	Principe	Application principale	Avantages	Limitations
Observation visuelle	Examen visuel détaillé de l'aspect extérieur	Obtenir des informations sur les dégradations visibles	Fournit des informations utiles sur les causes des dégradations et leur étendue	Aucune information sur les dégradations internes. Des contrôles complémentaires sont requis.
Méthodes électriques et Electrochimiques	Mesure de la résistivité, du potentiel d'électrode et de la résistance de polarisation.	Déterminer la probabilité de corrosion dans une structure ASTM C876, RILEM EMC 154	Peu coûteuse, qualification normale requise	Affectée par la teneur en eau et en chlorures et la température.
Méthodes magnétiques	Générer un champ magnétique et en mesurer l'intensité	Localisation et détermination de la profondeur des armatures	Peu coûteuse	Imprécise et inefficace dans les zones très fortement armées. Qualification minimale requise.
Gammadensimétrie	Emission de rayons gamma et mesure d'atténuation	Evaluation de la densité du béton	Détermination du degré d'humidité en fonction de la profondeur	Dangereuse (radioactivité). Exige un personnel qualifié.
Radiographie	Le rayonnement X ou gamma est plus	Localisation des fissures internes,	Les défauts internes peuvent être	Coûteuse, lourde, lente et dangereuse.

	ou moins atténué selon qu'il traverse le béton ou l'acier. Impression d'un film radiographique	vides et variation de la densité et la composition du béton. Localisation des tiges de renforcement Détection de ruptures de câbles de précontrainte	défectés. Aucun endommagement n'est provoqué.	L'intensité de la radiation ne peut pas être ajustée. Personnel hautement qualifié. Deux surfaces opposées doivent être accessibles. La surface auscultée est limitée.
Scléromètre	Mesure de la dureté des surfaces	Estimation de la résistance à la compression, de l'uniformité et la qualité du béton NF EN 12504-2	Peu coûteuse, résultats rapides.	Affectés par les conditions des surfaces (carbonatation). Nécessite une calibration pour obtenir une estimation acceptable de la résistance en compression.
Les ondes acoustiques : -Ultrasons -Impact-écho	Mesure du temps de propagation d'une onde mécanique, sonique ou de son atténuation dans le béton	Estimation de la qualité et l'uniformité du béton. Localisation des vides et des fissures	Essai relativement simple	Manque de précision. Analyse des résultats par une personne qualifiée. L'humidité et la présence de renforts peuvent affecter les résultats
Emission acoustique	Détection du bruit émis par une structure sous contraintes	Contrôle des structures métalliques. Contrôle des câbles. Contrôle d'endommagement du béton	Peu coûteuse. Auscultation de grandes dimensions. Détection des fissures.	Méthode passive : les défauts doivent évoluer pour être détectés.
Thermographie infrarouge	Mesure du champ de température à la surface d'un ouvrage	Auscultation des structures et chaussées	Essai rapide. Auscultation de grandes surfaces Cartographie détaillée de la surface d'une	Sensible aux conditions environnementales. L'exploitation des images nécessite beaucoup de

			structure. Mise en évidence des réseaux de fissures	corrections
Résistivité électrique	Application d'un potentiel électrique, mesure du flux de courant puis calcul de la résistivité.	Sur les ouvrages en béton armés sur site et sur des échantillons de béton en laboratoire.	Facile à utiliser. Prise de mesures rapides et mise en évidence des zones détériorées.	Demande une grande préparation. Imprécision des mesures au contact du béton. La température, l'humidité relative, la pluie et la taille des granulats peuvent fausser les mesures
Radar	Mesure du temps de propagation des ondes électromagnétiques ou de leur atténuation dans le béton	Auscultation des structures et chaussées	Facile à utiliser. Auscultation rapide sur des grandes surfaces. Mise en évidence des zones dégradées	Sensible à l'humidité. Profondeur de pénétration limitée. Le traitement des données nécessite un personnel qualifié

À noter que la méthode de résistivité électrique représentée sur le tableau ci-dessous regroupe plusieurs méthodes non-destructives qui permettent de déterminer, ou de quantifier la teneur en chlorures présente dans un ouvrage en béton en mesurant sa résistivité. Sur la **figure II.4** sont illustrées deux méthodes de résistivité.

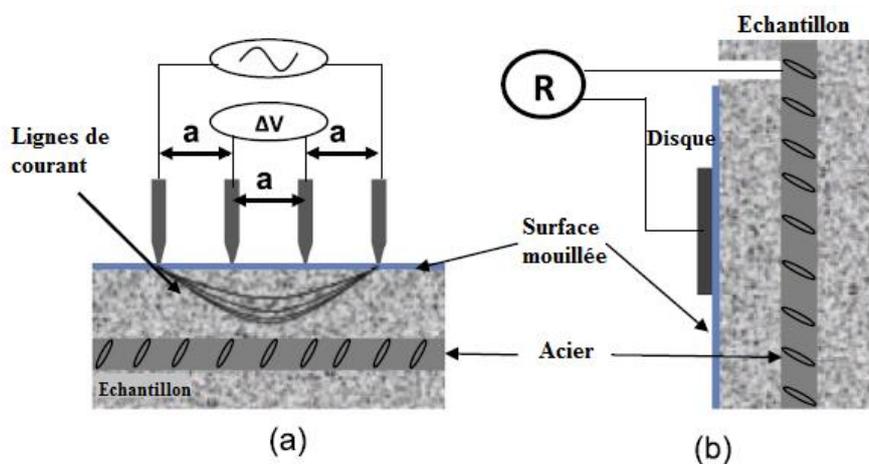


Figure II. 4 : Les différentes méthodes basées sur la résistivité électrique. (a) méthode de résistivimètre et (b) méthode à disque [14]

La méthode de résistivimètre, (a), consiste à appliquer un courant aux deux sondes externes et de mesurer la différence de potentiel entre les deux sondes internes. Le courant appliqué est transporté par les ions présents dans la solution interstitielle du béton. Cela permet de mesurer une résistance et d'en déduire une résistivité électrique qui est fonction de l'espacement entre les sondes suivant la relation (2.8).

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} = 2\pi a R \quad (2.8)$$

Avec : a l'espacement entre les sondes, V le potentiel électrique mesuré, I le courant appliqué et R la résistance.

La méthode à disque (b), quant à elle, consiste à placer sur une surface de béton mouillée une électrode (ici le disque en question) et à mesurer la résistance. Cette électrode doit être assez proche d'un lit d'armature pour pouvoir mesurer la résistance entre le « disque » et le lit d'armature [23]. De plus, cette méthode requière une connexion continue entre les lits d'armatures.

Enfin, la méthode GPR est une technique non destructive dont son utilisation pour la détection des chlorures dans les structures en béton de génie civil est assez récente. Sa rapidité de prise de mesures sur des grandes surfaces ainsi que ses avantages (cf. **tableau II.2**) lui permettent de se positionner comme étant un outil très efficace à la détection des zones dégradées. L'intérêt de son utilisation sur les structures en béton de génie civil s'avère donc être très intéressent d'un point de vue économique et de durabilité des ouvrages.

II.4 Notions théoriques sur la propagation des ondes électromagnétisme (EM)

Un radar de type GPR émet des ondes électromagnétiques pour qu'elles se propagent à l'intérieur d'un sol ou d'un élément en béton. Il est donc nécessaire de se familiariser avec les lois de propagations des ondes électromagnétiques pour mieux comprendre le mode de fonctionnement des radars. Ces lois vont être décrites sur les paragraphes qui suivent.

II.4.1 Définition d'une onde électromagnétique (EM)

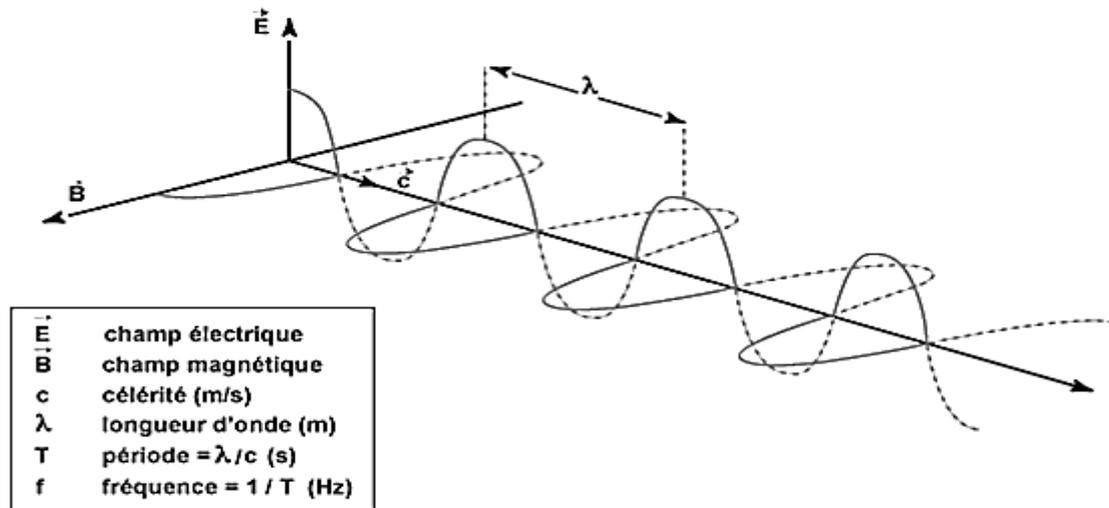


Figure II. 5 : Exemple de propagation d'une onde électromagnétique (EM)

Par définition, une onde électromagnétique est définie comme étant la combinaison d'un champ électrique \vec{E} et d'un champ magnétique \vec{B} oscillant à la même fréquence, comme représentée sur la **figure II.5**. Ces deux champs, qui sont perpendiculaires l'un par rapport à l'autre, se propagent dans un milieu donné suivant une direction orthogonale. Le plan de propagation du champ électrique E est le plan électrique, et le plan de propagation du champ magnétique B est le plan magnétique.

II.4.2 Propagation des ondes électromagnétiques dans le vide

II.4.2.1 Vitesse de propagation dans le vide, longueur d'onde et fréquence

La vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dépend fortement de son milieu de propagation. Dans le vide, cette vitesse ou célérité est constante et est égale à :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1} \quad (2.9)$$

Avec : μ_0 la permittivité magnétique du vide $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m], ϵ_0 la constante diélectrique du vide : $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ [F/m].

De ce fait, cette vitesse de propagation dans le vide, relation (2.9), sera prise comme référence pour le calcul des vitesses de propagations sur les échantillons de béton présentés un peu plus loin dans le chapitre IV. D'autre part, l'onde électromagnétique est caractérisée par plusieurs grandeurs physiques qui sont :

λ : longueur d'onde en mètre [m], définit le caractère oscillatoire périodique d'une onde électromagnétique. Comme on peut l'observer sur la **figure II.5**, elle représente la distance séparant deux crêtes successives ou bien autrement dit, c'est la longueur que parcourt une onde durant une période (un cycle).

T : période en seconde [s], représente le temps nécessaire que met l'onde électromagnétique pour faire un cycle ou pour parcourir une longueur d'onde.

f : fréquence en Hertz [Hz]. C'est l'inverse de la période T, elle représente le nombre total d'oscillations ou de cycles par unité de temps.

Ces grandeurs physiques sont liées par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{c_v}{f} = c_v T \quad (2.10)$$

Avec : C_v : vitesse de propagation de l'onde EM dans le milieu considéré en [m.s⁻¹]

Cette proportionnalité de la longueur d'onde en fonction de la fréquence est représentée sur la **figure II.6** ci-dessous sous forme de spectre électromagnétique, pour différents types d'ondes EM existantes.

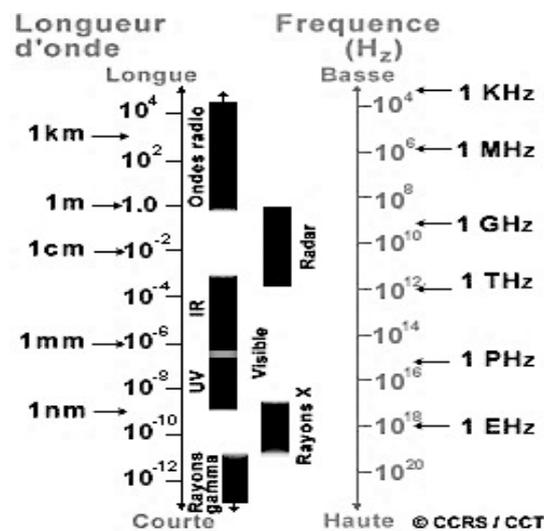


Figure II. 6 : Spectre électromagnétique (EM) [5]

Sur cette **figure II.6**, les fréquences radar sont comprises entre 100 MHz et 10³ GHz, ce qui correspond à une gamme de longueurs d'ondes de 1m à 10⁻⁴ m.

II.4.2.2 Equations de propagations des ondes EM dans le vide

Les équations de propagation des ondes électromagnétiques ont été pour la première fois énoncées par James Clark Maxwell dès 1886. Elles vérifient, entre autres, la théorie de la propagation des ondes EM dans le vide et dans un milieu matériel au travers des expériences faites par le physicien allemand Heinrich Hertz. Ainsi les formes générales et différentielles de ces équations représentant des ondes EM se propageant dans le vide sont définies de la manière suivante :

Relations de Maxwell-Gauss :

$$\operatorname{div}\vec{E} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (2.11)$$

$$\operatorname{div}\vec{B} = 0 \quad (2.12)$$

Avec Q la densité volumique des charges libres en $[C/m^3]$, \vec{E} le champ électrique en $[V/m]$, \vec{B} le champ magnétique en Tesla[T] et ϵ_0 la constante diélectrique du vide ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}[F/m]$).

Relation de Maxwell-Faraday :

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.13)$$

Avec μ_0 la perméabilité magnétique du vide ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} Hm^{-1}$) et t le temps en seconde [s].

Relation de Maxwell-Ampère :

$$\operatorname{rot}\vec{B} = \vec{J}_c + \vec{J}_d \quad (2.14)$$

Avec \vec{J}_c la densité de courant de conduction $[A/m^2]$, \vec{J}_d la densité de courant de déplacement $[A/m^2]$.

Dans le vide, pas de conduction σ donc : $\vec{J}_c = \sigma \vec{E} = \vec{0}$. En partant de cette hypothèse, la relation (2.14) devient :

$$\operatorname{rot}\vec{B} = \vec{J}_d = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.15)$$

Enfin, la combinaison de ces équations permet de déduire les équations d'onde des champs électrique (2.16) et magnétique (2.17) suivant une direction x :

$$\Delta \vec{E}(x, t) = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.16)$$

$$\Delta \vec{B}(x, t) = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (2.17)$$

II.4.3 Propagation des ondes électromagnétique dans un milieu matériel

II.4.3.1 Equations de propagations des ondes EM dans le milieu matériel

En génie civil, le béton, la roche ou le sol, sont considérés comme des milieux à faibles pertes diélectriques (milieux à faible quantité de charges mobiles). Ils sont caractérisés par leurs faibles constantes diélectriques (comprises pour le béton entre 4 et 12) et considérés comme étant d'assez bons isolants. Lorsque ces matériaux sont traversés par une onde électromagnétique, leurs propriétés et leurs caractéristiques EM peuvent changer en fonction de leur structure (granulats, porosité, vides...), de la température et de leurs teneurs en eau et en chlorures. Tous ces paramètres provoquent alors des pertes diélectriques plus ou moins importantes au cours de la propagation d'une onde EM dans le milieu matériel considéré. De ce fait, les équations de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide, vues précédemment, deviennent alors :

Relations de Maxwell-Gauss :

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{Q}{\varepsilon} \quad (2.18)$$

Relation de Maxwell-Faraday :

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.19)$$

Relation de Maxwell-Ampère :

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \vec{J}_d + \vec{J}_c = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.20)$$

$$\Delta E(x, t) = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.21)$$

$$\Delta B(x, t) = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (2.22)$$

Avec ε et μ qui sont respectivement la permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique du milieu considéré.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r ;$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r ;$$

ϵ_r et μ_r représentent respectivement la permittivité diélectrique relative et perméabilité magnétique relative du milieu de propagation de l'onde électromagnétique. Ce sont des grandeurs adimensionnelles.

De plus, comme on est dans un milieu matériel et que certains matériaux comme le béton sont des milieux poreux susceptibles de modifier certaines grandeurs de l'onde EM rayonnée, la permittivité diélectrique relative ne se résume plus alors uniquement à une constante diélectrique mais à une grandeur complexe de la forme :

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - i\epsilon_r'' \quad (2.23)$$

Avec ϵ_r' la partie réelle de la permittivité diélectrique relative (constante diélectrique relative) et ϵ_r'' la partie imaginaire de la permittivité diélectrique relative (facteur de pertes), ce dernier est lié à la conversion d'une partie de l'énergie rayonnée en chaleur lorsqu'un matériau poreux, comme le béton par exemple, est saturé.

Un milieu matériel est considéré comme un diélectrique à faible perte lorsque :

$$\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \ll 1 \quad (2.24)$$

D'autre part, en reprenant l'équation (2.21) de Maxwell et pour une onde plane progressive monochromatique de pulsation ω se propageant suivant une direction x , cette équation admet comme solution :

$$E(x, t) = E_0 e^{i\omega t} e^{-\gamma x} \quad (2.25)$$

$$E(x, t) = E_0 e^{-\alpha x} e^{i(\omega t - \beta x)} \quad (2.26)$$

Avec E_0 l'amplitude du champ électrique [V/m] et γ la constante de propagation complexe pouvant se mettre sous la forme suivante :

$$\gamma = \alpha + i\beta = \sqrt{i\omega\mu (i\omega\epsilon_r^*)} \quad (2.27)$$

t est le temps en seconde et ω la pulsation du champ électrique :

$$\omega = 2\pi f \quad (2.28)$$

À partir de ces équations, et celles fournies dans [8], un vecteur d'onde $\vec{k} = k \cdot \vec{e}_x$ est introduit, tel que :

$$ik = \gamma = \alpha + i\beta = k' + ik'' = i\omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r' \left(1 - i \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}\right)} \quad (2.29)$$

Avec $i^2 = -1$, α le facteur d'atténuation et β le coefficient de phase.

On peut alors écrire à partir de la relation (2.25) et pour tout point M de l'espace :

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 \cdot e^{i\omega t} e^{-ikx} \quad (2.30)$$

$$\vec{E}(M, t) = \vec{E}_0 \cdot e^{i(\omega t - \vec{k}_i \cdot \vec{r})} \quad (2.31)$$

Avec :

$$\vec{r} = \overrightarrow{OM}$$

II.4.3.2 Atténuation et profondeur de pénétration d'une onde EM dans un milieu matériel

La relation (2.26), met en avant deux types de fonctions. Une fonction $e^{-\alpha x}$ représentant une atténuation par absorption en fonction de la distance parcourue par l'onde et une autre fonction $e^{i(\omega t - \beta x)}$ représentant la propagation de l'onde dans le milieu matériel.

En parallèle, la relation (2.29) nous permet d'écrire :

$$\alpha = \omega \left[\frac{\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}\right)^2} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.32)$$

$$\beta = \omega \left[\frac{\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}\right)^2} + 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.33)$$

À partir du coefficient d'atténuation, α , on peut alors déduire la profondeur de pénétration, P_p , de l'onde comme suit :

$$P_p = \frac{1}{\alpha} \quad (2.34)$$

$$P_p = \frac{c\sqrt{2}}{\omega} \frac{1}{\left[\mu_r (\sqrt{\varepsilon_r' + \varepsilon_r''} - \varepsilon_r') \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.35)$$

On peut observer à partir des relations (2.32) et (2.35), que l'atténuation et la profondeur de pénétration de l'onde EM sont fonction de la pulsation, ω , et donc de la fréquence (2.28). Plus

la fréquence est élevée plus l'absorption de l'énergie EM par un milieu matériel est importante et plus la profondeur de pénétration de l'onde EM est réduite.

II.4.3.3 Vitesse de propagation d'une onde EM dans un milieu matériel

La vitesse de propagation d'une onde plane progressive monochromatique dans un milieu matériel peut être définie comme étant une équation du type $\varphi = \omega t - \beta x = 0$. La vitesse de propagation peut alors s'écrire :

$$v_{\varphi} = \frac{x}{t} = \frac{\omega}{\beta} \quad (2.36)$$

Avec v_{φ} la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu matériel considéré en $[\text{m.s}^{-1}]$.

Pour les milieux non magnétiques comme le béton, avec $\mu = \mu_0$ et donc $\mu_r = 1$, des simplifications sont admises sur α et β .

C'est-à-dire que l'on suppose que :

$$\frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \approx 0 \quad (2.37)$$

Les équations (2.32) et (2.33) se simplifient et on a :

$$\alpha = 0 \quad (2.38)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r'} \quad (2.39)$$

On remarque que le coefficient de phase est proportionnel à la pulsation. La vitesse de propagation vue en (2.36) devient alors (pour un matériau homogène et isotrope [8]) :

$$v_{\varphi} = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r'}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r'}} \quad (2.40)$$

Avec c la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dans le vide.

$$\text{Rappel : } c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1}$$

La relation (2.40) implique que la vitesse de propagation de l'onde (ici onde EM) dans le béton dépend fortement de sa permittivité diélectrique relative.

Le **tableau II.3** ci-dessous donne des valeurs approximatives de la vitesse de propagation en fonction de la constante diélectrique relative de quelques matériaux que l'on peut rencontrer en Génie Civil.

Tableau II. 3 : Constante diélectrique relative, conductivité et vitesse de propagation de quelques matériaux [9].

<i>Material</i>	ϵ'_r	σ (mS/m)	v (m/ns)
Air	1	0	0.30
Distilled water	80	0.01	0.033
Fresh water	80	0.5	0.033
Sea water	80	3000	0.01
Dry sand	3-5	0.01	0.15
Saturated sand	20-30	1-10	0.06
Limestone	4-16	0.5-2	0.075-0.15
Silts	5-30	1-100	0.05-0.13
Clays	5-40	2-1000	0.05-0.13
Granite	4-7	0.01-1	0.11-0.15
Concrete	4-10	1-100	0.09-0.15
Polystyrene	2.6	<10 ⁻¹⁰	0.19
Polyethylene	2.3	<10 ⁻¹⁰	0.20
Bitumen	2.6 – 2.8	<10 ⁻¹⁰	0.179-0.186

Cependant, pour le béton, la constante diélectrique relative peut monter facilement jusqu'à 12 lorsque le matériau est suffisamment saturé en eau.

II.4.4 Réflexion et transmission des ondes électromagnétiques à l'interface de deux milieux.

Lorsqu'une onde EM rayonnée incidente se propage dans un milieu 1 à faible perte diélectrique, et selon la direction du vecteur d'onde, \vec{k}_i , jusqu'à atteindre une discontinuité

séparant deux milieux (milieu 1 et milieu 2 possédant des propriétés électromagnétiques différentes, **figure II.7**), elle donne naissance à une onde réfléchie, qui se propage selon la direction du vecteur d'onde \vec{k}_r , et à une onde transmise, qui se propage selon la direction du vecteur d'onde \vec{k}_t . La part de l'énergie réfléchi va alors revenir dans le milieu 1 avec un angle θ_r différent ou égal à l'angle incident θ_i et la part de l'énergie transmise va pénétrer dans le milieu 2 avec un angle θ_t égal à celui de l'angle θ_i de l'onde électromagnétique incidente. La **figure II.7** donne une représentation schématique d'une réflexion et d'une transmission entre deux milieux possédant des propriétés électromagnétiques différentes.

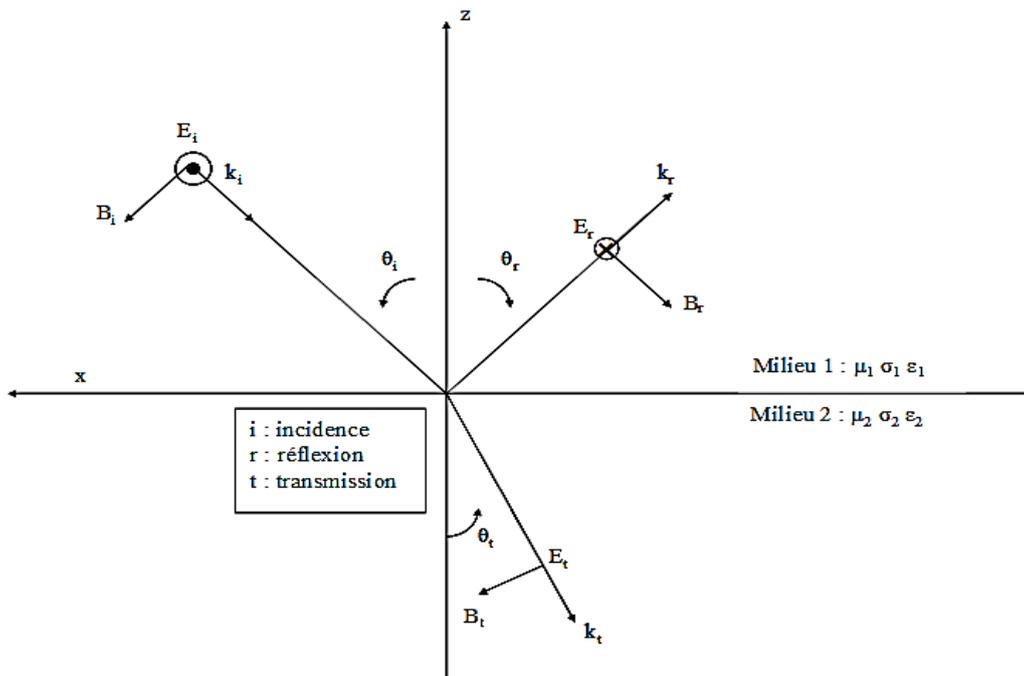


Figure II. 7 : Propagation d'une onde EM entre deux milieux possédant des propriétés EM différentes

Les champs électriques des ondes incidentes, réfléchies et transmises, s'écrivent alors comme suit :

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{0i} \cdot e^{i(\omega t - \vec{k}_i \cdot \vec{r})} \quad (2.41)$$

$$\vec{E}_r = \vec{E}_{0r} \cdot e^{i(\omega' t - \vec{k}_r \cdot \vec{r})} \quad (2.42)$$

$$\vec{E}_t = \vec{E}_{0t} \cdot e^{i(\omega'' t - \vec{k}_t \cdot \vec{r})} \quad (2.43)$$

Avec : \vec{E}_{0i} , \vec{E}_{0r} , \vec{E}_{0t} , les amplitudes maximales des champs électriques des ondes incidentes, réfléchies et transmises.

Aussi, les champs magnétiques associés à ces ondes sont donnés par les relations ci-dessous.

$$\vec{B}_i = \frac{\vec{k}_i}{\omega\mu_1} \cdot \vec{E}_i \quad (2.44)$$

$$\vec{B}_r = \frac{\vec{k}_r}{\omega'\mu_1} \cdot \vec{E}_r \quad (2.45)$$

$$\vec{B}_t = \frac{\vec{k}_t}{\omega''\mu_1} \cdot \vec{E}_t \quad (2.46)$$

D'autre part, au passage de l'interface séparant deux milieux, les relations de continuité des composantes tangentielles des champs électriques et magnétiques imposent plusieurs conditions :

- L'une d'elles étant que les trois ondes possèdent la même pulsation :

$$\omega = \omega' = \omega'' \quad (2.47)$$

Conditions sur l'onde réfléchie :

- \vec{k}_i , \vec{k}_r et $\vec{n}_{1 \rightarrow 2}$ sont coplanaires, c'est-à-dire l'onde réfléchie appartient au même plan d'incidence défini par k_i , \vec{k}_r et $\vec{n}_{1 \rightarrow 2}$ ($\vec{n}_{1 \rightarrow 2}$ étant un vecteur unitaire normal à l'interface et dirigé du milieu 1 vers le milieu 2). Il s'agit en fait de la première loi de Snell-Descartes relative à la réflexion.
- La deuxième loi de Snell-Descartes relative à la réflexion implique la relation (2.48). C'est-à-dire l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.48)$$

Conditions sur l'onde transmise :

- Aussi, la première loi de Snell-Descartes relative à la réfraction implique que l'onde transmise se propage dans le plan d'incidence.
- La deuxième loi de Snell-Descartes relative à la réfraction impose alors la relation (2.49).

$$k_i \sin(\theta_i) = k_t \sin(\theta_t) \quad (2.49)$$

- Enfin, respect des relations de Fresnel relatives aux amplitudes maximales des champs électrique des ondes incidentes, réfléchies et transmises.

Coefficients de réflexion et de transmission :

Ces relations de Fresnel permettent, entre autres, de relier les amplitudes maximales des champs électriques des ondes incidentes, réfléchies et transmises aux coefficients de réflexion et de transmission donnés par les relations (2.50) et (2.51) :

$$r = \frac{E_{or}}{E_{oi}} \quad (2.50)$$

$$t = \frac{E_{ot}}{E_{oi}} \quad (2.51)$$

Aussi, selon l'orientation des vecteurs champs électriques des ondes incidentes, réfléchies et transmises avec le plan d'incidence, les relations (2.50) et (2.51) peuvent s'exprimer de la manière suivante :

- Si les vecteurs champs électriques sont perpendiculaires au plan incidence, alors l'onde est dite transverse électrique (TE) et les coefficients sont définis par les relations (2.52) et (2.53) :

$$r_{TE} = \left(\frac{E_{or}}{E_{oi}} \right)_{TE} = \frac{(Z_2 \cos \theta_1) - (Z_1 \cos \theta_2)}{(Z_2 \cos \theta_1) + (Z_1 \cos \theta_2)} \quad (2.52)$$

$$t_{TE} = \left(\frac{E_{ot}}{E_{oi}} \right)_{TE} = \frac{(Z_1 Z_2 \cos \theta_1)}{(Z_2 \cos \theta_1) + (Z_1 \cos \theta_2)} \quad (2.53)$$

- Si les vecteurs champs électriques sont parallèles au plan d'incidence, alors l'onde est dite transverse magnétique (TM), les coefficients de réflexion et de transmission s'expriment alors selon les relations (2.54) et (2.55) :

$$r_{TM} = \left(\frac{E_{or}}{E_{oi}} \right)_{TM} = \frac{(Z_1 \cos \theta_2) - (Z_2 \cos \theta_1)}{(Z_2 \cos \theta_1) + (Z_1 \cos \theta_2)} \quad (2.54)$$

$$t_{TM} = \left(\frac{E_{ot}}{E_{oi}} \right)_{TM} = \frac{2Z_2 \cos \theta_1}{(Z_2 \cos \theta_1) + (Z_1 \cos \theta_2)} \quad (2.55)$$

Avec $Z_i = \sqrt{\frac{\mu_i}{\varepsilon_i}}$ l'impédance électromagnétique du milieu i , $\theta_1 = \theta_i = \theta_r$ et $\theta_2 = \theta_t$.

Cependant, ces coefficients sont valables que pour des ondes incidentes normales à l'interface des deux milieux.

II.5 Phénomènes d'atténuation dans les milieux matériels.

II.5.1 Atténuation par diffusion

Dans cette section nous allons choisir le béton comme milieu de référence. Le béton étant un milieu très hétérogène, la taille des granulats et la présence de la solution interstitielle dans les pores capillaires vont avoir des répercussions assez importantes sur la propagation de l'onde EM. Etant donné que l'ordre de grandeur de la taille des plus gros granulats est le centimètre, ils sont susceptibles d'avoir des dimensions comparables à celle de la longueur d'onde, **figure II.6**. Il peut y avoir alors un phénomène de diffractions dû aux multiples réflexions sur les inclusions granulaires (phénomène de réflexion/transmission voir §II.4.4). On parle alors d'atténuation par diffusion, comme représenté sur la **figure II.8** ci-dessous.

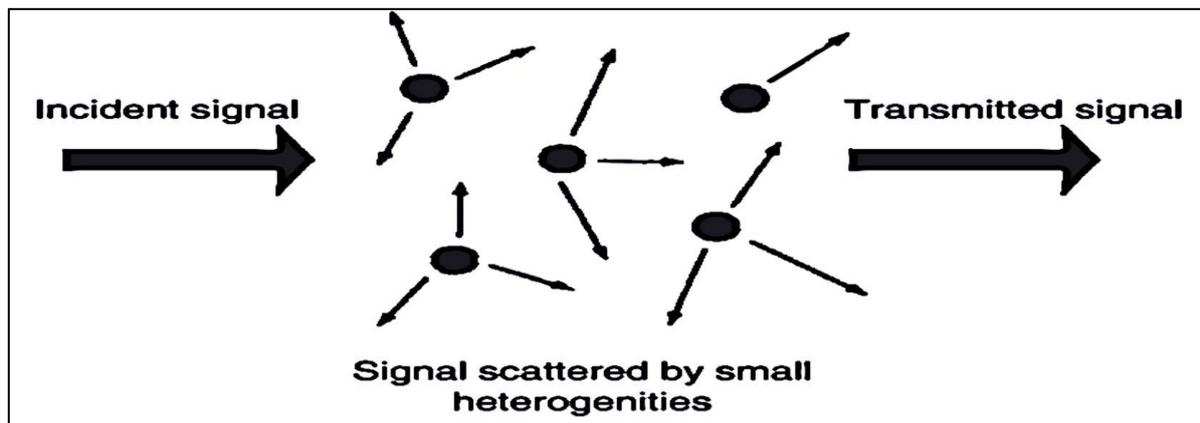


Figure II. 8 : Phénomène de diffraction de l'onde EM [10]

Les inclusions granulaires diffractent l'onde EM incidente, l'énergie de l'onde EM transmise est affaiblie à cause des pertes par diffusions provoquées par l'hétérogénéité du milieu de propagation, ici le béton.

La théorie de multidiffusion permet de faire le lien entre la taille des granulats et ce phénomène de diffusion. En principe, il est préférable de choisir une longueur d'onde telle que :

$$\lambda \geq 2\pi D \quad (2.56)$$

D étant la dimension du plus gros granulats [m].

Notons que plus la dimension de la longueur d'onde est proche de la taille des granulats, plus les pertes par diffusion sont importantes.

II.5.2 Atténuation géométrique

L'atténuation géométrique est essentiellement provoquée par les dimensions du milieu de propagation de l'onde EM. En effet, lorsque l'antenne émettrice rayonne, l'onde EM incidente

rayonnée se déplace dans le béton avec une enveloppe (ou forme) plus ou moins sphérique et uniforme, et cela sur toute la durée de propagation dans le béton. A la réception de l'onde réfléchiée, une diminution de la quantité d'énergie EM enregistrée est observée. En fait, cette diminution d'énergie est non seulement provoquée par la géométrie du milieu de propagation de l'onde EM, mais aussi par la distance qui sépare l'émetteur au récepteur.

Van der Wielen [9] explique dans sa thèse que l'énergie électromagnétique est préservée tout le long de son parcours dans le matériau. Néanmoins, la densité d'énergie diminue lorsque la surface de propagation augmente. Dans une représentation tridimensionnelle, avec une propagation sphérique de l'onde EM, on observe que la densité d'énergie électromagnétique diminue de façon inversement proportionnelle au carré du rayon de la sphère, relation (2.57), **figure II.9**.

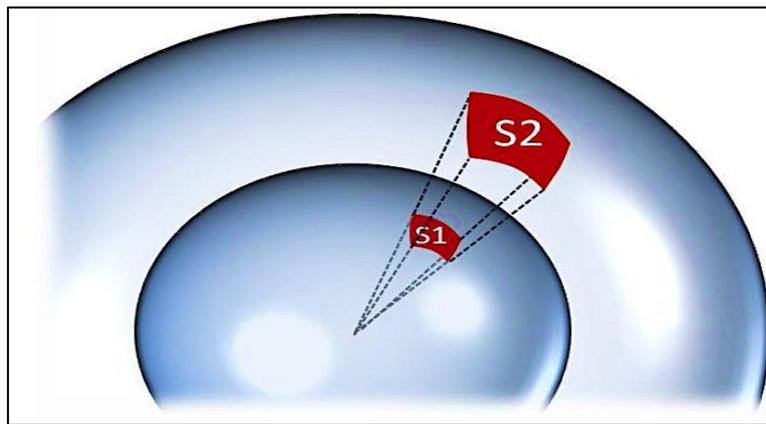


Figure II. 9 : Propagation de l'onde EM dans le béton selon Wielen [9]

Les surfaces S1 et S2 sur la **figure II.9** ont une énergie EM équivalente.

$$P = \frac{1}{4\pi R^2} \quad (2.57)$$

P étant la densité d'énergie et R le rayon de la sphère ou la distance parcourue par l'onde EM.

Si l'onde électromagnétique est soumise à une atténuation, la densité d'énergie restante à une distance R est alors :

$$P = \xi_{TX} G_{TX} \frac{e^{-2\alpha R}}{4\pi R^2} P_{TX} \quad (2.58)$$

Avec ξ_{TX} le rendement de l'antenne émettrice, G_{TX} le gain de l'antenne transmetteur, P_{TX} l'énergie émise par l'antenne, α le coefficient d'atténuation du milieu et R la distance parcourue par l'onde.

Enfin, l'amplitude de l'onde électromagnétique est proportionnelle à la racine carrée de l'énergie. Et elle diminue de façon inversement proportionnelle au rayon de la sphère.

$$\frac{A}{A_0} = \frac{e^{-\alpha R}}{R} \quad (2.59)$$

II.6 Propriétés électromagnétiques des bétons

Les propriétés EM d'un béton traduisent la réponse de ce milieu lorsque celui-ci est traversé par un champ électromagnétique extérieur. Il en existe trois types de propriétés EM pour les bétons qui sont : la permittivité diélectrique ϵ , la conductivité électrique σ , et la perméabilité magnétique μ . Néanmoins, le comportement des bétons sous l'influence d'un champ électromagnétique extérieur reste tout de même mal connu et incite à mener beaucoup de travaux de recherche dans ce domaine. Ces propriétés EM vont être décrites un peu plus en détail dans les paragraphes suivants.

II.6.1 Conductivité électrique

Lorsqu'un milieu contient des charges libres (ions dans les solutions interstitielles des bétons, électrons libres dans les métaux) l'application d'un champ électrique externe, \vec{E} , provoque sur ses charges libres, q , une force, \vec{F} , tel que :

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (2.60)$$

Les charges libres vont alors se déplacer sous l'effet de cette force suivant la direction des lignes du champ électrique. À l'échelle macroscopique, ce déplacement va se manifester par l'apparition d'un courant de conduction. Par conséquent, la conductivité électrique σ , est définie comme étant le déplacement des charges libres à l'intérieur du matériau sous l'application d'un champ électrique externe.

Par ailleurs, on sait que la conduction électrique dans le béton est principalement électrolytique. Son intensité dépend du nombre et de la vitesse des charges libres présentes dans la solution interstitielle. Ainsi, la quantité d'ions présents dans la solution interstitielle du béton joue un rôle important dans la conductivité d'un courant électrique [5, 11]. La conductivité électrique est une grandeur physique complexe qui est liée à la densité du courant de conduction et au champ électrique externe par la relation suivante :

$$\vec{J}_c = \sigma\vec{E} \quad (2.61)$$

Avec σ la conductivité électrique, \vec{E} le champ électrique externe en [V/m] et \vec{J}_c la densité de courant de conduction [A/m²].

Dans le cas des matériaux béton, la conductivité électrique de la solution interstitielle σ_s dépend du nombre d'ions par unité de volume n , de la charge q et de leurs vitesses v_s telle que :

$$\sigma_s = nqv_s \quad (2.62)$$

Cette relation est valable pour un seul type d'ion présent dans la solution interstitielle.

La **figure II.10** ci-dessous donne une idée de la variation de conductivité en fonction de la fréquence et de la teneur en humidité dans un milieu diélectrique comme le béton.

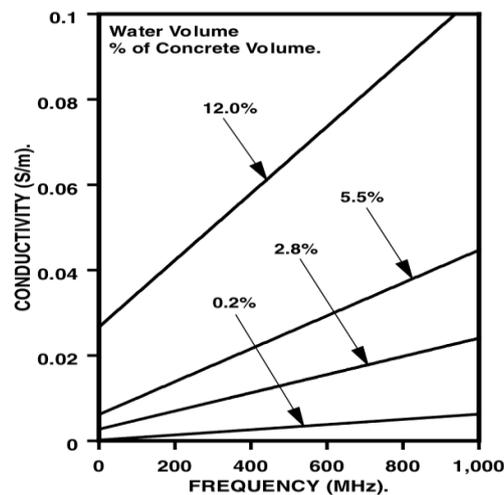


Figure II. 10 : Variations de la conductivité en fonction de la fréquence et de la teneur eau [12]

Tout d'abord on peut observer une augmentation de la conductivité avec l'augmentation de la teneur en eau. Cela est dû en partie à l'augmentation du nombre de molécules d'eau libre dans les pores capillaires du béton. De plus, la conductivité augmente avec l'augmentation de la fréquence, c'est-à-dire lorsque le champ électrique augmente. D'autre part, d'après Kalogeropoulos et al [13], la conductivité électrique du béton peut être calculée à partir de la relation (2.63) :

$$\sigma = 2 \frac{\sqrt{\varepsilon_{rc}}}{r_0} \left[-\frac{1}{2d} \ln \left(\frac{A_{cs}\varepsilon_{rc}-1}{A_{ac}4\sqrt{\varepsilon_{rc}}} \right) \right] \quad (2.63)$$

Avec $r_0 = 377\Omega$ l'impédance du vide, d l'épaisseur de la dalle, ε_{rc} la permittivité diélectrique du béton, A_{cs} et A_{ac} les amplitudes respectives béton/plaque métallique et air/béton comme représenté sur la **figure II.11** ci-dessous.

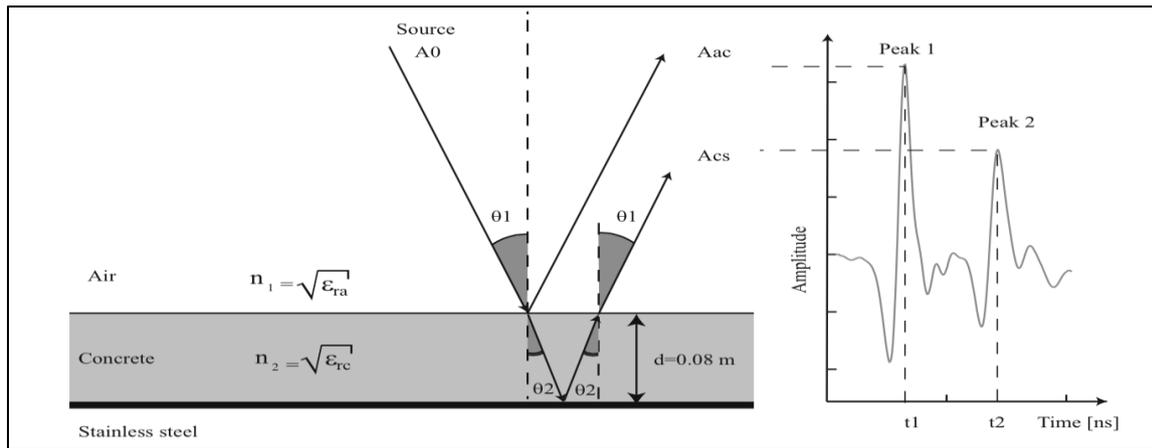


Figure II. 11 : Caractéristiques des ondes EM incidentes et réfléchies [13]

II.6.2 Permittivité diélectrique, phénomène de polarisation électrique

II.6.2.1 Permittivité diélectrique

Par définition, la permittivité diélectrique traduit le déplacement relatif des charges liées, positives et négatives, dans le béton sous l'application d'un champ électrique externe (phénomène de polarisation électrique). La permittivité diélectrique est donc connue comme étant une grandeur physique liée à la densité de courant de déplacement (traversant un matériau béton) par la relation suivante :

$$\vec{J}_d = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.64)$$

Avec ε la permittivité diélectrique du milieu de propagation, \vec{E} le champ électrique [V/m], t le temps [s] et \vec{J}_d la densité de courant de déplacement [A/m²].

La **figure II.12** ci-dessous représente les variations de la permittivité relative en fonction de la fréquence et de la teneur en eau. On observe bien une diminution de la permittivité diélectrique relative avec l'augmentation de la fréquence. On observe aussi que cette diminution est plus importante lorsque le béton est saturé en eau. En effet, pour des faibles valeurs de teneurs en eau (0,2% du volume de béton, matériau presque sec), la permittivité diélectrique est très peu influencée par la fréquence et semble se stabiliser sur une valeur constante. On en conclut que le phénomène de variation de la permittivité diélectrique dans le béton est, en grande partie lié à la présence d'une solution aqueuse dans les pores capillaires. En réalité, il s'agit du phénomène dispersif du béton provoqué par la présence d'eau lorsque la fréquence augmente. Ainsi, pour des bétons secs, la permittivité diélectrique relative est très peu influencée par la fréquence.

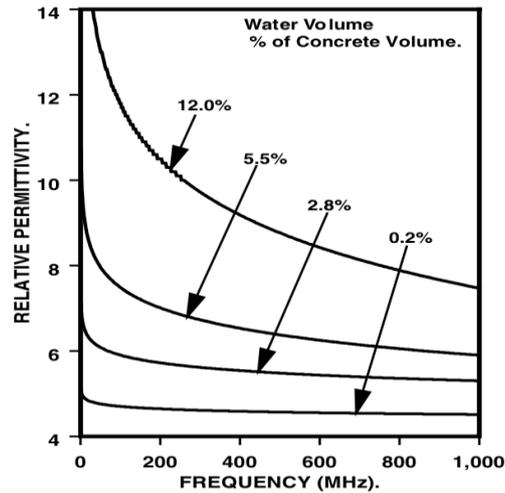


Figure II. 12 : Variation de la permittivité relative en fonction de la fréquence et de la teneur en eau [12]

II.6.2.2 Phénomènes de polarisations

Tous les matériaux, isolants ou conducteurs, sont formés par des charges positives et négatives liées entre elles par des atomes et des molécules. Pour la plupart de ces molécules, comme la molécule d'eau par exemple et en l'absence de champ électrique, leurs centres de gravité des charges positives ne coïncident pas avec celui des charges négatives. Cela a pour effet de provoquer l'apparition d'un dipôle électrique qualifié de permanent car propre au milieu considéré [11].

D'un autre côté, lorsqu'un matériau diélectrique, comme le béton par exemple, est soumis à un champ électrique externe, on observe l'apparition d'une force équivalente à celle produisant un courant dans les conducteurs. C'est cette même force qui entraîne le déplacement des centres de gravité des charges positives et négatives à l'intérieur des atomes et des molécules. Cela provoque alors l'apparition d'un autre dipôle électrique dit induit. Les dipôles induits et permanents s'orientent suivant les lignes du champ électrique qui les créent, c'est cette orientation des dipôles, suivant les lignes du champ électrique, qui provoque la polarisation électrique ou électromagnétique du milieu. Aussi, les dipôles sont caractérisés par leurs moments dipolaires dont l'amplitude est le produit de la charge, q , par la distance qui sépare les deux pôles. La densité volumique totale des moments dipolaires, observée en tout point du milieu, définit le vecteur de polarisation électrique dont la relation avec la densité de charge de polarisation est donnée par :

$$-div(\vec{P}) = \rho_p \quad (2.65)$$

Avec \vec{P} le vecteur de polarisation électrique en $[C/m^2]$ et ρ_p la densité de charge de polarisation en $[C/m^3]$.

Par conséquent, la polarisation électrique ou diélectrique est un phénomène physique que l'on observe dans un matériau diélectrique soumis à un champ électrique. Elle traduit le déplacement des charges positives et négatives conduisant le matériau au stockage de l'énergie électrique. En général, il existe quatre types de polarisations qui apparaissent lorsqu'on applique un champ électrique sur un matériau poreux. La **figure II.13**, ci-dessous illustre les différents types de polarisation en fonction de la gamme de fréquence où elles peuvent apparaître.

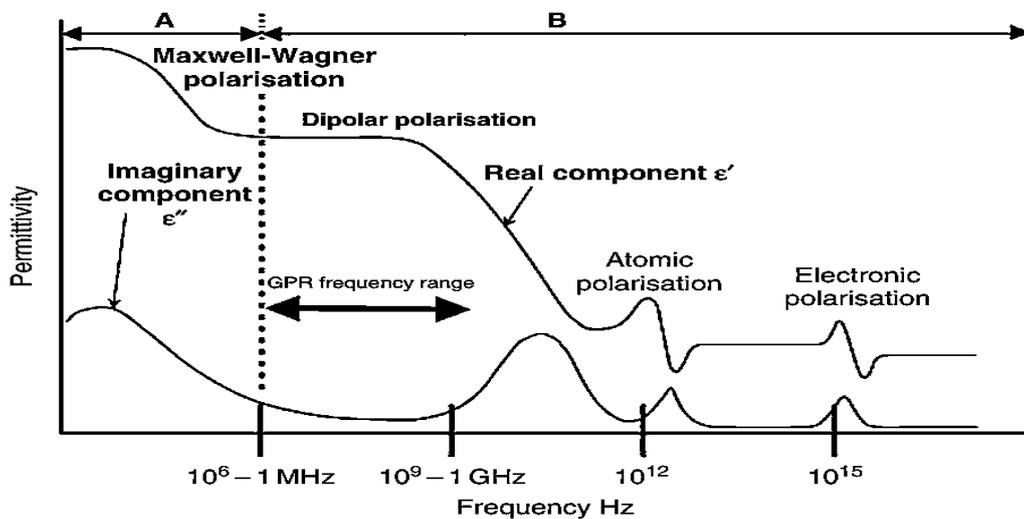


Figure II. 13 : Représentation des différents types de polarisations en fonction de la fréquence [10]

- a) **La polarisation inter-faciale**, aussi connue comme l'effet de **Maxwell-Wagner**. Elle est la conséquence de l'accumulation des charges aux interfaces. Sur la **figure II.13**, on observe que ce phénomène apparaît à basses fréquences [$< 10^8$ MHz].
- b) **La polarisation dipolaire**, aussi connue comme la polarisation d'orientation. Elle résulte de la rotation des molécules dipolaires rigides (molécule d'eau par exemple) sous l'effet d'un champ électrique externe. Sur la **figure II.13**, on observe que ce genre de polarisation apparaît dans la gamme des hautes fréquences (0,5 et 1,2 GHz) et c'est dans cette gamme de fréquence que la plupart des dispositifs radar fonctionnent, notamment les GPR utilisés pour ausculter les structures en béton.
- c) **La polarisation atomique**, ou ionique. Elle apparaît dans la gamme de l'infra-rouge. Sous l'action d'un champ électromagnétique extérieur, le centre de gravité des

électrons des atomes dans le matériau se déplace et ne coïncide plus avec celui des protons. Ce phénomène n'a aucune incidence sur les fréquences radar.

- d) *La polarisation électronique*, également sans effet car elle apparaît dans la gamme des ultra-violets comme on l'observe sur les **figure II.13** et **figure II.6**.

Aussi, à chacun de ces mécanismes de polarisations est associée une constante de temps de relaxation, c'est par exemple le temps de réponse nécessaire à l'alignement des dipôles dans le cas de la polarisation inter-faciale.

II.6.3 Permittivité diélectrique et conductivité électrique effectives

Sur la **figure II.13**, on peut observer les variations de la partie réelle et imaginaire de la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence. On observe aussi, sur la gamme des fréquences radar (de quelques MHz à 1,5 GHz), qu'il y a deux types de polarisations prédominantes, la polarisation inter-faciale (accumulation des charges aux interfaces) et la polarisation dipolaire (phénomène de rotation des molécules dipolaires sous l'application d'un champ électrique extérieur). De plus, la **figure II.13** montre que les phénomènes de polarisation provoquent des pertes qui sont maximales pour des intervalles de fréquences associés aux différents types de polarisations. La permittivité diélectrique semble donc être fortement dépendante de la fréquence. Cette dépendance de la permittivité diélectrique à la fréquence fait que les milieux diélectriques sont considérés comme étant dispersifs.

À partir de là, on considère la permittivité diélectrique et la conductivité électrique comme étant des grandeurs complexes fonction de la fréquence d'excitation, de telle sorte que leurs relations complexes sont celles données ci-dessous :

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) \quad (2.66)$$

$$\sigma(\omega) = \sigma'(\omega) - i\sigma''(\omega) \quad (2.67)$$

Mais lorsque des mesures sont faites sur un milieu diélectrique conducteur (présence d'une solution aqueuse), les paramètres mesurés sont la permittivité diélectrique effective ε_e et la conductivité électrique σ_e [8] qui prennent en compte les effets combinés de la permittivité diélectrique et de la conductivité électrique de telle sorte que :

$$\varepsilon_e = \varepsilon'_e - i\varepsilon''_e = \left(\varepsilon' - \frac{\sigma''}{\omega} \right) - i\varepsilon''_e \quad (2.68)$$

$$\sigma_e = \sigma'_e - i\sigma''_e = (\sigma' - \omega\varepsilon'') - i\sigma''_e \quad (2.69)$$

La **figure II.14** ci-dessous montre des résultats d'études qui ont été menées sur la constante diélectrique et la conductivité d'après Soutsos et al [12].

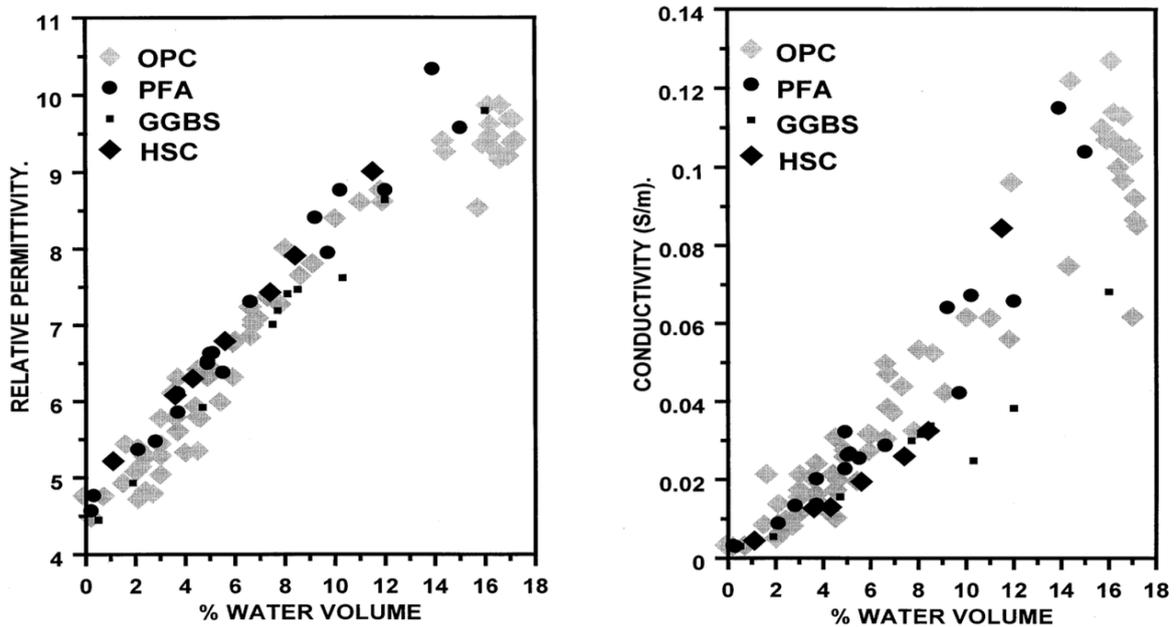


Figure II. 14 : Variations de la permittivité et de la conductivité en fonction de la teneur en eau à une fréquence de 500MHz [12]

Pour une fréquence donnée et quel que soit le type de béton étudié, la constante diélectrique et la conductivité augmentent de façons quasiment proportionnelles avec l'augmentation de la teneur en eau.

II.6.4 Perméabilité magnétique

Du fait de sa faible interaction avec les champs magnétiques, le béton est défini comme étant un matériau non magnétique. En effet, par définition, la perméabilité magnétique d'un matériau est définie comme étant l'aptitude d'un matériau à être magnétisé sous l'application d'un champ électromagnétique extérieur. Par conséquent, la perméabilité magnétique du béton est prise égale à la perméabilité de l'air :

$$\mu_b \approx \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad (2.70)$$

Avec μ_b la perméabilité magnétique du béton et μ_0 la perméabilité magnétique de l'air (étant une valeur de référence).

Néanmoins, dans certaines circonstances, l'effet magnétique des matériaux a un petit impact sur la propagation des ondes EM. C'est le cas lorsqu'on est en présence des minéraux

ferromagnétiques, comme le fer ou le nickel, qui peuvent avoir un effet considérable sur la vitesse de propagation d'une onde EM, et aussi sur son atténuation.

II.7 Le Radar GPR et ses applications usuelles en génie civil

La détérioration des structures en béton de Génie Civil et la préservation des patrimoines bâtis ont poussé les ingénieurs à s'orienter vers des nouvelles méthodes d'investigations non destructives. L'utilisation de la technique radar s'est donc avérée comme étant l'une des solutions les plus efficaces pour surveiller les ouvrages sans nécessairement les détruire. Jusqu'ici, nous avons vu les notions de bases sur la propagation d'une onde EM, ainsi que ses propriétés dans le vide et dans les milieux à faibles pertes diélectriques. On va maintenant s'intéresser, dans cette partie, aux dispositifs permettant de les propager.

II.7.1 Le radar GPR

Le terme radar signifie RADio Detection And Ranging en anglais (Détection et Télémétrie par onde Radio en français) et l'acronyme GPR signifie Ground Penetrating Radar (georadar en français). Un radar ou GPR est un dispositif capable d'émettre des ondes électromagnétiques à une fréquence donnée et d'enregistrer un ensemble de réflexions provoquées par des obstacles se trouvant dans son champ de détection. Le radar est donc l'un des dispositifs permettant de propager les ondes électromagnétiques, et cela sur une très large gamme de fréquence.

Les premières utilisations des radars dans des milieux solides ont débuté en géophysique. La gamme de fréquences utilisées était les basses fréquences car la mise en évidence des rochers sous la couche terrestre nécessitait d'investiguer des profondeurs importantes sans toutefois exiger une résolution élevée. On peut distinguer plusieurs types de radars dont quelques-uns sont cités ci-dessous :

- a) **Les radars impulsionsnels** : ils émettent un signal temporel impulsif caractérisé par un spectre de fréquence centrale f_c , avec une largeur de bande environ égale à f_c , et mesurent l'amplitude des signaux reçus en fonction du temps.
- b) **Les radars à saut de fréquence** : leurs principaux atouts sont de produire des ondes d'égale énergie sur un intervalle discret de fréquence. Ils mesurent l'amplitude reçue en fonction du décalage fréquentiel observé sur l'onde réfléchie.

- c) *Les radars FM-CW (Frequency Modulated-Continuous Wave)* : ils ont pour fonction spécifique de produire un signal dont le spectre varie dans le temps, et ainsi d'adapter de manière dynamique la résolution pour différents types de cibles à différentes profondeurs.

II.7.2 Calibration du radar GPR

Les radars GPR ont une conception assez simple, comme représenté sur la **figure II.15** ci-dessous. Le mode d'acquisition peut être en bi-statique ou mono-statique.

- i. *Le mode Bi-Statique est composé d'une antenne émettrice et d'une antenne réceptrice. On peut avoir le mode bi-statique fixe (les deux antennes sont fixées l'une à l'autre) ou dissocié (les deux antennes peuvent se déplacer l'une par rapport à l'autre).*
- ii. *Le mode Mono-Statique est employé lorsqu'une antenne est utilisée à la fois comme émetteur et récepteur.*

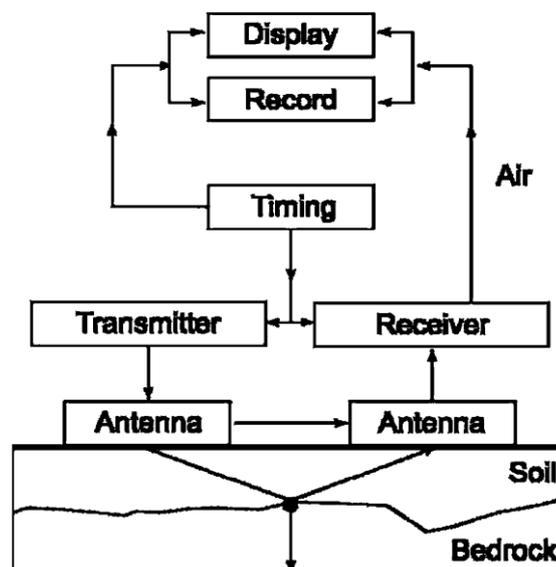


Figure II. 15 : Illustration des composants principaux d'un GPR [10]

Ces dispositifs permettent de mesurer le champ d'amplitude en fonction du temps peu après le passage d'un champ électromagnétique. Le cœur du GPR est basé sur l'unité de temps, comme schématisé sur la **figure II.15** ci-dessus, cela permet de contrôler la propagation et la détection des ondes EM. La plupart de ces appareils fonctionnent dans le domaine temporel. La caractérisation des systèmes radars GPR est une tâche complexe car il y a beaucoup de

paramètres environnementaux qui impactent les opérations et l'utilisation de ces systèmes [10].

II.7.2.1 Intervalles de temps et bande passante d'un GPR

Les GPR ont besoin systématiquement de reporter les données avec une précision de temps d'au moins 10 ps, sur une durée de temps maximale de 10 000 ns. La mesure sur bande passante est directement liée à la résolution de l'image. Cette résolution dépend de deux types de configurations de propagation de l'onde EM dans le matériau, qui sont : « l'effacement des ondes émises » et la « séparation de cible ». L'effacement des ondes émises vient de l'incapacité de l'antenne réceptrice à détecter les signaux, tant que le transmetteur n'a pas fini de transmettre l'onde électromagnétique. Habituellement, le transmetteur émet un très large signal. Et si le récepteur est à proximité de l'émetteur (comme c'est habituellement le cas pour le GPR), alors l'antenne réceptrice captera cette forte amplitude du signal direct. Si ce dernier est suffisamment large, l'antenne réceptrice sera surchargée et ne sera pas capable de détecter les ondes réfléchies. La durée de temps d'impulsion transmise varie de façon inversement proportionnelle avec la bande passante. La longueur de résolution Δr impose une limite à la bande passante suivant la relation ci-dessous :

$$B \geq \frac{C_v}{4\Delta r} \quad (2.71)$$

Avec B la bande passante en [dB], C_v la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans le matériau en [m.s⁻¹] et Δr la longueur de résolution en [m].

II.7.2.2 Résolutions et zone d'influence

La résolution d'un GPR est fonction de deux paramètres, qui sont définis comme étant la longueur de résolution longitudinale (il s'agit de la portée ou la profondeur) et la longueur de résolution latérale (il s'agit de la longueur du déplacement latérale, c'est à dire, la longueur de l'arc de cercle qui représente la distance entre le transmetteur et récepteur), comme représenté sur la **figure II.16** ci-dessous.

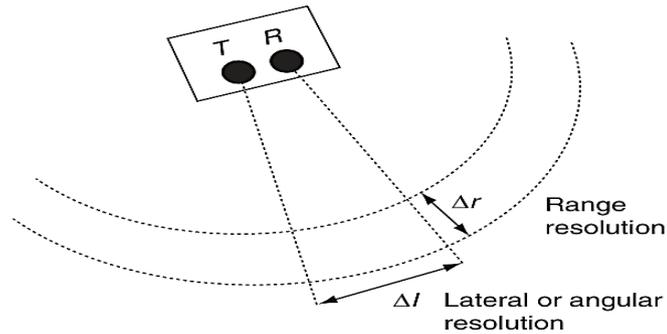


Figure II. 16 : Résolution longitudinale et latérale d'un GPR [10]

La résolution est un concept fondamental commun pour les méthodes de détections. La relation de la longueur de résolution longitudinale est donnée par :

$$\Delta r \geq \frac{W \cdot C_v}{4} \quad (2.72)$$

W étant la demi-largeur du pulse temporel, voir **figure II.17** ci-dessous. Pour un GPR, cette demi-largeur est donnée par la relation suivante :

$$W = \frac{1}{B} = \frac{1}{f_c} \quad (2.73)$$

Avec f_c la fréquence de résonance.

En réalité, la largeur du pulse ainsi que sa vitesse dans le matériau influent énormément sur la longueur de résolution. Dans une configuration parfaite, la longueur de résolution longitudinale serait indépendante de la distance à la source. Mais en pratique et lorsqu'on est dans une configuration de longues distances (en basses fréquences généralement), la dispersion de l'onde EM et ainsi que son atténuation affectent énormément la résolution longitudinale [10]. Par ailleurs, concernant la longueur de résolution latérale, on admet la condition suivante :

$$\Delta l \geq \sqrt{\frac{W \cdot r \cdot C_v}{2}} \quad (2.74)$$

Avec r la distance de la cible.

La résolution latérale dépend de la vitesse, de la largeur du pulse et ainsi que de la distance à l'appareil. Plus grande est cette distance, meilleure est la largeur de résolution latérale, (cf. **figure II.16**).

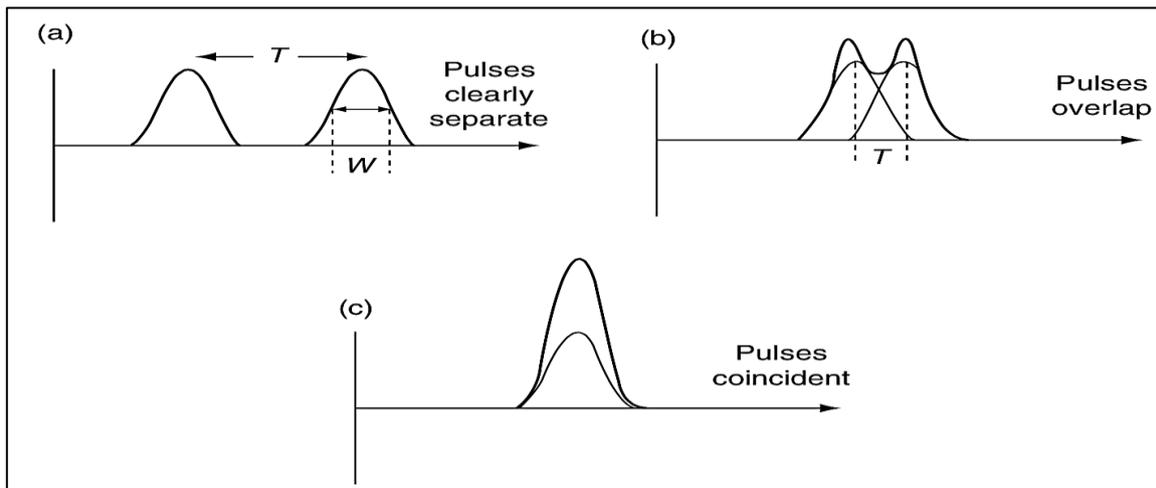


Figure II. 17 : Demi-largeur, W , pour différents types de pulsions temporelles [10]

En (a), lorsque la période $T \gg W$, les pulses sont clairement séparées. En (b), les deux pulses sont distinguables et cela jusqu'à ce que $T \approx W$. Et en (c), lorsque la période $T \ll W$, on peut difficilement distinguer deux évènements, c'est à dire, deux pulses.

II.7.3 Les dispositifs de rayonnement d'une onde électromagnétique

II.7.3.1 Systèmes de rayonnement

Sur les systèmes radars, le rôle de l'émetteur est de transformer l'énergie électrique en énergie électromagnétique rayonnée dans l'espace étudié. Pour cela, on règle l'appareil sur une fréquence donnée et on applique, sur des charges électriques mobiles, un champ électrique variable. Cela a pour effet de provoquer une accélération des particules mobiles de l'émetteur, qui vont par la suite provoquer un rayonnement magnétique. Les charges électriques mobiles se trouvent généralement sur la partie métallique des antennes radar et sont généralement des électrons de conduction.

Il faut comprendre ici qu'en mode bi-statique fixe, les parties métalliques représentant l'émetteur et le récepteur se trouvent toutes deux dans le même boîtier (l'antenne). La **figure II.18** ci-dessous illustre le principe de rayonnements, a) et b) représentant soit un élément de rayonnement pour l'émetteur (Tx), soit un élément de réception pour le récepteur (Rx).

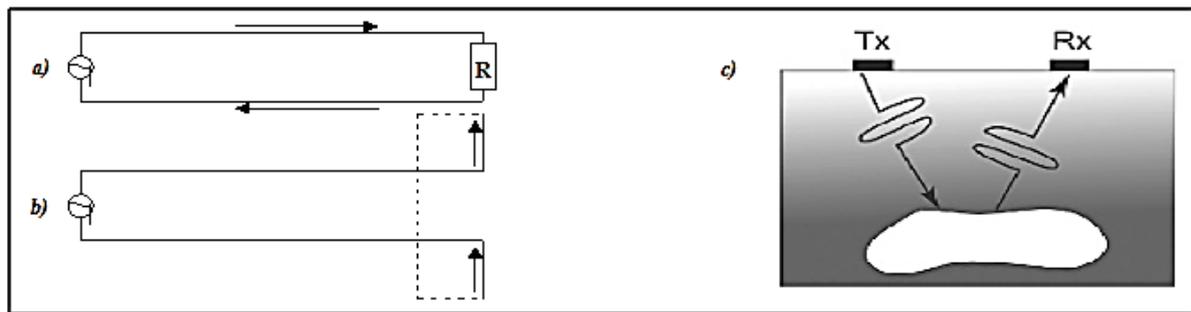


Figure II. 18 : Principe de rayonnement d'une onde EM

En (a), les charges mobiles sont soumises à un champ électrique variable mais comme elles se déplacent dans des sens opposés le champ magnétique s'annule, nous avons donc une absence de rayonnement. En (b) cette fois ci les charges mobiles se déplacent dans le même sens que le champ électrique, nous avons une absence d'opposition de sens, ce qui provoque l'apparition d'un rayonnement magnétique. En (c) est représenté une onde électromagnétique incidente émise par l'émetteur « Tx » se réfléchit sur un obstacle avant d'être enregistrée par le récepteur « Rx ».

Contrairement à l'émetteur (Tx), le récepteur (Rx) utilise le principe inverse de rayonnement. En effet, le champ électromagnétique provoqué par l'émetteur agit sur les charges mobiles du récepteur en les soumettant à des accélérations variables. Si, sur le récepteur, on se retrouve dans la configuration (b), c'est à dire, si les déplacements des charges mobiles du récepteur sont dans le même sens (c'est toujours le cas), alors il apparaît un courant électrique. Par conséquent, la conversion de l'énergie EM en énergie électrique a lieu. On peut alors dire que les principes d'émission et de réception sont identiques, et l'utilisation de deux antennes semblables permet la transmission à distance de l'énergie électrique, sans pour autant avoir besoin d'un support matériel. En réalité, les antennes radar se comportent comme des dipôles électriques et un grand nombre d'entre elles reposent sur le principe du rayonnement dipolaire. La polarisation des charges mobiles sous l'effet d'un champ électrique variable provoque un rayonnement EM.

II.7.3.2 Cas des antennes GPR

Comme tous les autres types d'antennes radar, les antennes GPR émettent et détectent les ondes électromagnétiques. Comme expliqué juste avant, l'émetteur doit convertir l'énergie électrique en une distribution de champs détectables dans le temps et dans l'espace. Le récepteur doit être capable de détecter la variation temporelle d'un composant vectoriel issu d'un champ électromagnétique et de convertir cette variation en un signal enregistrable [10].

La **figure II.19** schématise la propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu à faible constante diélectrique :

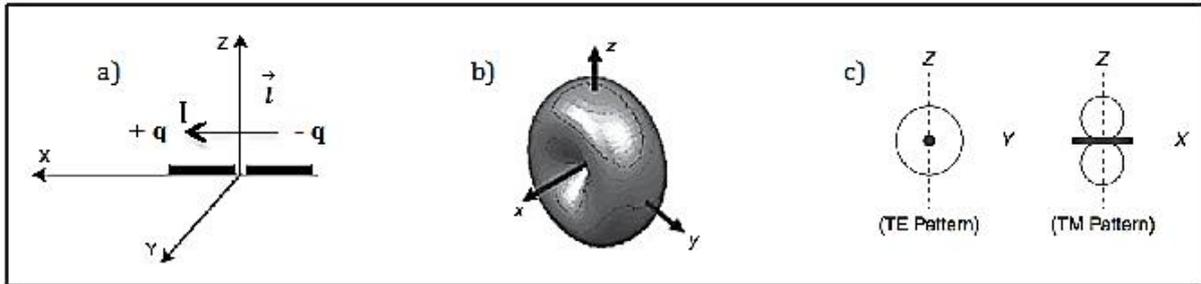


Figure II. 19 : Schématisation de la propagation d'une onde EM rayonnée à partir d'un dipôle [10]

Comme on l'a vu au paragraphe (§II.4.1), le champ électromagnétique est la combinaison d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Prenons le plan (x,y,z) tel que définie ci-dessus, le plan (x,y) représente le sol sur lequel le dipôle électrique (émetteur) est posé en (a), **figure II.19**. Le dipôle électrique est constitué d'une paire de charges opposées $+q$ et $-q$ distantes de l et de moment dipolaire $\vec{p} = q\vec{l}$ (le vecteur \vec{l} est dirigé de $-q$ vers $+q$). I est le courant électrique qui apparaît lorsqu'on impose une accélération aux charges mobiles sous l'effet d'un champ électrique variable.

Il apparaît alors une onde électromagnétique qui prend la forme d'un tore, qui se propage dans toutes les directions, comme représenté en (b). Les champs électrique et magnétique qui constituent cette EM s'orientent, respectivement, selon un plan électrique TE (y,z) (ou plan E) et un plan magnétique TM (x,z) (ou plan H) comme illustré en (c). La forme de propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu diélectrique est influencée par les types d'antennes utilisées, **figure II.20**. En effet, selon les objectifs à atteindre, on peut avoir à choisir entre les antennes radar adaptées à l'air (a), ou bien couplées au matériau (b).

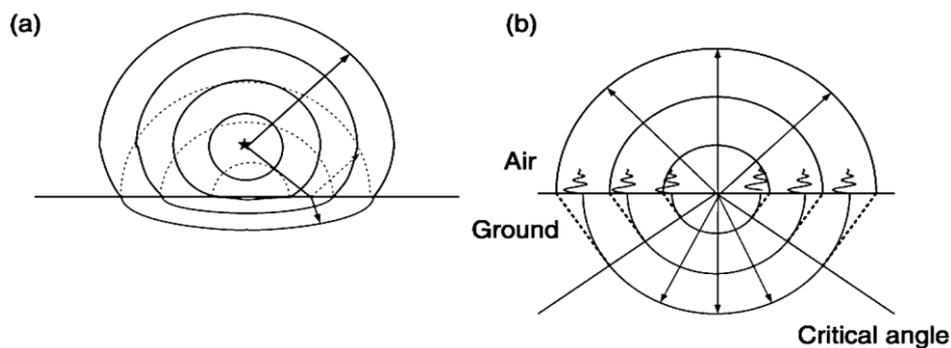


Figure II. 20 : Rayonnement d'une antenne adaptée à l'air (a) et d'une antenne couplée au matériau (b)

[10]

La **figure II.20** montre que si on est dans une configuration où l'antenne est adaptée à l'air (a) et si l'antenne émettrice est assez éloignée du sol, on obtient une propagation d'ondes planes lorsque celles-ci rentrent en contact avec la matière, l'interface Air/Sol. En effet, l'angle critique qui provoque une transmission (ou réfraction) de l'onde EM sur l'interface Air/Sol est presque à la verticale. D'un autre côté, lorsqu'on est dans une configuration où l'antenne est couplée au matériau (b), la pénétration des ondes EM dans le sol adopte une forme sphérique comme les ondes qui se propagent dans l'air. Toutefois le couplage dans l'air présente un inconvénient majeur de celui de la perte importante d'énergie qui limite les profondeurs d'investigation. Pour cette raison les antennes couplées au matériau sont plus largement utilisées pour l'auscultation des structures en béton.

II.7.3.3 Champ proche et champ lointain

Lors du rayonnement de l'antenne émettrice, l'espace autour duquel l'émetteur rayonne se décompose en trois zones (cf. **figure II.21**).

Soit D le diamètre de l'émetteur et r la distance du point à la source.

- Lorsque $r < \frac{D^2}{2\lambda}$, on est dans la zone de champ proche ou zone de Rayleigh. Sur cette zone un échange d'énergie réactive se fait entre l'antenne et le milieu extérieur sans propagation de l'onde électromagnétique. La densité de puissance est quasi-constante.
- Lorsque on est entre $\frac{D^2}{2\lambda} < r < \frac{2D^2}{\lambda}$, on se retrouve dans la zone de Fresnel. La densité de puissance est fluctuante et l'on suppose qu'il y a propagation de l'onde électromagnétique.
- Et enfin, lorsque $r > \frac{2D^2}{\lambda}$, on se retrouve dans la zone de champ lointain ou zone de Fraunhofer. On observe une propagation de l'onde électromagnétique et la densité de puissance diminue de façon inversement proportionnelle au rayon de l'onde EM.

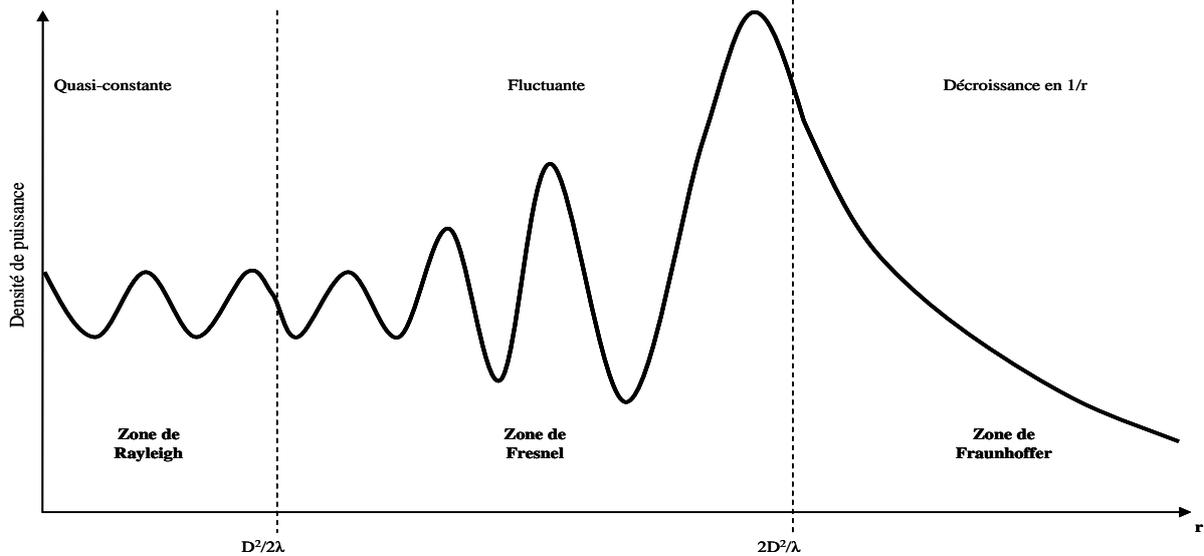


Figure II. 21 : Représentation des trois zones de rayonnements d'une onde EM [5]

II.7.3.4 Diagrammes de rayonnement des antennes GPR couplées

La **figure II.22** représente les différents diagrammes (ou lobes) de rayonnement de l'émetteur en fonction de la permittivité diélectrique relative du milieu. Cette figure montre, entre autres, que le diagramme de rayonnement d'une onde EM diminue avec l'augmentation de la permittivité diélectrique du milieu de propagation (dans notre cas le béton).

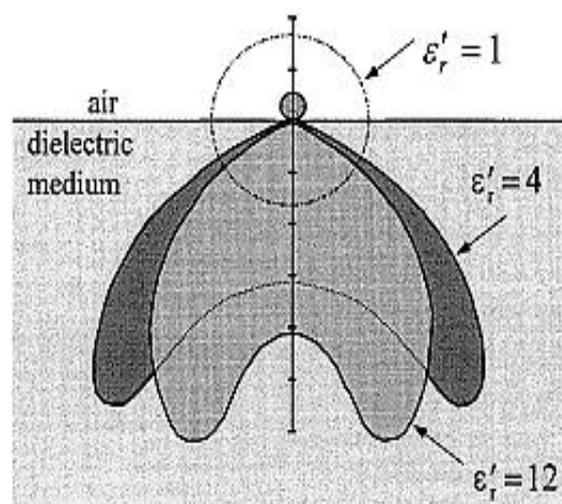


Figure II. 22 : Diagrammes de rayonnement : béton saturé ($\epsilon'_r=12$) ou béton sec ($\epsilon'_r=4$) [10]

En effet, lorsque le béton est humide, ce qui correspond à une permittivité diélectrique égale à 12 sur la **figure II.22**, le lobe de rayonnement est beaucoup plus resserré (cf. **figure II.23 b**). Cela conduit alors à une très forte atténuation de l'énergie EM rayonnée.

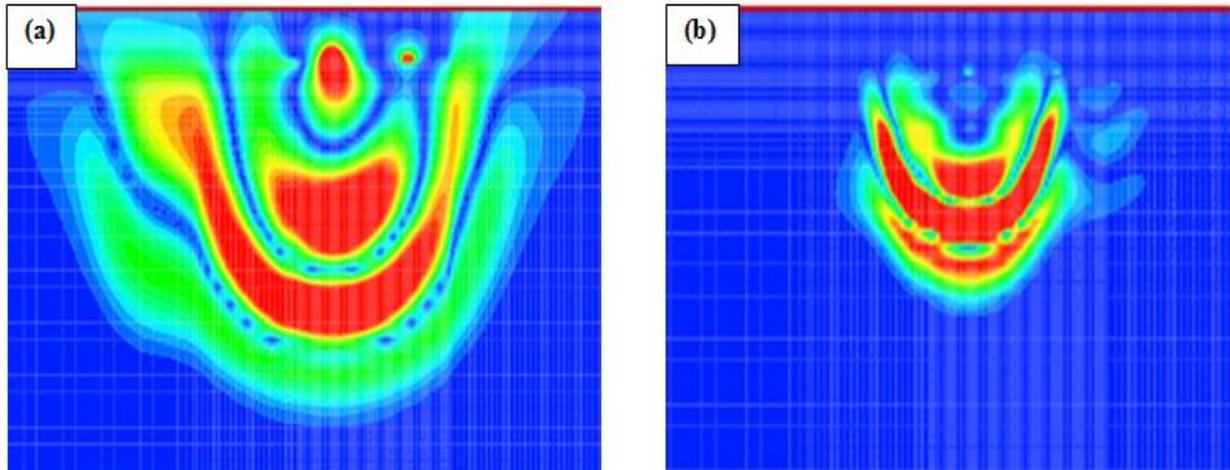


Figure II. 23 : Exemple de front d'onde pour deux milieux de constante diélectrique de 9 en (a) et de 80 en (b) [11]

Cependant, lorsque le béton est sec, c'est-à-dire lorsque la permittivité diélectrique du béton est égale à 4, le lobe de rayonnement est beaucoup plus large (cf. **figure II.23 a**). Ces phénomènes permettent non seulement de mettre en évidence deux phénomènes d'absorption de l'énergie EM rayonnée par le milieu de propagation mais permet également de montrer le couplage avec l'atténuation géométrique. Par conséquent, plus la permittivité diélectrique du milieu augmente et plus le lobe de rayonnement de l'onde EM se resserre.

Par ailleurs, on peut observer des lignes des champs EM au-dessus de la ligne horizontale (normalement dans l'air) (cf. **figure II.22**). Pour éviter ce genre de phénomène, les antennes radars sont équipées d'un blindage en partie supérieure qui réduit cette propagation du champ électromagnétique au-dessus de l'antenne.

II.7.4 Les applications usuelles en Génie Civil

La **figure II.24** représente le principe d'acquisition d'un GPR. Comme représentée sur cette figure, l'émetteur (T) rayonne de l'énergie électromagnétique qui se propage à l'intérieur de l'échantillon en béton, l'onde EM rayonnée se réfléchit sur plusieurs obstacles, notamment sur la barre d'acier et sur les bords de l'échantillon de béton. Le récepteur (R) enregistre alors une première source de signal nommée onde directe (direct wave), puis les multiples ondes réfléchies arrivent juste ensuite. Dans la plupart des cas, l'onde directe arrive plus tôt que l'onde réfléchi (cf. **figure II.26**). Mais il est assez fréquent d'avoir de fortes reconstructions entre l'onde directes et l'onde réfléchi sur le premier lit d'acier en particulier si celui-ci est très proche de la surface.

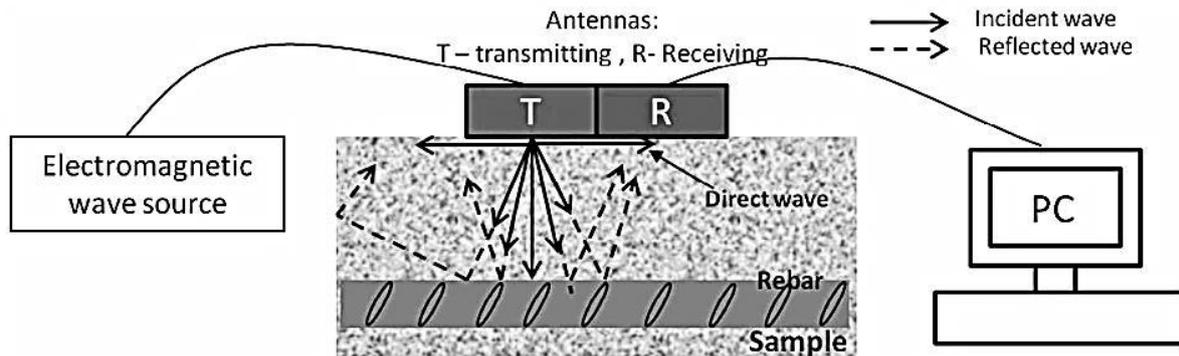


Figure II. 24 : Illustration du principe d'acquisition d'un GPR en Génie Civil [14]

La **figure II.25** montre les différents types de scans générés lors de la prise des mesures radar. En effet, le GPR va générer et afficher plusieurs représentations des signaux enregistrés. L'affichage en A-scan correspond à un signal enregistré par le récepteur pour une seule position d'émetteur-récepteur. L'affichage en B-scan est la représentation de plusieurs A-scan en continu et enregistrés sur différents points de mesures le long d'un linéaire (profil). Le B-scan, également appelé coupe-temps, représente une vision en deux dimensions de la structure à la verticale du profil de mesure. Enfin, le C-scan est la juxtaposition de plusieurs B-scan. Par conséquent, les traitements réalisés sur le A-scan auront des répercussions sur le B-scan et le C-scan.

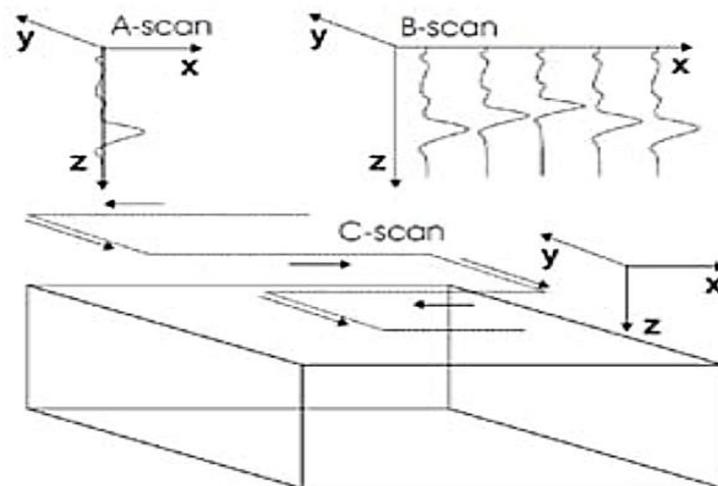


Figure II. 25 : Les différents types d'affichages, A-scan, B-scan et C-scan [15]

La **figure II.26** ci-dessous montre un exemple d'affichage de signaux sur l'écran de l'unité centrale du GPR en B-scan, à gauche, et en A-scan, à droite, lors de l'acquisition de mesures.

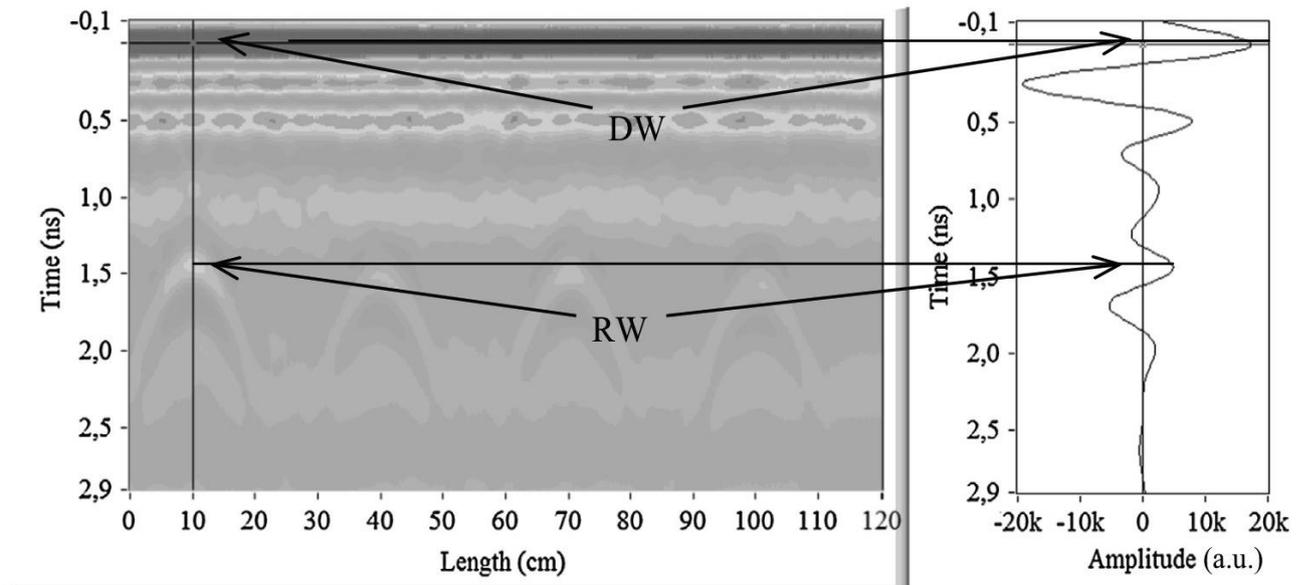


Figure II. 26 : B-scan (gauche) et A-scan (droite) enregistrés sur un élément en béton [16]

Sur cette **figure II.26**, la surface de la dalle en béton (Air/Béton) est représentée par le premier pic de l'onde directe (DW) et les sommets des aciers (Béton/Aciers) sont représentés par le premier pic de l'onde réfléchie (RW). Les formes hyperboliques observées à l'écran sont les signatures caractéristiques de réflecteurs, des armatures dans le cas présent. Le sommet de l'hyperbole permet de repérer la position de l'axe de l'armature. L'analyse de la polarité des ondes réfléchies permet de donner une idée sur la nature du réflecteur (acier ou air par exemple, cf. **figure II.27**).

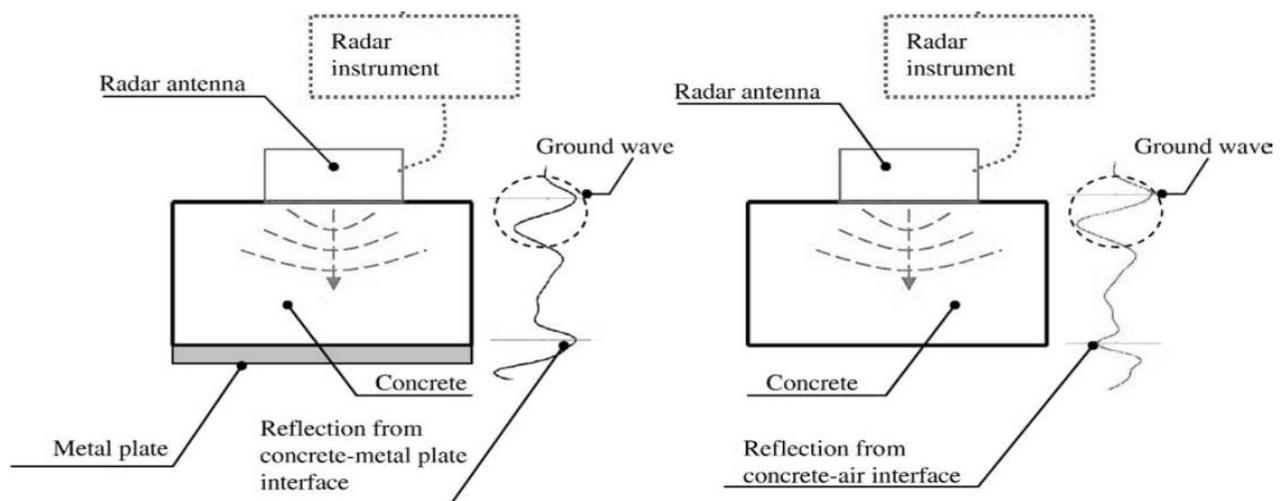


Figure II. 27 : Détections des interfaces béton-air et béton-plaque d'acier en A-scan [17]

II.8 Utilisation des ondes EM pour la caractérisation d'un béton contaminé ou sain

Comme on l'a vu un peu plus tôt, aux paragraphes (§II.1) et (§II.2), l'eau est un élément favorable au développement de la plupart des pathologies observées sur les ouvrages en béton. En effet, nous avons vu qu'elle permet de transporter la plupart des agents chimiques extérieurs, notamment les ions chlorures, jusqu'au cœur du béton. Il s'agit donc ici d'un élément susceptible de modifier le comportement EM des bétons. De ce fait, l'eau présente un intérêt majeur pour la détection des ions chlorure présent dans la solution interstitielle du béton. Dans cette section nous verrons donc dans un première temps la sensibilité des ondes EM vis-à-vis de la présence d'eau et des ions chlorure. Puis dans un second temps, nous présenterons quelques résultats des travaux menés pour l'étude du comportement des ondes EM en présence d'eau et des ions chlorure. Á noter que jusqu'à présent peu de travaux ont été menés dans cette voie.

II.8.1 Sensibilité des ondes EM en présence d'eau et des ions chlorures

L'eau est l'élément aqueux le plus souvent présent dans les pores capillaires du béton sous différents états physiques (solide, liquide ou gazeuse) selon les conditions environnementales extérieures. Elle possède une très forte constante diélectrique relative (cf. **tableau II.3**), ε'_r , qui peut varier énormément selon son état physique, la température, la concentration en ions présent dans la solution interstitielle, ou bien encore selon la fréquence centrale des antennes radar.

Sont présentées ci-dessous les relations énoncées par Debye [20] permettant de décrire la permittivité complexe en fonction de la fréquence et de la teneur en salinité d'une eau saline.

$$\varepsilon'_r = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_{Stat} - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.75)$$

$$\varepsilon''_r = \frac{\omega \tau (\varepsilon_{Stat} - \varepsilon_\infty)}{1 + \omega^2 \tau^2} + \frac{\sigma(0)}{\omega \varepsilon_0} \quad (2.76)$$

Avec ε'_r la constante diélectrique relative d'une eau saline, ε''_r le facteur de perte relative d'une eau saline, ε_{Stat} la constante diélectrique statique de l'eau saline, ε_∞ la constante diélectrique à une fréquence très élevée, $\sigma(0)$ la conductivité de l'eau à fréquence nulle et τ temps de relaxation de l'eau.

Les **figure II.28** et **figure II.29** ci-dessous nous montrent respectivement la variation de la constante diélectrique et le facteur de perte de l'eau en fonction de la fréquence et de la salinité à 20°C.

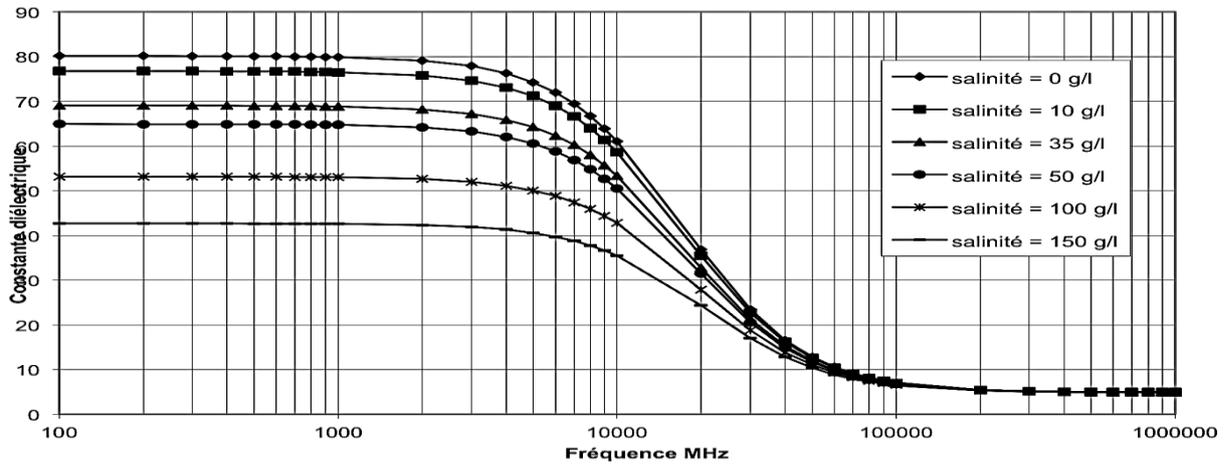


Figure II. 28 : Variation de la constante diélectrique de l'eau en fonction de la fréquence et de la salinité à 20°C [20]

Sur la **figure II.28**, la constante diélectrique relative de l'eau diminue progressivement avec l'augmentation de la concentration en NaCl (salinité). De plus pour une salinité donnée, on observe trois grandes zones de transitions lorsque la fréquence augmente. Dans la première zone, comprise entre 100 MHz et 2 GHz, la constante diélectrique varie très peu. Dans la deuxième zone, comprise entre 2 GHz et 100 GHz, on voit que la constante diélectrique varie très rapidement. Et enfin, sur la dernière zone de transition, c'est-à-dire au-delà de 100 GHz, la constante diélectrique semble tendre vers une asymptote.

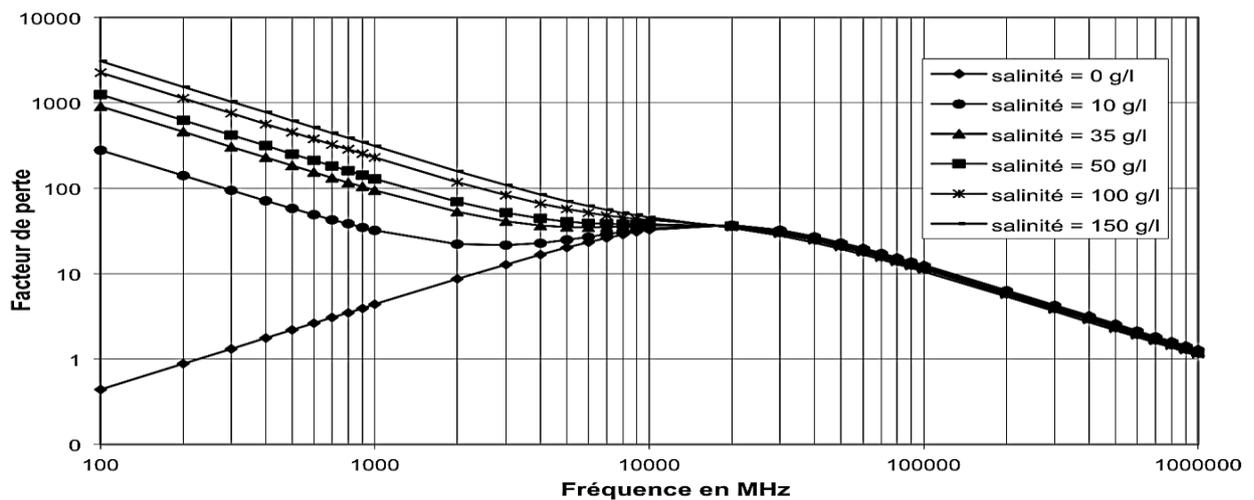


Figure II. 29 : Variation du facteur de pertes de l'eau en fonction de la fréquence et de la salinité pour 20°C [20]

En parallèle, la **figure II.29** montre que, contrairement à la constante diélectrique, le facteur de perte d'une eau saline augmente avec l'augmentation de la concentration en NaCl mais, contrairement à une eau non contaminée, ce facteur de pertes diminue brusquement avec l'augmentation de la fréquence. Néanmoins, on observe que pour chaque solution saline, les facteurs de pertes semblent converger vers une même valeur commune située autour de 20 GHz, au-delà, le facteur de pertes dépend uniquement de la fréquence. En réalité, cette fréquence correspond à la fréquence de relaxation d'orientation f_0 de l'eau, au-delà de laquelle la concentration en NaCl n'est plus un facteur déterminant.

De plus, on sait que la fréquence de relaxation d'orientation f_0 de l'eau dépend :

- De l'état physique de l'eau (l'eau gelée relaxe à des fréquences plus basses que l'eau liquide) ;
- De la présence des matériaux absorbants, qui font que la relaxation de l'eau se fait à des fréquences plus basses.

De façon générale, plus l'élément est condensé structurellement et plus sa fréquence de relaxation est basse. On pourrait donc en conclure, d'après ces figures, qu'il est plus facile de détecter les phénomènes de dispersion provoqués par la présence d'eau en basses fréquences qu'en hautes fréquences. Bien qu'en basses fréquences, la permittivité diélectrique de l'eau dépend fortement de la concentration en NaCl. Néanmoins, les **figure II.30** et **figure II.31** montrent que la permittivité diélectrique de l'eau varie également avec la variation de la température.

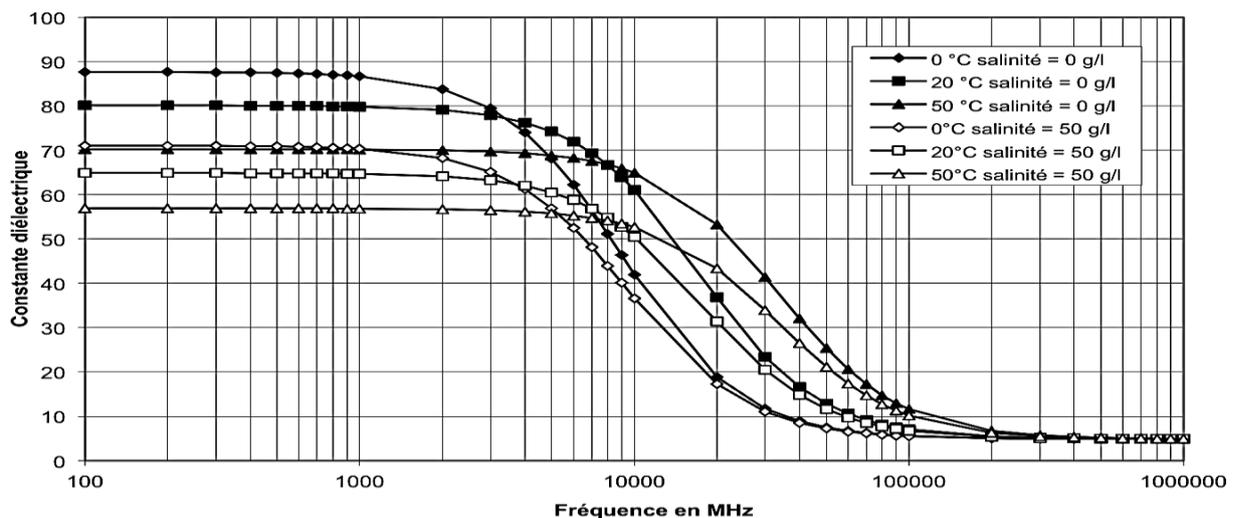


Figure II. 30 : Influence de la température sur la constante diélectrique de l'eau [20]

On observe sur la **figure II.30** que non seulement la constante diélectrique de l'eau diminue avec l'augmentation de la concentration en NaCl mais aussi, à concentrations égales en NaCl, elle diminue avec l'augmentation de la température.

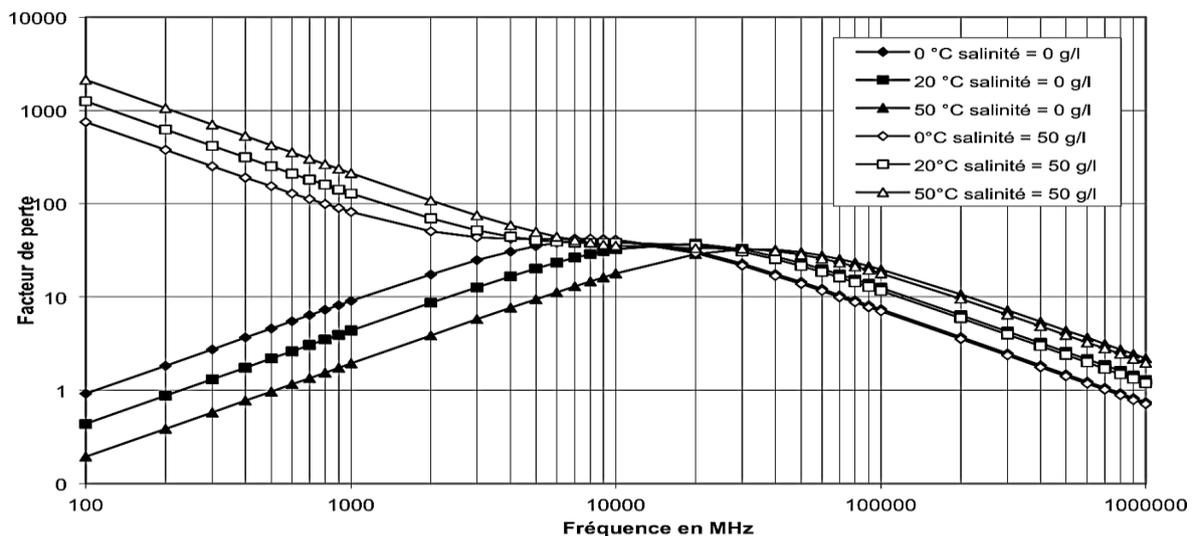


Figure II. 31 : Influence de la température sur le facteur de pertes de l'eau [20]

D'un autre côté, sur la **figure II.31**, on observe le même phénomène que sur la **figure II.29**, à savoir une augmentation du facteur de perte avec l'augmentation de la concentration en ions NaCl. Mais pour une même concentration en ions NaCl, le facteur de perte augmente avec l'augmentation de la température. De plus, la fréquence de relaxation d'orientation f_0 se décale un peu plus avec l'augmentation de la température.

II.8.2 Propagation des ondes EM dans le béton

Nous avons vu que les ondes EM sont beaucoup plus sensibles à la présence des ions chlorure en basses fréquences qu'en hautes fréquences. Cependant, pour une fréquence donnée, l'augmentation de la teneur en chlorure dans les pores capillaires du béton a pour effet d'augmenter à la fois l'atténuation du signal EM et la conductivité du béton [13, 16, 18]. Cela conduit alors à une augmentation du facteur de pertes (partie imaginaire de la permittivité complexe). La partie réelle de la permittivité complexe du béton (constante diélectrique) étant influencée par la teneur en eau. Néanmoins, jusqu'à présent seulement quelques travaux de recherches ont été menés pour évaluer la sensibilité des ondes EM en présence des ions chlorure.

En effet, dans leurs travaux de recherches, Sbartaï et al [18] ont montré que l'atténuation du signal électromagnétique augmente avec l'augmentation de la teneur en chlorures (cf. **figure**

II.32 et figure II.33). La figure II.32 et la figure II.33 représentent, respectivement, la variation de l'onde directe (Sd) et de l'onde réfléchi (Sr) en fonction de la teneur en chlorure.

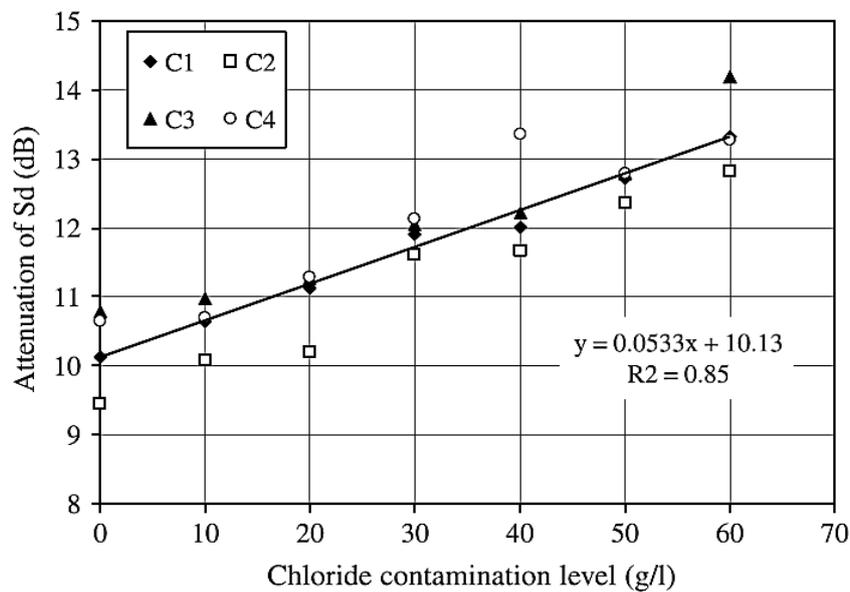


Figure II. 32 : Variation de l'atténuation du signal direct (Sd) en fonction de la teneur en chlorure [18]

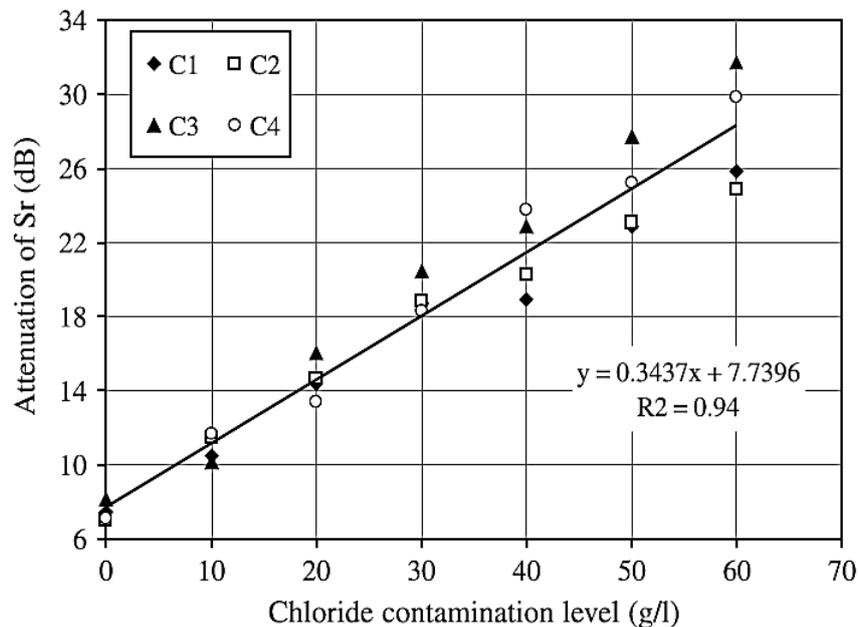


Figure II. 33 : Variation de l'atténuation du signal réfléchi (Sr) en fonction de la teneur en chlorure [18]

Cependant, on observe que l'atténuation du signal réfléchi est beaucoup plus forte pour des teneurs en chlorure élevées.

Hong et al [16] montrent qu'en présence des chlorures, une diminution d'amplitude des ondes directes et réfléchies est observée. L'augmentation de la teneur en chlorure provoque une

augmentation de la conductivité du béton, ce qui entraîne une augmentation de l'atténuation du signal EM. D'autre part, Tsui et al. [19] expliquent que la vitesse de propagation pour un béton contaminé en chlorure est généralement constante au-dessus des 500 MHz mais varie significativement lorsque la teneur en chlorures est extrêmement élevée.

II.9 Conclusion

Nous avons vu au cours de ce chapitre que les échanges qui se font entre les ouvrages en bétons et leur environnement conduisent à des détériorations plus ou moins irréversibles sur celles-ci (cas des cycles de gel-dégel). De plus, ces détériorations peuvent être fortement sollicitées lorsque les structures en béton se trouvent dans un environnement à forte concentration d'agents chimiques agressifs qui peuvent être présents de façon naturelle (carbonatation, milieux marins, eaux acides ...), ou peuvent être apporté par l'homme (sel de déverglaçage). Néanmoins, le mécanisme de détérioration du béton n'est possible que s'il est saturé en eau et, dans certains cas, avec des conditions d'humidités relatives optimales.

Par ailleurs, nous avons vu que la corrosion des aciers du béton est essentiellement provoquée par la pénétration et la présence des chlorures libres dans les pores capillaires du béton. Toutefois, les ions chlorures sont transporter par l'eau jusqu'au cœur du béton soit par capillarité, ou soit par des phénomènes de diffusions. La présence de l'eau libre présente dans les pores capillaires, constitue donc un paramètre commun, déclencheur, à toutes ces pathologies. Il est donc important d'évaluer et d'estimer la variation de ses deux facteurs clés (l'eau et les ions chlorures).

D'un autre côté, nous avons vu que la méthode GPR permet de mener des investigations non destructives sur la plupart des structures en béton de Génie Civil. Elle permet de distinguer et détecter les désordres qui apparaissent sur certaines parties des ouvrages en béton. À ce jour, la méthode GPR semble se distinguer des autres en termes d'évaluation et de détection de la teneur en eau et de la teneur en chlorure. De plus, la méthode GPR présente des nombreux avantages qui sont, une simplicité et une rapidité de mise en place, une aptitude à ausculter des grandes surfaces, ou à mener une auscultation sans perturber le trafic routier par exemple. Les systèmes usuels ont également l'avantage d'être portatifs, légers et peu encombrants. L'utilisation des techniques GPR, comme moyen d'investigation, est donc un excellent choix car la propagation des ondes EM mobilise la plupart des caractéristiques EM du béton.

Enfin, nous avons vu que le béton était un matériau très hétérogène et complexe. En effet, selon son degré de saturation, sa permittivité diélectrique influence énormément les conditions de propagation des ondes EM. La constante diélectrique du béton peut, entre

autres, varier fortement en fonction du degré de saturation. De plus, la présence d'eau libre et des ions chlorures dans les pores capillaires du béton augmente le facteur de perte et la conductivité, et atténue fortement les ondes EM. Aussi, nous avons vu que la sensibilité des ondes radars en présence des ions chlorures dans la solution interstitielle du béton est plus élevée dans les basses fréquences qu'en hautes fréquences.

II.10 Références

- [4] IQOA 1997. “Pathologies”.
- [5] Sbartai, Z.M. (2005). “Caractérisation physique des bétons par Radar - approche neuromimétique de l'inverse”. *Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Université de Sherbrooke, LMDC – GRAI*.
- [6] Pigeon, M. (1989). “La durabilité au gel du béton”. *Materials and structures*, 22, 3-14.
- [7] Duval R, Hornain H (1992). “La durabilité du béton vis-à-vis des eaux agressives”. *La durabilité du béton, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées : p. 351-391*.
- [8] Ground Penetrating Radar – 2nd Edition, Chapter 4 “Properties of materials”. *Edited by David J. Daniels*. Pages 73 – 129;
- [9] A.V. Wielen. (2014). “Characterization of thin layers into concrete with Ground Penetrating Radar”. *Thèse de doctorat, University of Liege –Faculty of Applied Sciences. Department of Architectural, Geological, Environmental and Civil Engineering – GeMME Research Group*;
- [10] A.P. Annan. (2009). Ground Penetrating Radar – Theory and application, Chapter 1 “Electromagnetic principles of Ground Penetrating Radar”. *Edited by M. J. Harry. Elsevier Science* ;
- [11] K. Gilles. (2004). “Caractérisation du béton d'enrobage par technique radar : exploitation de l'onde direct émetteur - récepteur”. *Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, LMDC. Décembre 2004* ;
- [12] M.N. Soutsos, J.H. Bungey, S.G. Millard, M.R. Shaw, A. Patterson. (2001). “Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing”, *NDT & E International*, Volume 34, Pages 419–425;
- [13] A. Kalogeropoulos, J. Kruk, J. Hugenschmidt, J. Bikowski, E. Brühwiler. (2013). “Full-waveform GPR inversion to assess chloride gradients in concrete”. *NDT & E International*. Volume 57, Pages 74 – 84 ;
- [14] M. Torres-Luque, E. Bastidas-Arteaga, F. Schoefs, M. Sánchez-Silva, J.F. Osmá. (2014). “Non-destructive methods for measuring chloride ingress into concrete : State-of-the-art and future challenges”. *Construction and Building Materials*. Volume 68, Pages 68 – 81 ;
- [15] H. Rani. (2011). “Reconnaissance géométrique des structures en maçonnerie ou en béton par imagerie radar multi récepteurs : approche numérique et expérimentale”. *Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Université de Sherbrooke, LMDC – GRAI* ;
- [16] S. Hong, W. W-L. Lai, G. Wilsch, R. Helmerich, R. Helmerich, T. Günther, H. Wiggenhauser. (2014). “Periodic mapping of reinforcement corrosion in intrusive chloride contaminated concrete with GPR”. *Construction and Building Materials*. Volume 66, Pages

671 – 684;

[17] W.L. Lai, S.C. Kou, W.F. Tsang, C.S. Poon. (2009). “Characterization of concrete properties from dielectric properties using ground penetrating radar”. *Cement and Concrete Research*. Volume 39, Pages 687 – 695;

[18] Z.M. Sbartai, S. Laurens, J.-P. Balayssac, G. Arliguie, G. Ballivy. (2006). “Ability of the direct wave of radar ground-coupled antenna for NDT of concrete structures”. *NDT & E International*. Volume 39, Pages 400 – 407 ;

[19] F. Tsui, S. L. Matthews. (1997). “Analytical modeling of the dielectric properties of concrete for subsurface radar applications”. *Construction and Building Materials*. Volume 11, No. 3, Pages 149 – 161;

[20] P. Debye. (1929). “Polar molecules”. *Chemical Catalogue Company* ;

[21] E. Carola, T. J. Marianne. (2000). “Chloride migration coefficients from Non-Steady-State migration experiments at Environment-Friendly “Green” concrete”. *Testing and Modeling the Chloride Ingress into Concrete*. PRO 19, Pages 203 – 209;

[22] F. Raoul, F. Olivier, S. C. Sabine, B. B. Véronique, L. Patrick. (2011). “Mesure du coefficient de diffusion des chlorures : comparaison entre régime permanent et régime transitoire”. *Revue Française de Génie Civil*, Pages 309 – 329 ;

[23] R. B. Polder. (2001). “Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC-154 technical recommendation”. *Construction and Building Materials*. Volume 15, Pages 125 – 131.

Chapitre III

Procédures expérimentales

III Etudes expérimentales : Procédures techniques.

III.1 Matériaux et préparations

Tableau III. 1 : Formulation du béton pour 1m³.

Composants	kg/m ³
Ciment portland (CEM I 52,5 R)	370
Sable (0/4 mm)	774
Gravier (4/14 mm)	1070
Eau	210
E/C	0,57

Tous les corps d'épreuve présentés ici, ont été préparés à partir de la formulation du **tableau III.1**. À savoir un ciment portland CEM I 52.5 R, du sable de Garonne alluvionnaire siliceux roulé lavé de catégorie A et de classe granulaire 0/4 mm, un gravier de classe granulaire 4/14 mm. Le **tableau III.2** montre quelques caractéristiques des différents corps d'épreuves utilisés dans cette étude.

Tableau III. 2 : Caractéristiques des différentes séries d'échantillons de béton.

Séries	Nb. Dalles.	Dimensions (m)	NaCl (g/L)	Mode de contamination en chlorure
S0	10	0,24 x 0,24 x 0,12	0	-
S1	7	0,24 x 0,24 x 0,12	30	Homogène
S1.2	3	0,24 x 0,24 x 0,12	120	Homogène
S2	2	0,5 x 0,25 x 0,12	30	Par gradient
S3	3	0,5 x 0,25 x 0,12	30	Mélange avec l'eau de gâchage
S4	6	0,24 x 0,24 x 0,12	35	Eau chlorée pulvérisée

Les séries d'échantillons (S0), (S1), (S1.2) et (S4) se composent, respectivement, de dix, de sept, de trois et de six petites dalles en béton de dimensions 0,24 m x 0,24 m x 0,12 m. Les séries d'échantillons (S2) et (S3) se composent, respectivement, de deux et de trois grandes dalles en béton de dimensions 0,5 m x 0,25 m x 0,12 m. Les séries (S2) et (S3) ont des dimensions plus grandes car il a été prévu de faire des mesures en ouverture d'angle (WARR) mais cela n'a pas abouti.

À noter ici que les séries d'échantillons (S0), (S1) et (S1.2) correspondent à un même groupe de béton. Cependant, contrairement aux deux autres séries d'échantillons, (S1) et (S1.2), la série (S0) n'a pas subi de contamination en chlorure. Par ailleurs, les séries d'échantillons

(S1), (S2) et (S3) ont été contaminées à 30g/L de NaCl alors que la série (S1.2) a été contaminée à 120g/L de NaCl. Toutefois, la contamination sur la série (S3) a été faite en mélangeant 30g/L de NaCl dans l'eau de gâchage. Enfin, la série S4 a été placée dans un environnement salin concentré à 35g/L de NaCl.

III.2 Les méthodes de conditionnements et de contaminations

Tous les échantillons ont été initialement placés, durant 28 jours, en chambre humide avec une humidité relative de 90% et une température contrôlée de 20°C. À la fin de la cure humide, les échantillons subissent un premier séchage dans une étuve réglée à une température contrôlée de 80°C et cela jusqu'à stabilisation la masse. Mais contrairement aux autres groupes d'échantillons, le mode de séchage pour le groupe d'échantillon S4 se fait à une température ambiante de 20°C. Chaque série d'échantillons a été réalisée avec un seul gâchage de béton.

III.2.1 Répartition homogène de la solution saline : Séries d'échantillons S1, S1.2 et S0

Le premier groupe d'échantillon est constitué de 20 petites dalles en béton. À la fin du premier séchage, et pour optimiser la remontée par capillarité de l'eau et de la solution saline à l'intérieur des échantillons de béton, sept échantillons correspondant à la série S1 ont été partiellement immergés dans un bac contenant une solution saline concentrée à 30g/L de NaCl. Tandis que trois autres échantillons de béton correspondant à la série S1.2 ont été partiellement immergés dans un bac contenant une solution saline concentrée à 120g/L de NaCl pour optimiser la remontée capillaire de la solution saline à travers les échantillons de béton. En parallèle, les dix échantillons de béton restants correspondant à la série S0 ont été placés dans un bassin contenant une eau non contaminée par les chlorures.

Le conditionnement de ces échantillons se fait par suivi de masse jusqu'à atteindre les degrés de saturation requis, à savoir 50% et 100%. Par ailleurs, après avoir atteint les masses correspondantes au degré de saturation $S_r=50\%$, les échantillons sont recouverts d'une feuille d'aluminium adhésive (cf. **figure III.1**) et sont placés dans une étuve réglée à une température contrôlée de 80°C et cela pendant 2 mois, afin d'homogénéiser la solution à l'intérieur de la porosité du béton pour les échantillons contaminés et non contaminés.



Figure III. 1 : Échantillons en phase de conditionnement

III.2.2 Gradient de teneur en chlorure : Série d'échantillons S2

À la fin du premier séchage, les échantillons S2 sont placés dans une salle dont la température est régulée à 20°C. Des parois verticales en PVC, **figure III.2**, de dimensions 0,5 m x 0,25 m x 0,10 m sont scellées sur le haut de la dalle par une colle imperméable afin de former un réservoir.

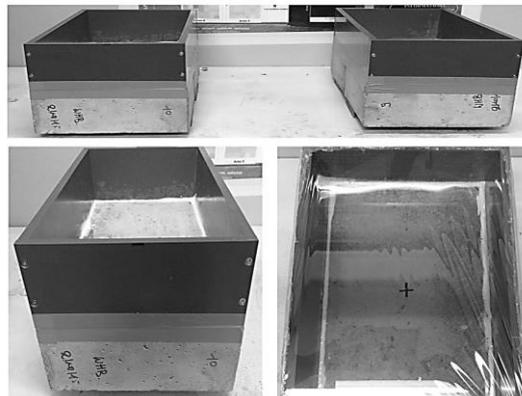


Figure III. 2 : Coffrage en PVC posé sur le haut des échantillons

À partir de l'état sec des échantillons, des volumes de solution saline de concentration de 30 g/L de NaCl correspondant successivement à des degrés de saturation de 25% et 50% pour la première dalle et 25%, 50%, 75% et 100% de degré de saturation pour la deuxième dalle, sont placés dans le réservoir **figure III.3**. Par ailleurs, Le haut du réservoir en PVC est recouvert d'un film de polyane pour éviter toute évaporation de la solution saline. La mesure radar est réalisée une fois que tout le volume de solution est absorbé par le béton.

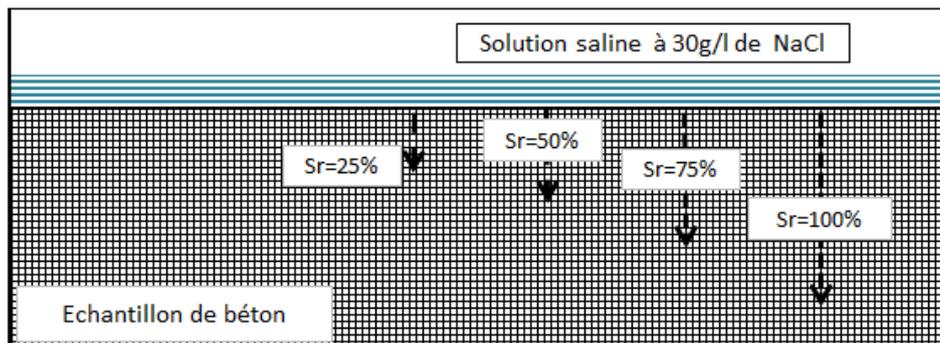


Figure III. 3 : Hypothèse de pénétration de la solution saline dans le corps d'épreuve

À la différence de la première série d'échantillon S1, où les échantillons sont homogénéisés lorsqu'ils atteignent un degré de saturation de $Sr=50\%$, la contamination des échantillons S2 a pour but d'obtenir un gradient de la solution interstitielle et par conséquent de la teneur en chlorure à l'intérieur du béton.

III.2.3 Introduction des chlorures dans l'eau de gâchage : Série d'échantillons S3

Pour cette série d'échantillons, 30g/L de NaCl ont été mélangés avec l'eau de gâchage. Cela permet, entre autres, d'assurer une contamination homogène jusqu'au cœur de l'échantillon. Et contrairement aux autres séries d'échantillons, la série S3 n'a pas été plongée dans un bassin rempli d'eau pour éviter tout risque de lessivage des chlorures, mais posée à même le sol dans la chambre humide et recouverte d'un film plastique.

Ensuite, comme pour les séries S0, S1 et S1.2 le conditionnement sur la série d'échantillon de béton S3 se fait par suivi de masse jusqu'à atteindre les degrés de saturation requis de 50% et de 100%.

III.2.4 Exposition à des embruns salins intermittents : Série d'échantillons S4

Afin d'imiter au mieux une exposition à un environnement marin, le groupe d'échantillons S4 est placé, après quatre mois de séchage à une température ambiante de 20°C , dans une enceinte dans laquelle on pulvérise de l'eau chlorée de concentration saline de 35g/L de NaCl. Les échantillons de béton suivent ensuite un cycle de pulvérisation imposé et adopté comme tel de trois jours par semaine, suivie d'une période de séchage de quatre jours. Un suivi de masse et ainsi que des mesures radar sont faites tous les trois semaines.

Par manque de temps, les mesures sur cette dernière série d'échantillon de béton n'ont pas pu être présentées dans ce manuscrit.

III.3 Les différents modes de conditionnement

Des mesures radar sont réalisées sur les corps d'épreuves à la fin de chaque conditionnement. À noter que des mesures radar témoin sont faites, sur chaque série de béton, à la fin de la cure humide à 28 jours, pour un degré de saturation estimé $S_r=100\%$, et à la fin du premier séchage à 80°C , pour un degré de saturation estimé $S_r=0\%$. Ajouté à cela, les échantillons S1 subissent des mesures radar à la fin du conditionnement par homogénéisation à 80°C ($S_r=50\%$), et à la fin de la saturation totale des échantillons (par contamination ou non). Pour les échantillons S2, des mesures radar sont faites à la fin de chaque pénétration des chlorures, à savoir pour $S_r=25\%$, 50% , 75% et 100% .

La **figure III.4** reprend les différents modes de conditionnement et de contamination pour chaque groupe d'échantillons.

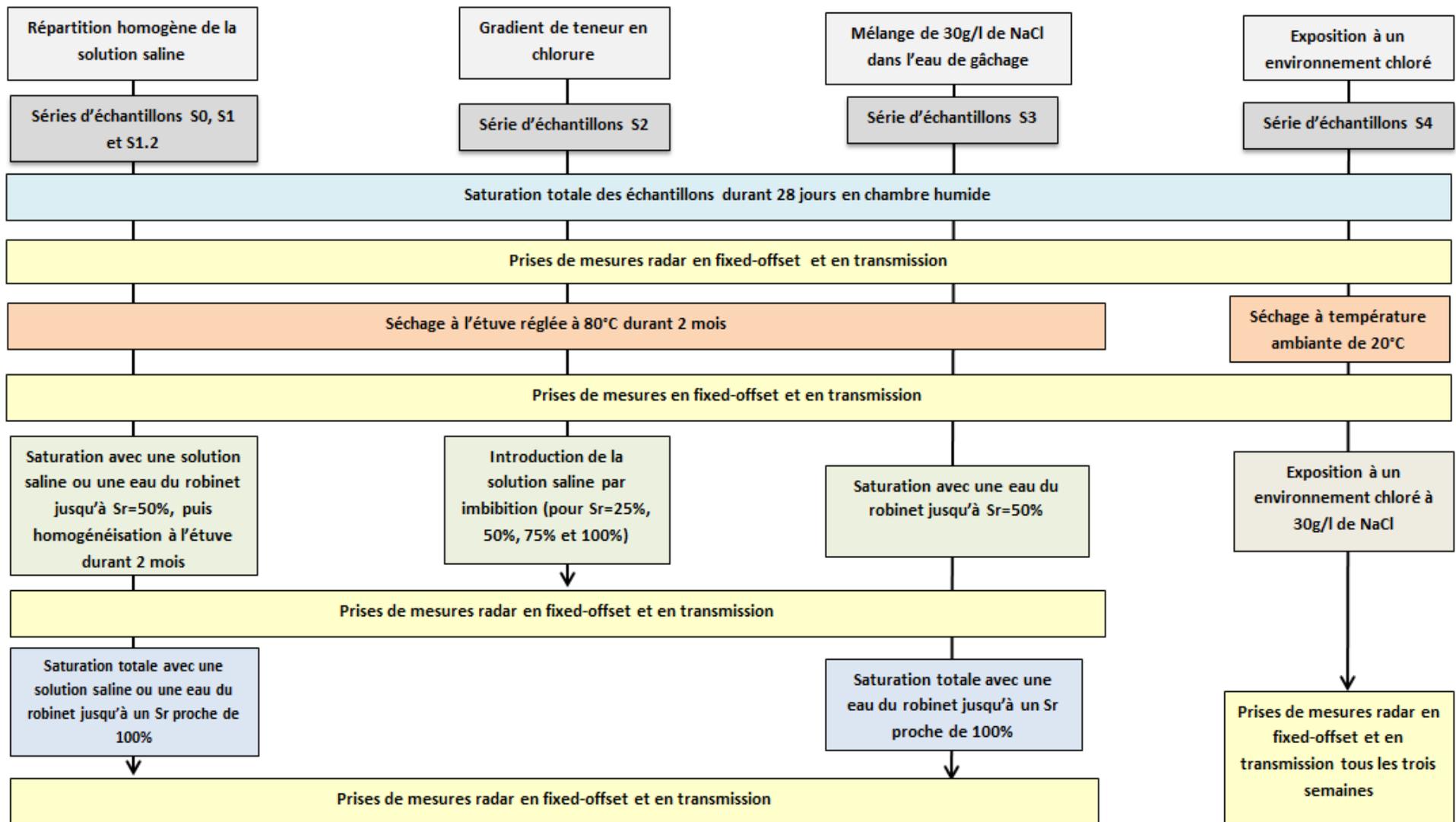


Figure III. 4 : Illustration des différents modes de conditionnements et de contaminations pour chaque série d'échantillon

III.4 Moyens de mesure

L'appareil de mesure est un GPR SIR-20 développé par la compagnie Geophysical Survey System Inc. (GSSI®). Il s'agit d'un appareil possédant une antenne bi-statique fixe avec un transmetteur et un récepteur séparés d'une distance fixe de 5,9 cm et une fréquence centrale de 1.5 GHz.

III.4.1 Méthode de mesure de vitesse en transmission

III.4.1.1 Principe de la méthode

Les mesures en transmission sont utilisées comme référence.

Pour cette méthode, deux carottes de diamètre $\varnothing=75$ mm et de hauteur=120 mm extraites d'une même dalle sont mises bout à bout et couvertes d'une feuille en aluminium adhésive sur les faces latérales. L'échantillon obtenu de longueur $l=240$ mm est alors placé dans un support (cf. **figure III.5**). Un tube cylindrique creux enveloppé d'une feuille en aluminium adhésive est placé de la même façon dans un support identique. L'utilisation de la feuille en aluminium adhésive a pour but de guider les ondes EM à travers l'échantillon de béton, et ainsi à éviter que les ondes EM ne contourne l'échantillon de béton.

Comme schématisé sur la **Figure III.5**, en transmission, deux antennes radar sont requises pour l'acquisition des mesures, une antenne qui va servir d'émetteur (E) et l'autre antenne de récepteur (R). Une première mesure est alors faite à travers le tube cylindrique creux puis une seconde mesure est faite à travers l'échantillon en béton. La mesure dans l'air va permettre de déterminer l'instant d'émission du signal qui n'est pas fourni par le système radar.

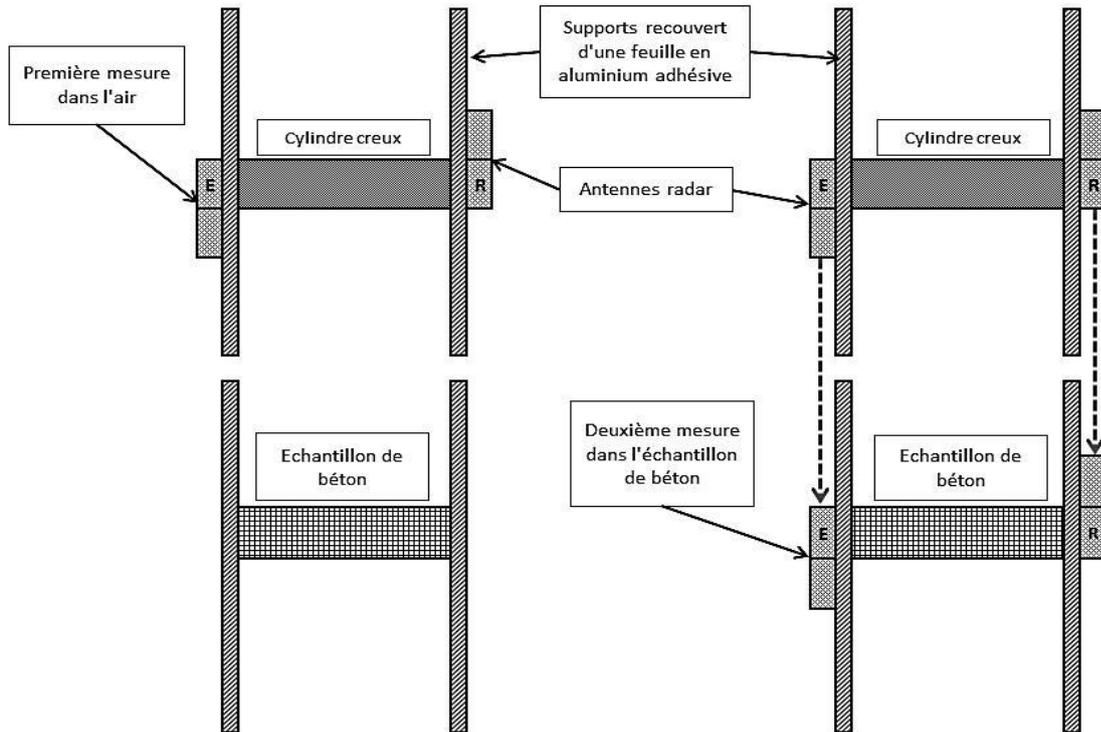


Figure III. 5 : Méthode d'enregistrement en transmission

III.4.1.2 Calcul de la vitesse de propagation en transmission

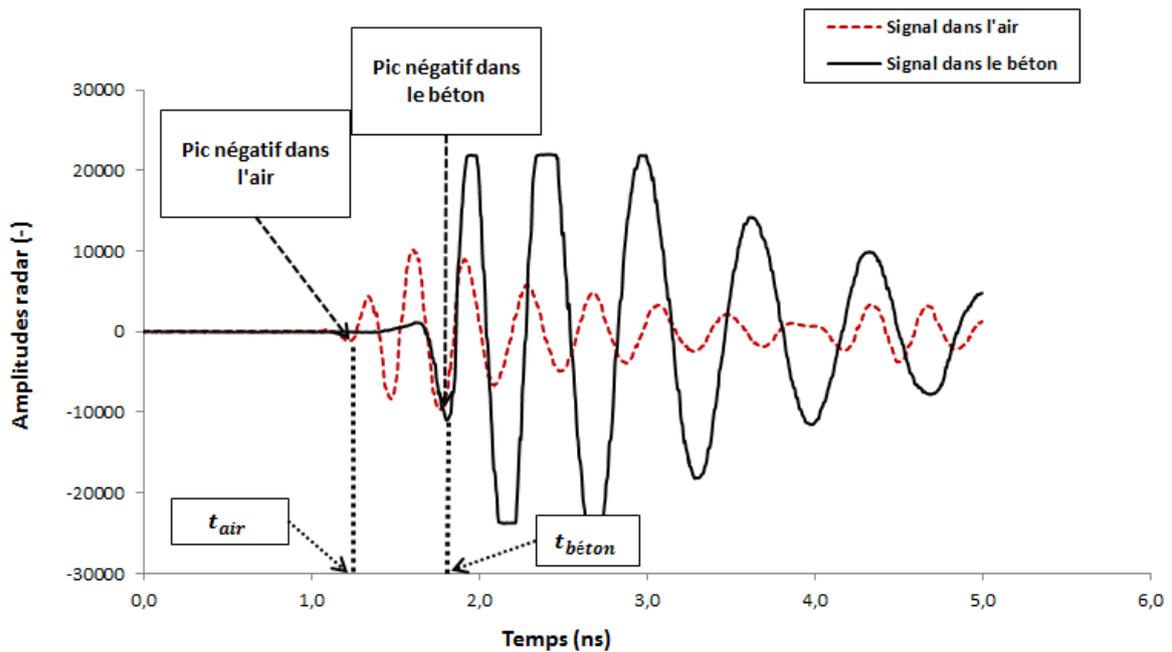


Figure III. 6 : Types de signaux EM obtenus avec la méthode en transmission

La **figure III.6** représente les deux signaux radar dans l'air et dans le matériau obtenu en utilisant la méthode GPR en transmission (cf. **figure III.5**). À noter que la taille de la fenêtre d'écoute en transmission est de 5ns pour 1023points/scan.

Par ailleurs, la vitesse de propagation de l'onde EM en transmission est calculée en considérant la position du premier pic dans l'air et dans le matériau (les deux pics négatifs repérés sur la **figure III.6** (cf. **figure III.6**).

Le temps d'arrivée du premier pic dans l'air t_{air} permet de déterminer l'instant d'émission du signal t_0 en utilisant les relations (3.1) et (3.2).

$$v_{air} = \frac{l_{air}}{\Delta t_{air}} \quad (3.1)$$

Avec :

$$\Delta t_{air} = t_{air} - t_0 \quad (3.2)$$

l_{air} , étant la longueur du cylindre creux, $v_{air} = c = 30cm/ns$ la vitesse de propagation de l'onde EM dans l'air, t_{air} le temps de propagation de l'onde EM dans l'air, et t_0 l'instant d'émission de l'onde EM.

Ainsi, le temps t_0 est calculé à partir de la relation (3.3) :

$$t_0 = t_{air} - \frac{l}{v_{air}} \quad (3.3)$$

Connaissant t_0 , il est alors possible de calculer le temps de propagation du signal dans le béton $\Delta t_{béton}$ à partir du temps d'arrivée du premier pic $t_{béton}$.

$$\Delta t_{béton} = t_{béton} - t_0 \quad (3.4)$$

La vitesse de propagation de l'onde EM qui traverse l'échantillon de béton en transmission est alors calculée à partir de la relation (3.5) :

$$v_{béton} = \frac{l}{\Delta t_{béton}} \quad (3.5)$$

III.4.2 Méthode de mesure de vitesse en « fixed-offset »

III.4.2.1 Principe de la méthode

Cette configuration nécessite l'utilisation d'une seule antenne radar. Afin d'obtenir une réflexion totale des ondes EM réfléchies provenant du fond de la dalle, un support métallique est placé sous les dalles, **figure III.7**. Concernant les prises de mesures, l'enregistrement commence par une mesure dans l'air puis l'antenne radar est posée sur la dalle, **figure III.7**.



Figure III. 7 : Prise de mesure en fixed-offset

Le processus est alors répété sur cinq à six différents points de mesures de la dalle afin de caractériser la variabilité des mesures (cf. **figure III.8**).

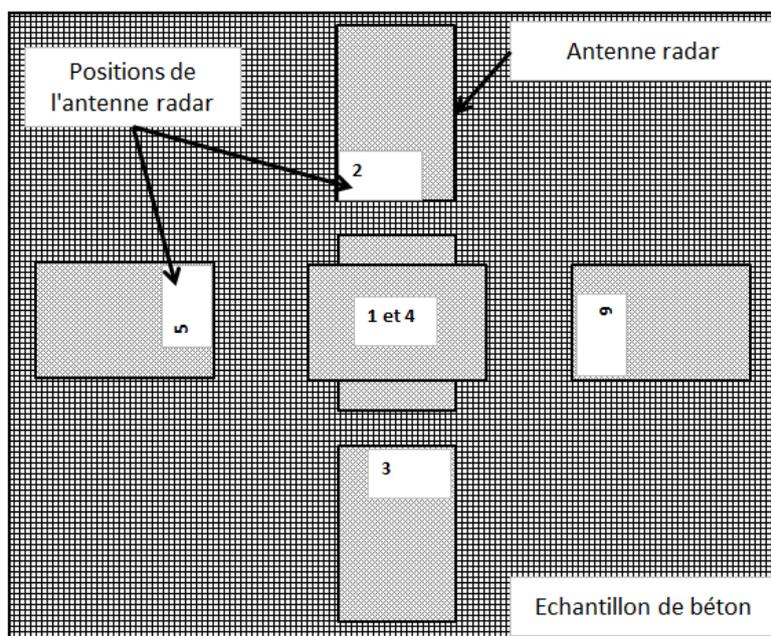


Figure III. 8 : Les différents points de mesures au-dessus de l'échantillon de béton

III.4.2.2 Calcul de la vitesse de propagation en « fixed-offset »

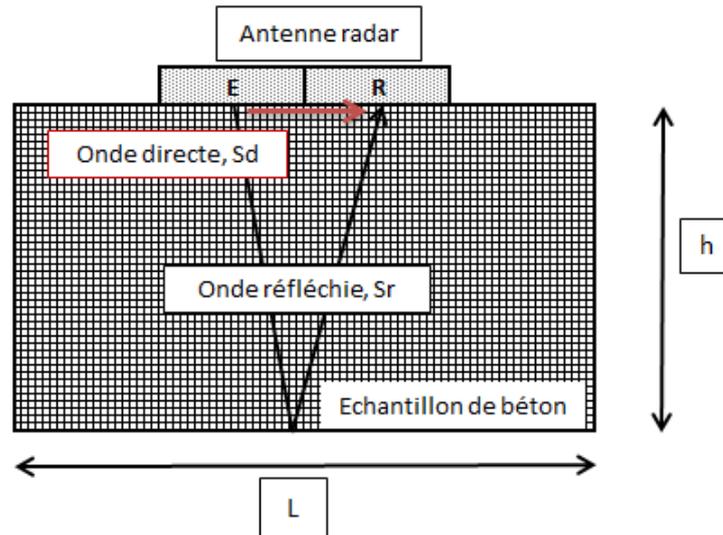


Figure III. 9 : Parcours de l'onde EM dans l'échantillon

La **figure III.9** montre le parcours de l'onde EM parcourant un échantillon de béton en fixed-offset, avec h la hauteur de l'échantillon et L la longueur de l'échantillon. La vitesse de propagation de l'onde EM qui traverse cet échantillon de béton est alors calculée en faisant l'hypothèse que :

$$v_{or} = v_{od} = v_{mat} \quad (3.6)$$

Avec v_{or} la vitesse de propagation de l'onde réfléchie, v_{od} la vitesse de propagation de l'onde directe et v_{mat} la vitesse de propagation de l'onde EM dans l'échantillon de béton. Toutefois, il faut retenir ici que cette hypothèse est vraie uniquement lorsque le matériau possède une faible perte diélectrique. Par ailleurs, les vitesses de propagations de l'onde réfléchie et de l'onde directe peuvent s'écrire de la façon suivante :

$$v_{or} = \frac{L_r}{t_r} \quad (3.7)$$

$$v_{od} = \frac{L_d}{t_d} \quad (3.8)$$

Avec $L_r = 2 * \sqrt{\left(h^2 + \left(\frac{L_d}{2}\right)^2\right)}$, (S_r), le parcours de l'onde réfléchie dans l'échantillon de béton, h la hauteur de l'échantillon, L_d , (S_d), le parcours de l'onde directe dans l'échantillon de béton (cf. **figure III.9**), t_r le temps de parcours de l'onde réfléchie et t_d le temps de parcours de l'onde directe.

Aussi, les relations (3.7) et (3.8) peuvent écrire :

$$L_r = v_{or} * t_r \quad (3.9)$$

$$L_d = v_{od} * t_d \quad (3.10)$$

Par conséquent, connaissant l'hypothèse (3.6) et en faisant la différence de la relation (3.9) sur la relation (3.10), on peut en déduire la relation (3.11) :

$$v_{mat} = \frac{L_r - L_d}{\Delta t} \quad (3.11)$$

Avec : $\Delta t = t_r - t_d$ la différence de temps (ou laps de temps) entre l'onde réfléchie et l'onde directe.

On peut alors estimer, à partir de la relation (3.11), la constante diélectrique d'un échantillon de béton donné en utilisant la relation (3.12) ci-dessous :

$$\epsilon'_r = \left(\frac{c}{v_{mat}} \right)^2 \quad (3.12)$$

Avec : $c = 30 \text{ cm/ns}$ la propagation de la vitesse de l'onde EM dans le vide.

III.4.2.3 Calcul d'une différence de temps delta t (Δt)

La **figure III.10** montre un exemple de signal d'onde EM obtenu sur un échantillon de béton sec avec la méthode de mesure de vitesse en fixed-offset. Ce signal peut se décomposer en trois parties, qui sont : l'onde directe, l'onde réfléchie et les effets de bord.

Pour calculer la différence de temps, delta t (Δt), entre l'onde directe et l'onde réfléchie, il est usuel de choisir le premier pic de l'onde directe et le premier pic de l'onde réfléchie (**figure III.11**). Cependant, ce premier calcul de delta t1 ne donne pas des vitesses comparables à celles obtenues en transmission, surtout pour la série (S0) pour laquelle la distribution de l'eau est homogène. Le **tableau III.3** montre les comparaisons des vitesses de propagation des ondes EM obtenues en transmission et en fixed-offset pour différents degrés de saturation.

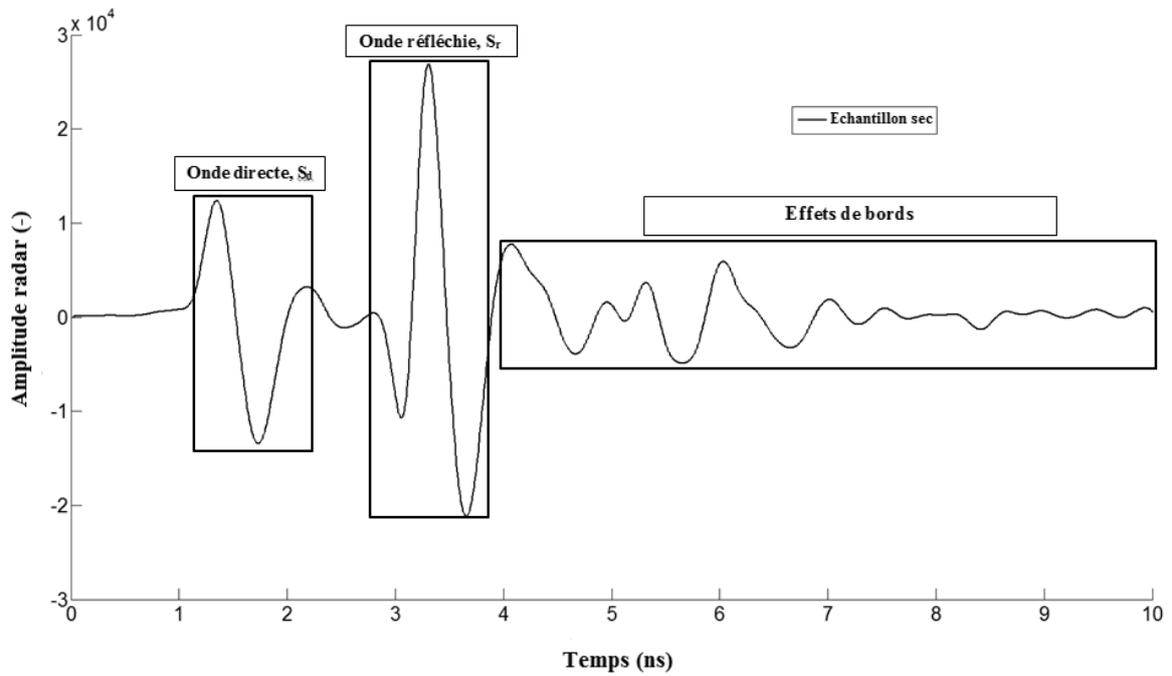


Figure III. 10 : Signal "A-scan" obtenu par la méthode fixed-offset

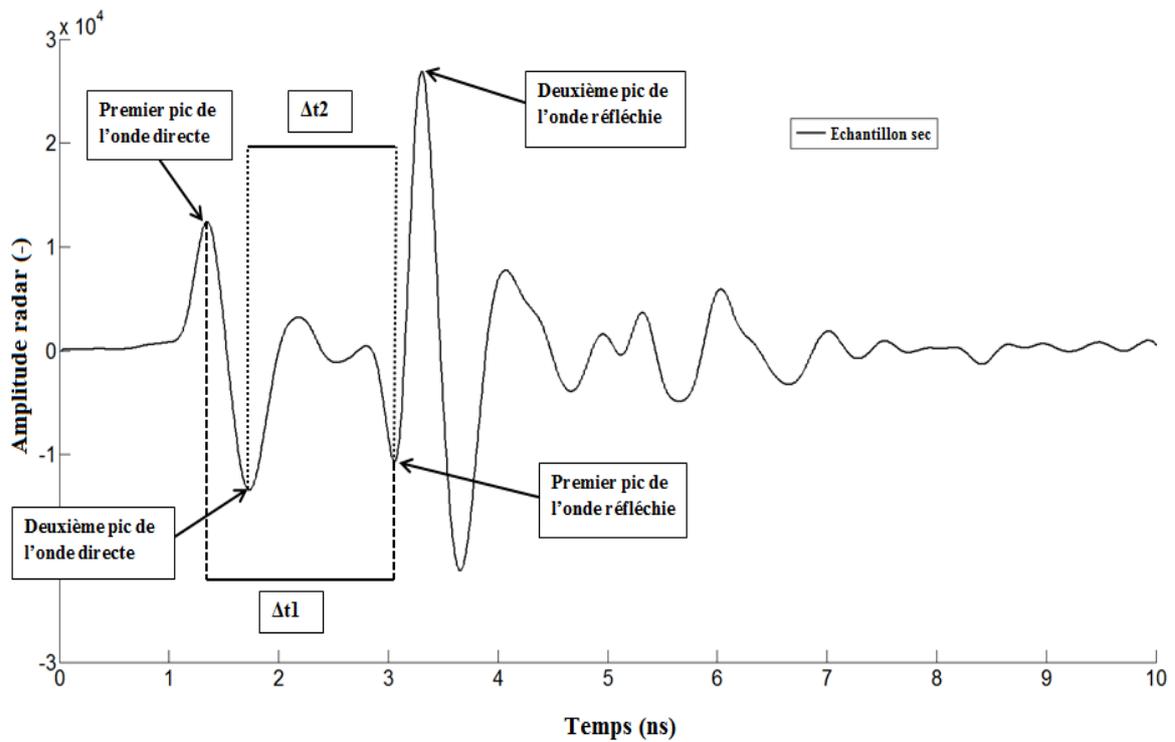


Figure III. 11 : Positions de delta t1 et delta t2

Tableau III. 3 : Comparaison des vitesses en transmission et en fixed-offset pour différents états de conditionnements de la série S0. (Tr. et F.O. pour de transmission et de fixed-offset).

S0	Vit. Tr.(cm/ns)	Vit.1 F.O.(cm/ns)	Écar.Rela.1(%)	Vit.2 F.O.(cm/ns)	Écar.Rela.2(%)
Sr=0%	14,20	11,51	18,9	14,87	4,7
Sr=50%	12,07	10,02	17,0	12,65	4,8
Sr=100% (28jours)	9,60	7,86	18,2	9,60	0,0
Sr=100%	9,60	8,03	16,4	9,84	2,5

Les valeurs des vitesses en fixed-offset affichées sur ce tableau correspondent à des valeurs moyennées sur l'ensemble des échantillons de béton de la série S0. (Vit1) représente les vitesses calculées à partir du delta t1 et (vit.2) les vitesses calculées à partir du delta t2 (cf. **figure III.11**). Le **tableau III.3** montre, entre autres, que les vitesses (Vit2) calculées à partir de delta t2 affichent des écarts relatifs inférieurs à 5%. Par conséquent, nous avons des vitesses (Vit2) très comparables avec celles obtenues en transmission.

D'autre part, sur le **tableau III.4** sont représentés des écarts relatifs entre les vitesses obtenues en fixed-offset et celles obtenues en transmission suivant les positions des pics de l'onde directe et de l'onde réfléchie pour un degré de saturation Sr=100%. On peut donc bien voir que lorsqu'on pointe le premier pic de l'onde réfléchie (pic Min O.R.) et le deuxième pic de l'onde directe (pic Min O.D.), pour le calcul de delta t2, cela affiche un écart relatif proche de 0, (cf. **figure III.11**, **tableau III.4**).

Tableau III. 4 : Ecart relatifs entre les vitesses en fixed-offset et en transmission suivant les positions des pics choisis.

S0 pour un degré de saturation Sr=100% après 28 jours de cure humide			
Pics	Vit. F.O.(cm/ns)	Vit. Tr.(cm/ns)	Écart Rela.(%)
Max O.R. - Max O.D.	6,92	9,6	27,9
Max O.R. - Min O.D.	8,24	9,6	14,1
Min O.R. - Max O.D.	7,86	9,6	18,2
Min O.R. - Min O.D.	9,6	9,6	0,0

Aussi, il a été démontré dans les travaux de Klysz [11], à partir d'une simulation de la méthode en ouverture d'angle (WARR), que l'onde directe d'un signal EM se propageant dans le matériau (cf. **figure III.10**), est en fait une addition de deux ondes directes, l'une se propageant dans l'air et l'autre se propageant dans le matériau (cf. **figure III.12**).

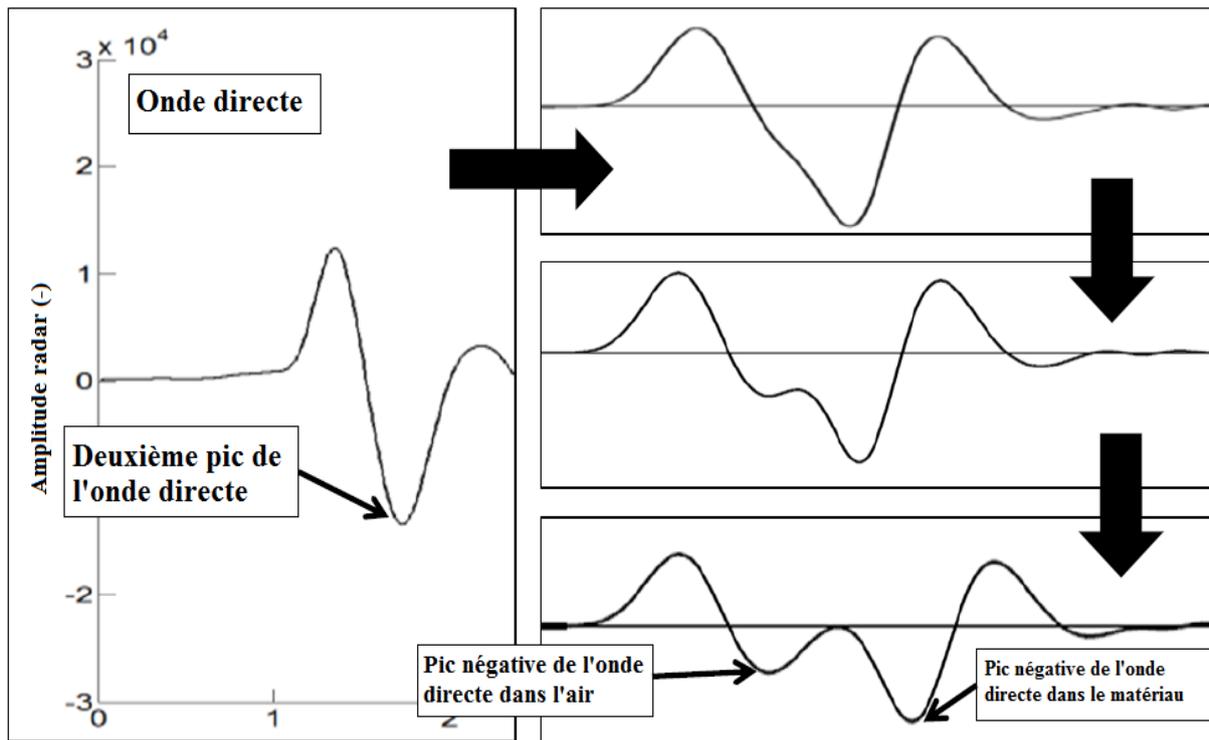


Figure III. 12 : Mise en évidence de deux ondes directes par la méthode d'ouverture d'angle (WARR)

Le deuxième pic de l'onde directe s'avère donc bien être le plus représentatif du début de propagation du signal EM dans le matériau et non le premier pic de l'onde directe. Ceci peut expliquer que le deuxième pic de l'onde directe permette d'obtenir des vitesses comparables entre la méthode en transmission et la méthode en fixed-offset.

III.4.3 Vitesses des ondes réfléchies sur le fond des échantillons

Sur la **figure III.13**, sont représentées les variations des vitesses obtenues par la méthode en fixed-offset en fonction des vitesses obtenues par la méthode en transmission. Les valeurs sont obtenues après traitement des mesures radar sur les trois états de conditionnement (sec, partiellement saturé et totalement saturé), et cela pour les séries d'échantillons S0, S1 avec une contamination à 30g/L de NaCl, S1.2 avec une contamination à 120g/L de NaCl et S3. Aussi, chaque valeur de vitesse obtenue par la méthode en fixed-offset correspond à des valeurs moyennées sur plusieurs échantillons de béton.

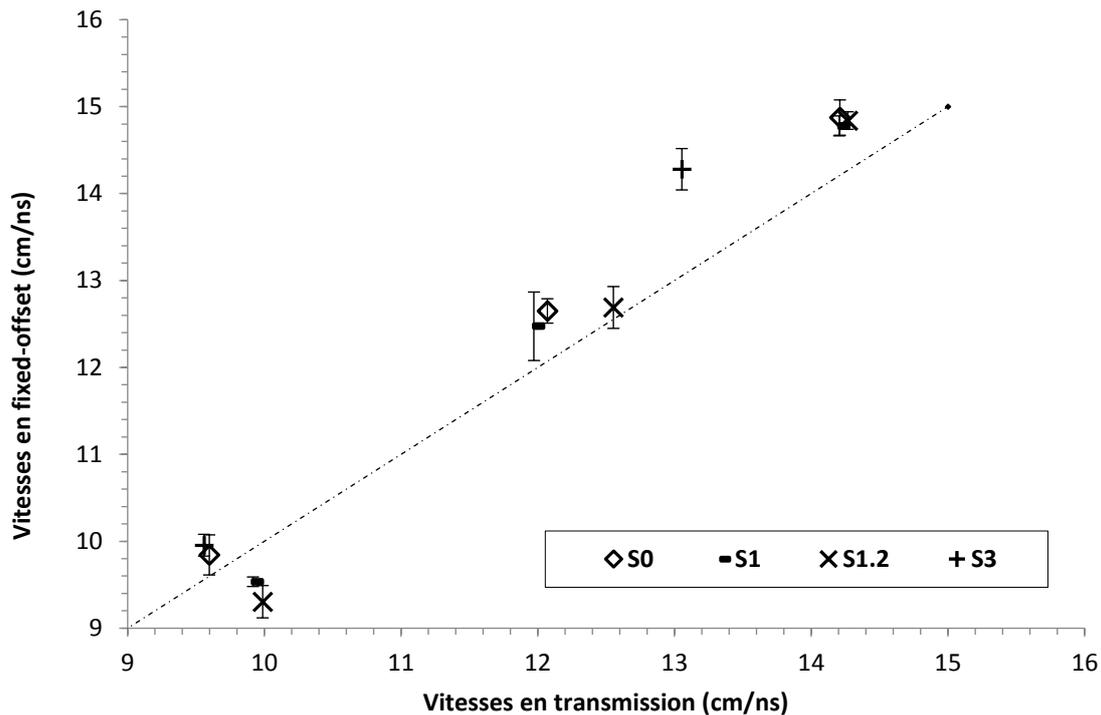


Figure III. 13 : Variation des vitesses en fixed-offset en fonction des vitesses en transmission

On remarque donc une corrélation satisfaisante entre la vitesse en fixed-offset, obtenues en considérant l'écart de temps entre le deuxième pic de l'onde directe et le premier pic de la réflexion, et les vitesses en transmission.

III.5 Calcul de l'atténuation du signal EM : amplitudes normalisées

Les **figures III.14** et **III.15** représente respectivement les signaux d'onde électromagnétique se propageant dans l'air et dans le béton. Ces signaux d'onde EM ont été obtenus à partir de la méthode de mesure de vitesse en fixed-offset.

Sur les **figures III.14** et **III.15** :

A_{air} , est l'amplitude pic à pic du signal électromagnétique dans l'air (voir **figure III.14**).

A_{od} , est l'amplitude pic à pic de l'onde directe dans le matériau (cf. **figure III.15**).

A_{or} , est l'amplitude pic à pic de l'onde réfléchie au fond de l'échantillon (cf. **figure III.15**).

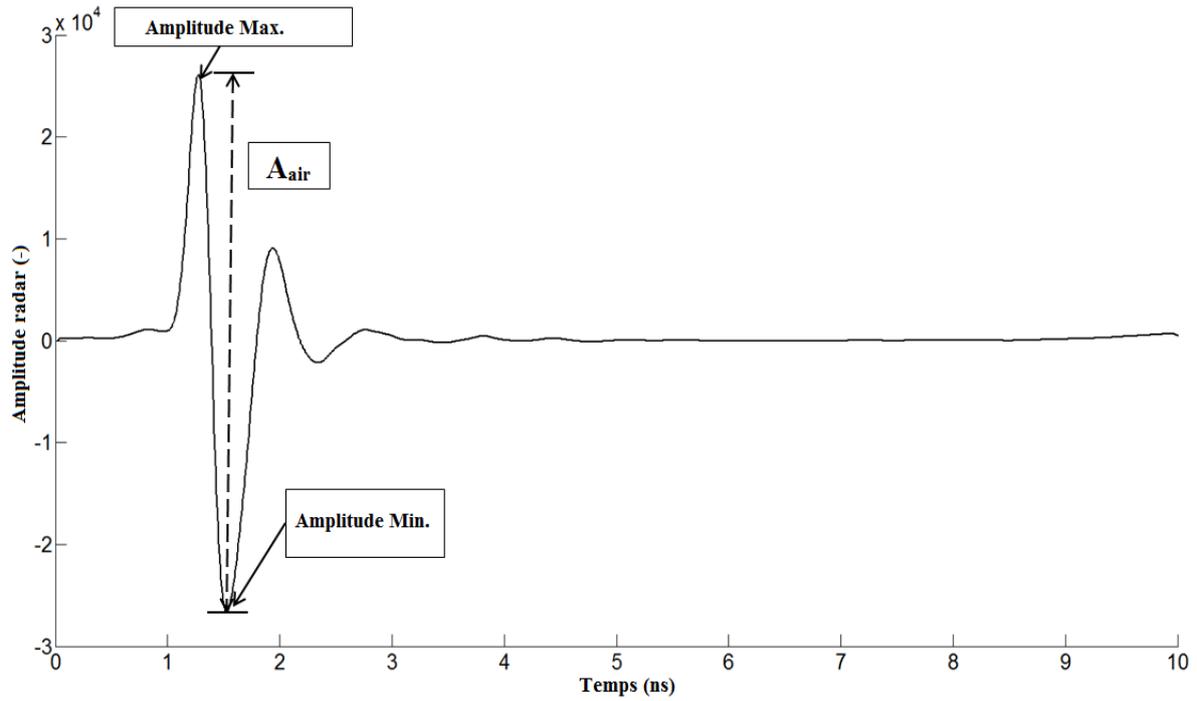


Figure III. 14 : Signal EM se propageant dans l'air

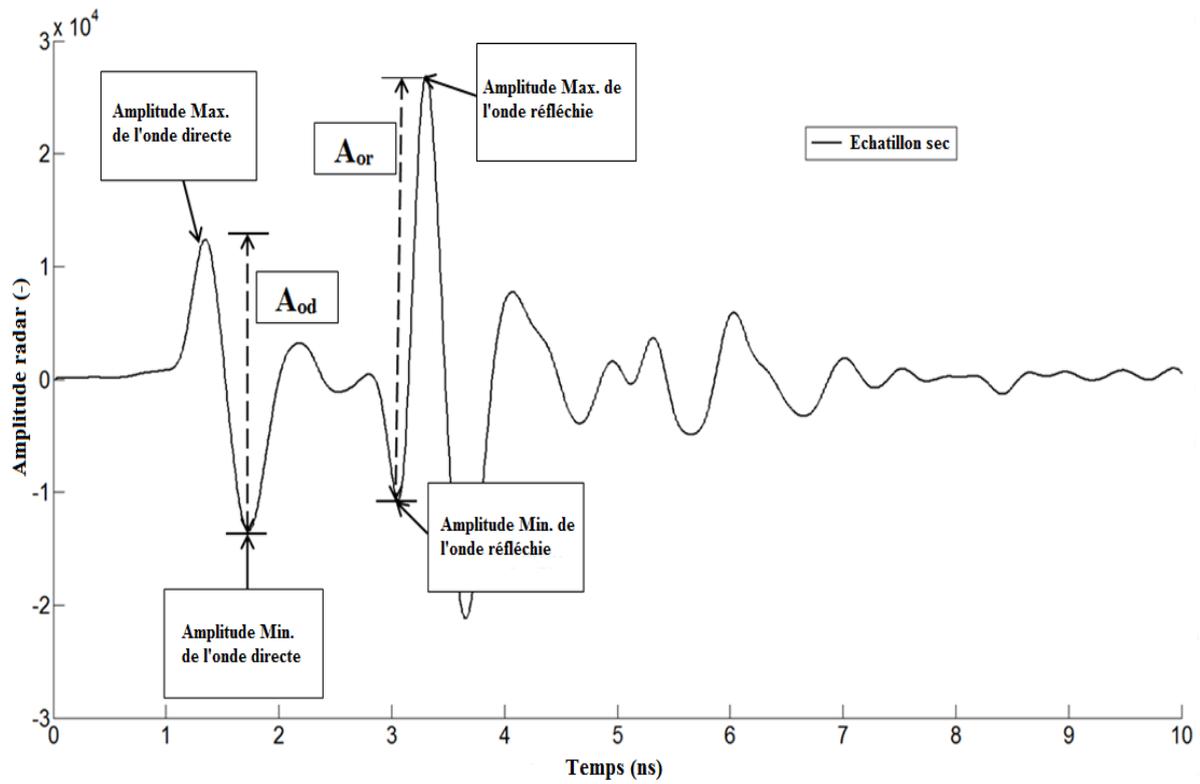


Figure III. 15 : Signal EM parcourant un échantillon de béton

Les amplitudes normalisées de l'onde directe et de l'onde réfléchie sont alors calculées en utilisant les relations (3.13) et (3.14) ci-dessous, avec :

$$A_{norD} = \frac{A_{od}}{A_{air}} \quad (3.13)$$

$$A_{norR} = \frac{A_{or}}{A_{air}} \quad (3.14)$$

III.6 Méthode de dosage en chlorure

Il s'agit d'estimer les teneurs en chlorures, libres, totaux et liés, présents dans un échantillon de béton. Dans cette partie nous allons décrire les étapes nécessaires à la détermination des teneurs en chlorure.

III.6.1 Mode d'échantillonnage

Le mode d'échantillonnage se fait comme suit :

- Prélèvement d'une carotte de dimension 120 mm de hauteur et $\Phi=75$ mm de diamètre extrait sur chaque échantillon de béton puis débitage en trois tranches de 40mm ;
- Réduction des tronçons d'échantillons de béton en petits morceaux en les concassant une première fois au marteau et à l'enclume ;
- Broyage des morceaux à l'aide d'un broyeur à mâchoire pour faciliter la transition dans le broyeur à disques ;
- Introduction des fragments obtenus après passage au broyeur à mâchoire dans le broyeur à disque, puis réduction de l'échantillon de béton sous forme de poudre jusqu'à obtenir un passage au tapis de 315 μ m, (cf. **figure III.16**).

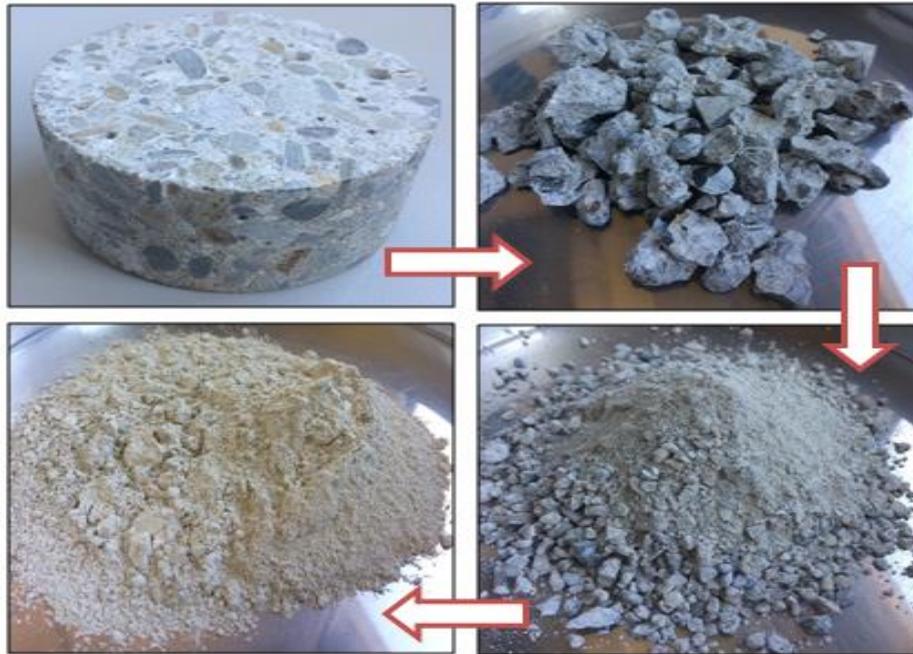


Figure III. 16 : Les différentes étapes de broyage

III.6.2 Préparation des solutions pour les dosages en chlorure

Le passage au tamis de 315 μ m est nécessaire pour le passage en solution des ions chlorure présents dans la poudre. La méthode consiste à faire passer en solution les ions chlorures présents dans l'échantillon de béton en poudre selon les méthodes de dosage en chlorures libres et totaux décrites dans [24] et dans le GranDuBé (Grandeurs associées à la Durabilité des Bétons). La solution obtenue est alors titrée à l'aide d'un appareil de titrimétrie (titrage potentiométrique), dans ce processus les ions chlorures sont mis en évidence grâce à la solution de nitrate d'argent (AgNO_3).

III.6.3 Résultats du dosage en chlorure

Les teneurs en chlorure représentées sur les **figures III.17** et **III.18** sont obtenues à la fin de la mesure du dosage en chlorure. Les valeurs de la teneur en chlorures libres et totaux sont alors données en pourcentage massique de gramme de chlorure par gramme de béton (%g.Cl/g.béton). Elles sont ramenées ensuite en pourcentage massique de gramme de chlorure par gramme de ciment (%g.Cl/g.ciment) selon la relation (1) donnée en annexe (voir Annexes sur la méthode de dosage en chlorure).

La **figure III.17** présente quelques résultats de la teneur en chlorures libres et totaux de la série S1 contaminée à 30g/L de NaCl et de la série S1.2 contaminée à 120g/L de NaCl pour un degré de saturations de 50 et de 100%. À noter que les valeurs représentées sur la **figure III.17** correspondent à des valeurs moyennées sur plusieurs échantillons de béton de la même série. Cette figure nous montre que la teneur en chlorures libres et totaux augmente à la fois avec l'augmentation du degré de saturation et l'augmentation de la concentration en sel (NaCl). Il semblerait donc qu'il ait une certaine proportionnalité entre la quantité de sel utilisée et la teneur en chlorure présent dans l'échantillon de béton.

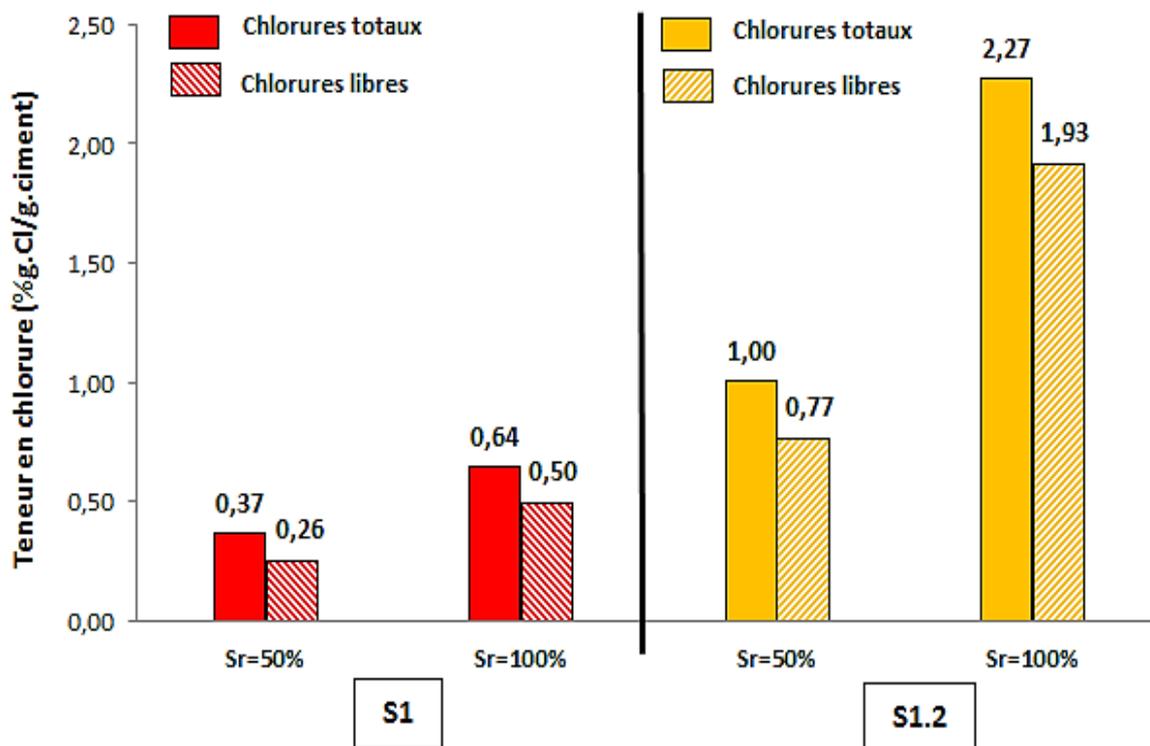


Figure III. 17 : Teneur en chlorure en fonction de la concentration chlorure et du degré de saturation pour les séries S1 et S1.2.

La **figure III.18** représente les variations de la teneur en chlorures libres en fonction de la teneur en chlorures totaux pour les différentes séries d'échantillons de béton contaminées S1, S2, S3 et S1.2. Sur cette figure, la teneur en chlorures libres augmente selon un comportement linéaire avec l'augmentation de la teneur en chlorures totaux. Aussi, la proportion entre chlorures libres et chlorures liés semble être identique pour les échantillons des séries S1 et S2. En revanche la valeur correspondante à la série S3 montre que la proportion en chlorures libres est significativement plus faible.

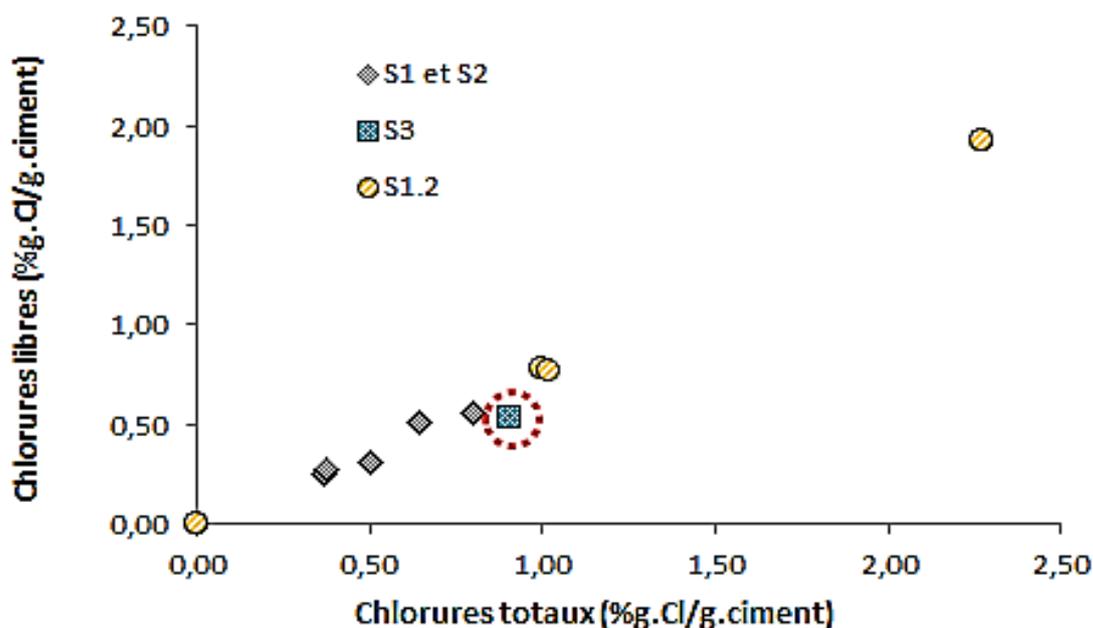


Figure III. 18 : Variation de la teneur en chlorures libres en fonction de la teneur en chlorures totaux pour les séries S1, S2 et S1.2.

D'autre part, la norme NF EN 206-1 impose des teneurs maximales en ions chlorures du béton à respecter en fonction de son type d'utilisation. En effet, pour un béton ne contenant ni armatures en acier ni pièces métalliques noyées la norme impose un seuil de teneur en chlorures totaux de 1% g.Cl/g.ciment, et pour un béton contenant des armatures de précontrainte en acier la norme impose un seuil de de teneur en chlorures totaux de 0,2% g.Cl/g.ciment. Les résultats sur le dosage en chlorure fait sur les séries d'échantillons de béton contaminées montrent donc que les teneurs en chlorure totaux obtenues sur les différentes séries d'échantillons de béton correspondent aussi bien aux seuils critiques de teneur en chlorures totaux qu'on retrouve dans les normes dans le cas où le béton contient des lits d'armatures. Nous avons donc ici, dans cette étude, des valeurs de teneurs en chlorures totaux assez satisfaisantes car représentatives de la réalité (voir **figure III.18**).

III.7 Porosité et masse volumique apparente

À la fin des conditionnements et des mesures radar, une carotte de béton de dimension 120 mm de hauteur et $\Phi=75$ mm de diamètre est prélevée sur chaque échantillon de béton. Ces carottes prélevées vont alors faire l'objet de mesure de la porosité accessible à l'eau et de mesure de la masse volumique apparente suivant la méthode décrite en annexe (voir annexes). Les valeurs obtenues sont reportées sur le **tableau III.5**. Par ailleurs, le conditionnement sur

la série S4 étant toujours en cours, la porosité ainsi que la masse volumique apparente ne sont pas présentées.

Tableau III. 5 : Porosité accessible à l'eau et masse volumique apparente des différentes séries.

	S0	S2	S3
Porosité (%)	16,5	17,6	15,0
ρ (kg/m³)	2262,2	2220,7	2263,2

À noter ici que les valeurs de la porosité et de la masse volumique de la série de béton S0 sont les mêmes que celles des séries de béton S1 et S1.2 car il s'agit du même gâchage. Le **tableau III.5** montre donc que la série S2 possède la porosité accessible à l'eau la plus élevée tandis que la série S3 celle la plus basse. L'explication la plus crédible ici est que cette forte porosité sur la série de béton S2 est due à la quantité d'eau introduite au moment du gâchage, qui est bien sûr beaucoup plus importante par rapport aux deux autres séries de béton, S0 et S3.

III.8 Méthode de mesure de la permittivité diélectrique

La permittivité ou la permittivité complexe ($\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$) est composée d'une partie réelle (constante diélectrique) et une partie imaginaire (facteur de perte). Il existe différentes méthodes pour estimer cette permittivité complexe. Une des possibilités consiste à utiliser une sonde coaxiale à terminaison ouverte développé par EDF R&D [25].

III.8.1 Présentation de la sonde coaxiale

Dans cette section est présenté le principe de la méthode de mesure de la sonde de bout, et un exemple de résultats issus de cette méthode. La mesure par la sonde coaxiale permet d'estimer la permittivité complexe d'un milieu et d'en extraire la partie réelle et imaginaire. Ce système de mesure développé chez EDF R&D est composé d'un analyseur de réseau vectoriel relié à une sonde coaxiale à terminaison ouverte par câble coaxial (**figure III.19**). Le principe de la méthode consiste à envoyer un signal électromagnétique dans une bande de fréquence allant de 100 MHz à 2 GHz à l'aide d'un analyseur de réseau. Ce signal se propage alors dans le câble coaxial puis jusqu'à l'extrémité de la sonde.

La sonde utilisée est caractérisée à son extrémité par un rayon d'âme $a=6.5\text{mm}$ et d'une gaine $b=15\text{mm}$, (cf. **figure III.19** et **figure III.20**).



Figure III. 19 : Système de mesure de la sonde coaxiale

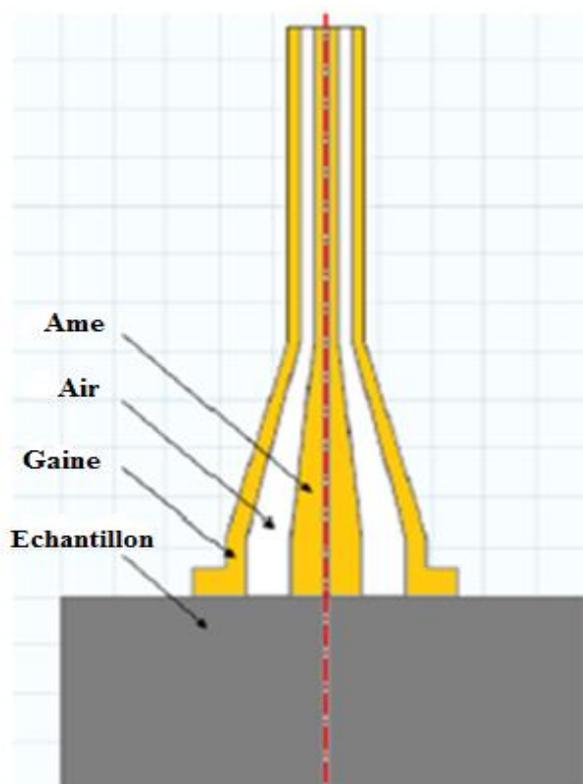


Figure III. 20 : Illustration du système de mesure de la sonde coaxiale

III.8.2 Exemple de résultats de la sonde coaxiale

Des mesures ont été faites sur des carottes de béton sec, $S_r=0\%$, et de béton contaminé, $S_r=100\%$, des séries S1 et S1.2. Sur chaque face de la carotte plusieurs points de mesures sont relevés puis moyennés, S11 étant la moyenne des points de mesure faits sur la première face et S12 la moyenne sur la deuxième face. La **figure III.21** représente la variation de la constante diélectrique moyenne en fonction de la fréquence pour la carotte de béton sec de la série S1.

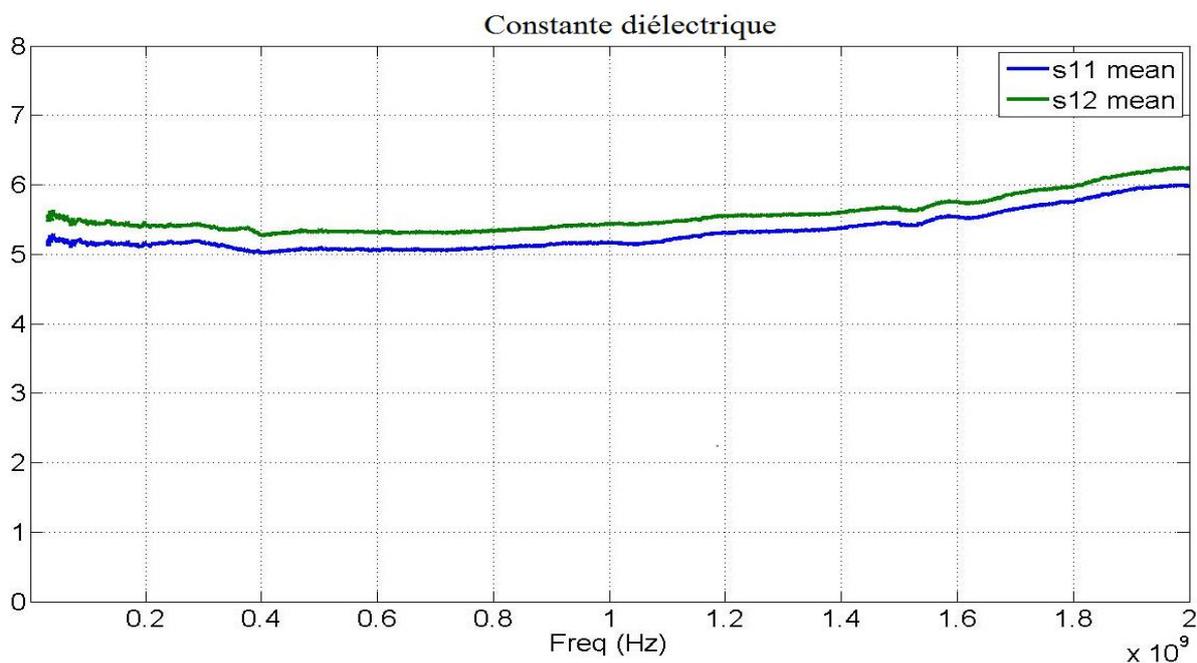


Figure III. 21 : Constante diélectrique (partie réelle) d'un béton sec ($S_r=0\%$)

Sur la **figure III.21**, la partie croissante à partir de 1,2GHz correspond à un enregistrement parasite provoqué par la sonde de mesure. De ce fait, on prendra uniquement en compte la partie linéaire des courbes S11 et S12. On observe donc une valeur de constante diélectrique moyenne d'environ 5,3 pour une gamme de fréquences comprise entre 0,4 et 1,2GHz. Sachant que la fréquence centrale des antennes radar couplées au matériau est de 1GHz les valeurs de la constante diélectrique et du facteur de pertes seront relevées sur ces graphiques à cette même fréquence (voir chapitre IV). Les valeurs fournies par la sonde coaxiale permettront donc de faire une comparaison avec les valeurs de constante diélectrique calculées à partir des vitesses radar mesurées sur les mêmes séries d'échantillons S1 et S1.2 (cf. **tableaux III.6** et **III.7**).

La **figure III.22** représente la variation moyenne du facteur de pertes en fonction de la fréquence pour la carotte de béton sec de la série S1. La **figure III.22** montre que pour 1 GHz, la valeur du facteur de pertes moyen est très proche de 0 ce qui est normal puisque le béton est sec.

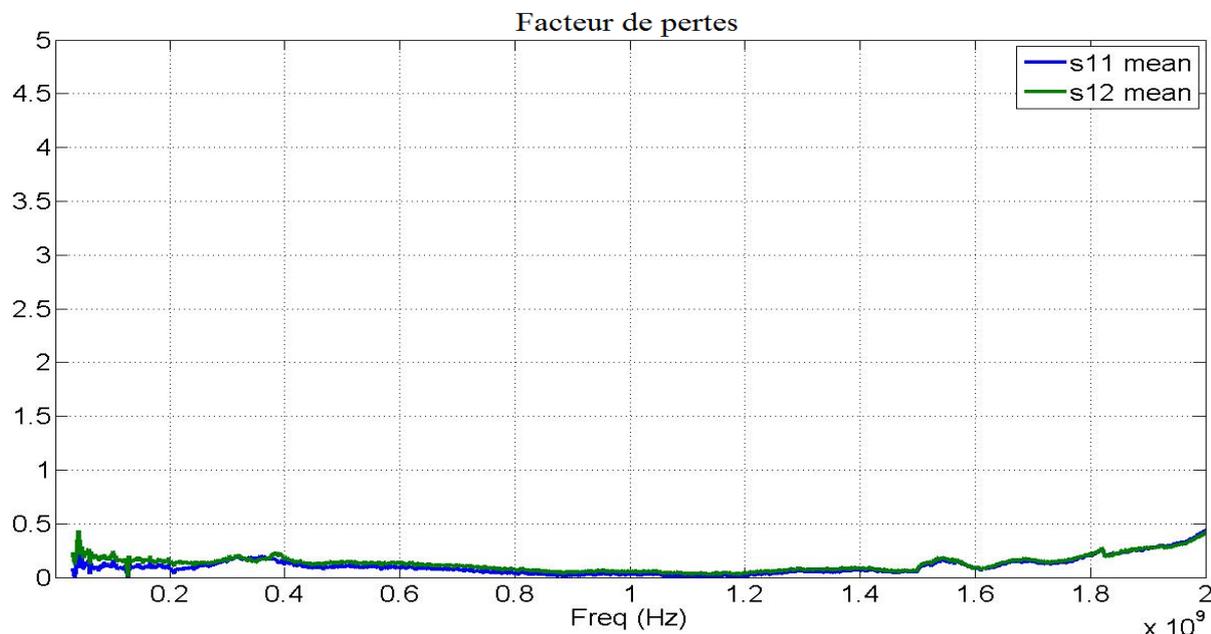


Figure III. 22 : Facteur de pertes (partie imaginaire) d'un béton sec ($Sr=0\%$)

Sur le **tableau III.6** la valeur de la constante diélectrique obtenue par la méthode radar a été moyennée sur plusieurs échantillons de béton de la série S1. Le coefficient de variation des constantes diélectriques de ces échantillons est de 0,66%. Le **tableau III.6** montre que l'écart relatif entre la constante diélectrique obtenue par la méthode radar et celle obtenue par la sonde coaxiale est d'environ 30%, ce qui est relativement élevé.

Tableau III. 6 : Comparaison des constantes diélectriques des deux méthodes pour $Sr=0\%$. (C.D. pour Constante Diélectrique).

	C.D. Radar (-)	C.D. Coaxiale (-)	Écart Relatif(%)
S1 ($Sr=0\%$)	4,09	5,30	30

D'autre part, sur les figures ci-dessous sont représentées les mesures de la sonde coaxiale faites sur les carottes de béton contaminé des séries S1 et S1.2 pour un degré de saturation $Sr=100\%$. Comme précédemment, les mesures ont été effectuées en différents points sur chacune des faces 1 et 2 (trois points de mesure par face). Les **figures III.23** et **III.24** montrent respectivement la variation de la constante diélectrique et la variation du facteur de pertes en fonction de la fréquence pour un béton contaminé avec 30g/L de NaCl (béton S1).

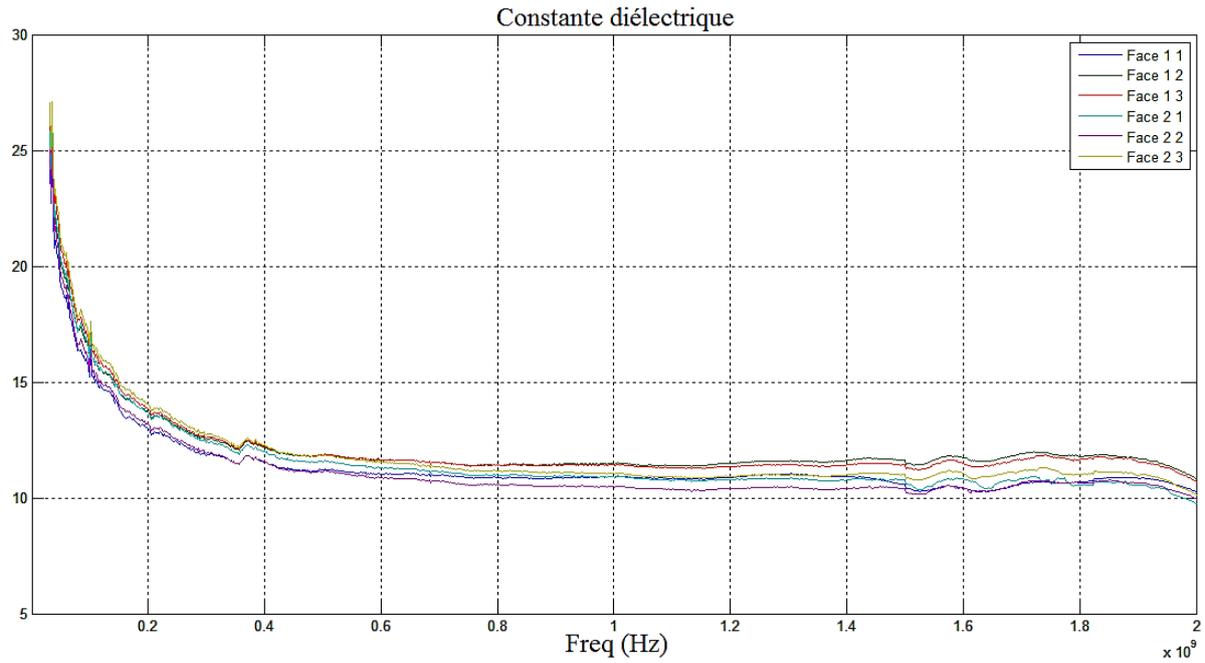


Figure III. 23 : Constante diélectrique d'un béton contaminé avec 30g/L de NaCl (Sr=100%)

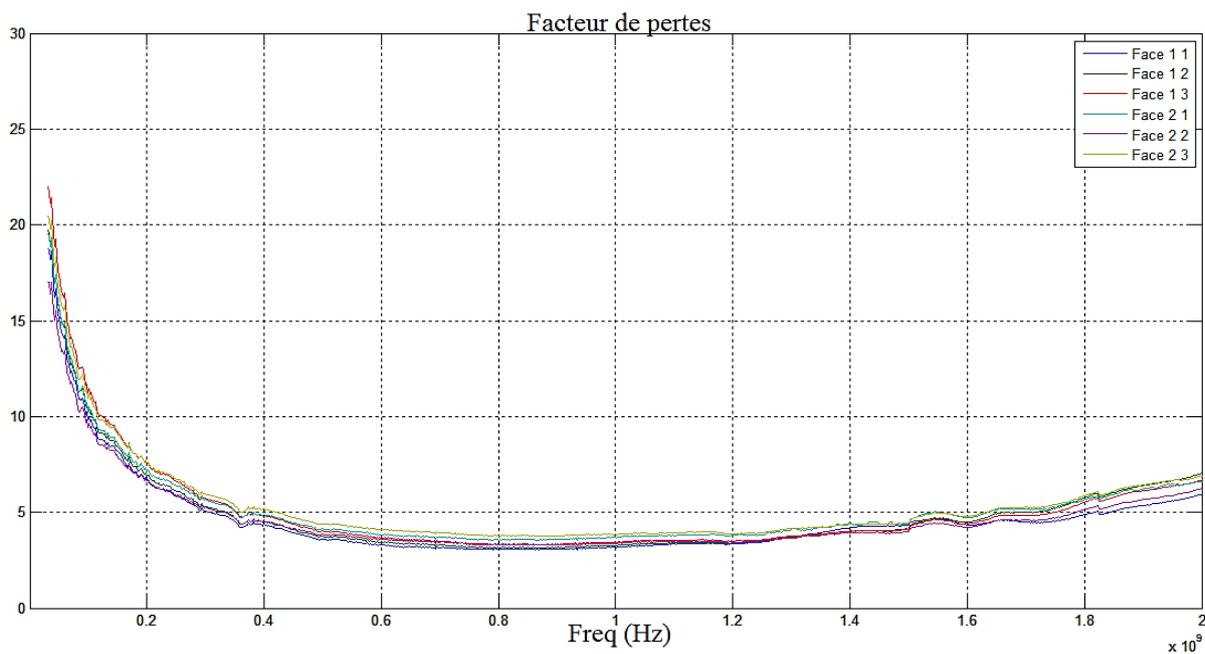


Figure III. 24 : Facteur de pertes d'un béton contaminé avec 30g/L de NaCl (Sr=100%)

Pour une fréquence centrale de 1GHz, la **figure III.23** montre que la constante diélectrique moyenne d'un béton contaminé avec 30g/L de NaCl est d'environ 11,05, tandis que le facteur de pertes moyen d'un béton contaminé avec 30g/L de NaCl est d'environ 3,39 (**figure III.24**).

Les **figures III.25** et **III.26** représentent respectivement la variation de la constante diélectrique et la variation du facteur de pertes en fonction de la fréquence pour un béton contaminé avec 120g/L de NaCl (béton S1.2).

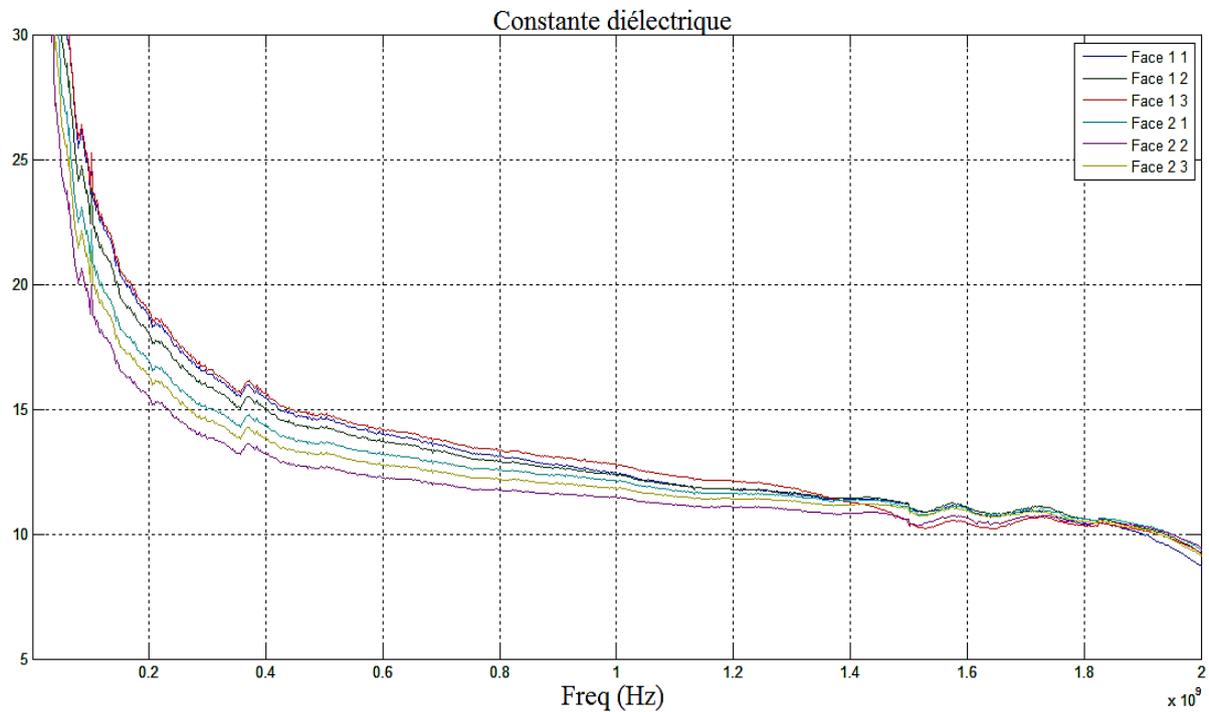


Figure III. 25 : Constante diélectrique d'un béton contaminé avec 120g/L de NaCl (Sr=100%)

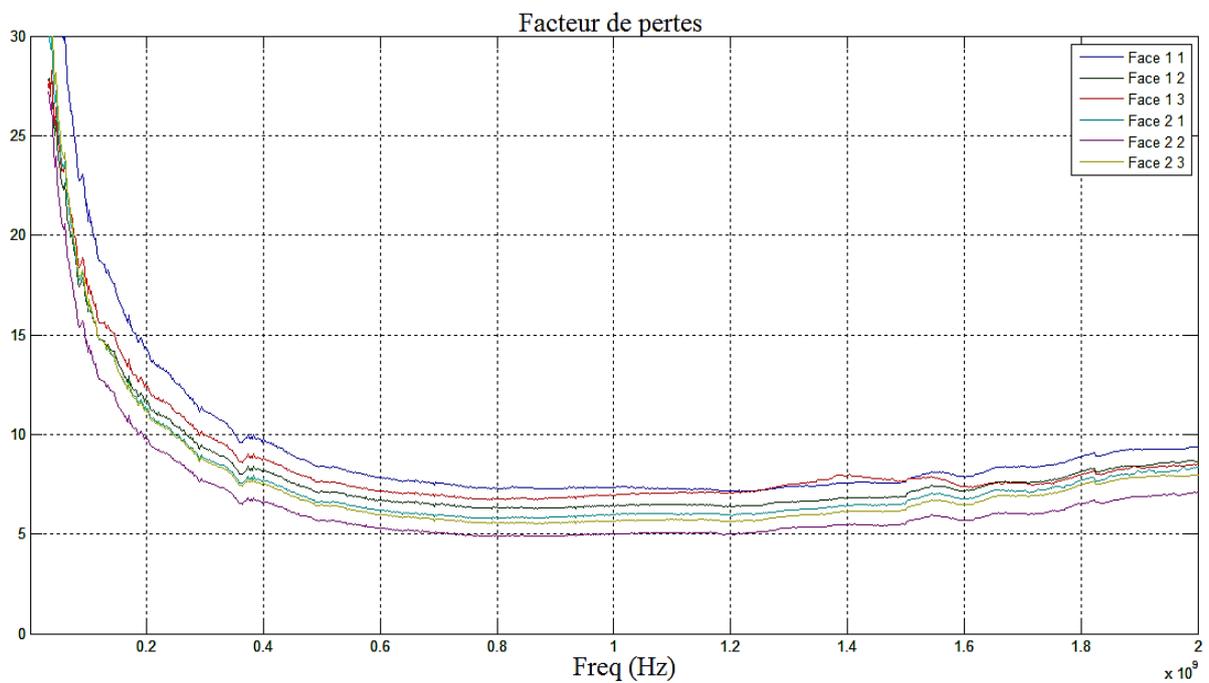


Figure III. 26 : Facteur de pertes d'un béton contaminé avec 120g/L de NaCl (Sr=100%)

De même, pour une fréquence centrale de 1GHz, la **figure III.25** montre que la constante diélectrique moyenne d'un béton contaminé avec 120g/L de NaCl est d'environ 12,24 et la **figure III.26** montre que le facteur de pertes moyen pour un béton contaminé avec 120g/L de NaCl est d'environ 6,07.

Le **tableau III.7** montre que l'écart relatif des constantes diélectriques moyennes de la méthode à la sonde coaxiale par rapport à la méthode radar est de 11,7% pour un béton contaminé avec 30g/L de NaCl, et est de 17,8% pour un béton contaminé avec 120g/L de NaCl.

Tableau III. 7 : Comparaison des constantes diélectriques (C.D.) moyennes de la méthode radar et de la sonde coaxiale pour une fréquence de 1GHz.

	C.D. Radar (-)	C.D. Coaxiale (-)	Écart Relatif(%)
S1 (Sr=100%)	9,90	11,06	11,7
S1.2 (Sr=100%)	10,39	12,24	17,8

III.9 Conclusion

Différents modes de contamination ont été considérés dans cette étude sur plusieurs séries d'échantillons préparés avec la même formulation. Ces échantillons subissent le même cycle de conditionnement, à savoir un premier séjour en chambre humide durant 28 jours, puis un séchage dans une étuve à 80°C durant deux mois. Pour certaines modes de contamination, certains échantillons subissent une homogénéisation dans une étuve à 80°C dont la durée est égale à la durée totale du premier séchage, ce conditionnement étant nécessaire pour obtenir une répartition homogène de la solution saline à l'intérieur de la porosité du béton.

D'autre part, nous avons vu que deux configurations de mesure GPR sont utilisées, la configuration en fixed-offset et la configuration en transmission. En prenant comme valeurs de référence les mesures en transmission il a été possible de déterminer une méthode de mesure de la vitesse à partir des signaux réfléchis sur le fond des dalles. Cette méthode de mesure fait intervenir un nouveau mode de détermination de l'écart de temps entre les signaux de l'onde directe et de réflexion.

Enfin, une méthode de mesure des paramètres électromagnétiques par une sonde coaxiale à terminaison ouverte, développée par EDF&RD, a également été présentée. Les valeurs de constante diélectrique issues de cette méthode pourront être comparées avec celles calculées à partir des mesures de vitesse GPR afin de voir si on obtient les mêmes valeurs sur les deux types de méthodes.

III.10 Références

- [24] T. Chaussadent, G. Arliguie. (1999). “AFREM test procedures concerning chlorides in concrete : extraction and titration methods”. *Materials and structures*. Volume 32, Pages 230 – 234 ;
- [25] V. Guihard, F. Taillade, J. P. Balayssac, B. Steck, J. Sanahuja, F. Deby. (2017). “Modelling the behavior of an open-ended coaxial probe to assess the permittivity of heterogeneous dielectrics solids”. *38th PIERS in St Petersburg, Russia*.

Chapitre IV

Résultats et analyses

IV. Résultats et analyses.

IV.1 Séries d'échantillons S0, S1 et S1.2

Dans cette section, les résultats sur les séries d'échantillons de béton S0, S1 et S1.2 sont présentés. Aussi, rappelons ici que les séries S1 et S1.2 ont été contaminées de façon à obtenir une répartition homogène de la solution saline. Dans un premier temps, nous verrons l'influence de la teneur en eau et de la présence des chlorures sur la sensibilité des ondes radar. Ensuite, dans un second temps, les résultats sur les vitesses de propagation des ondes radar des séries S0, S1 et S1.2 seront présentés. Enfin, nous verrons l'impact d'une contamination homogène d'une solution saline sur les amplitudes normalisées des séries d'échantillon de béton S1 et S1.2.

IV.1.1 Les signaux radar

La **figure IV.1-a** montre un exemple de la variation d'amplitude des différents signaux radar des séries S0 (0g/L de NaCl), S1 (30g/L de NaCl) et S1.2 (120g/L de NaCl) en fonction du temps et en fonction de la concentration en chlorures (ici l'acronyme « Ch » correspond à la concentration en NaCl en gramme par litre), et cela pour un degré de saturation donné. Dans le cas présent, le degré de saturation est fixé à $S_r=100\%$.

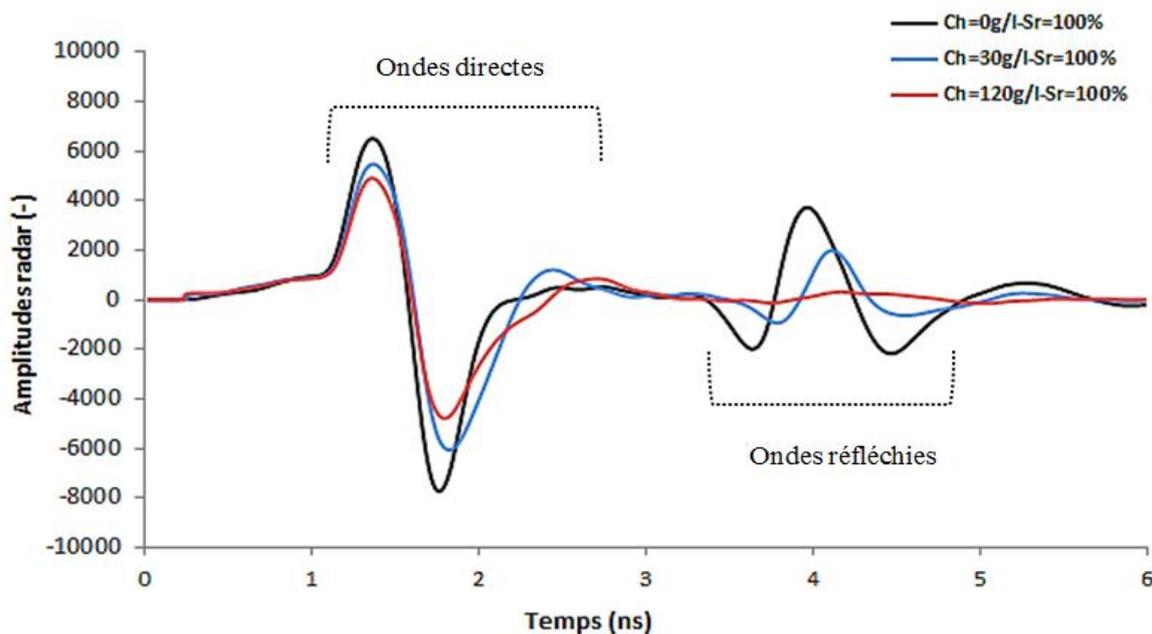


Figure IV. 1-a : Signaux radar pour des corps d'épreuve saturés et contaminés ou non par des chlorures.

Cette figure montre que l'amplitude de l'onde directe et de l'onde réfléchie diminue avec l'augmentation de la contamination en chlorure. Aussi, en plus de la diminution d'amplitude, un léger décalage temporel est observé sur les signaux radar lorsque la concentration en sel augmente (0g/L de NaCl à 120g/L de NaCl). On peut donc en conclure que les signaux radar sont sensibles à la présence des ions chlorures dans la solution interstitielle du béton, ce qui se traduit par des variations significatives de l'amplitude mais moins marquées sur la vitesse.

D'autre part, sur la **figure IV.1-b** sont représentées les variations de l'amplitude sur la durée du signal en fonction du degré de saturation ($S_r=50\%$ et $S_r=100\%$), et cela pour une concentration en NaCl de 30g/L.

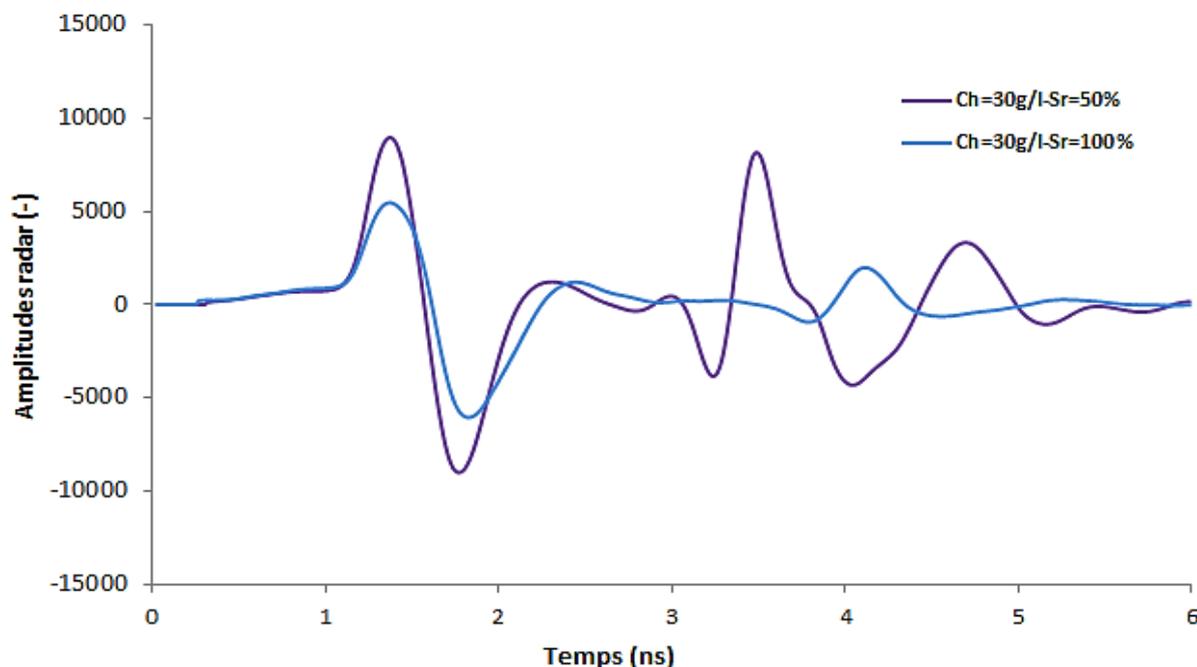


Figure IV. 1-b : Variation de l'amplitude radar en fonction du temps et du degré de saturation.

L'amplitude de l'onde directe et de l'onde réfléchie représentée sur cette figure diminue avec l'augmentation du degré de saturation. À l'inverse des signaux précédents un décalage temporel significatif est observé lorsque le degré de saturation des échantillons de béton augmente. Les signaux radar sont donc également sensibles à la présence d'eau dans les pores capillaire du béton.

Par conséquent, les **figures IV.1-a** et **IV.1-b** montrent que les signaux radar sont à la fois sensibles à la présence d'eau dans la porosité du béton, et d'ions chlorures dans la solution interstitielle du béton. Ces variations vont donc être analysées dans les paragraphes qui suivent.

IV.1.2 Vitesses de propagation : Séries S0, S1 et S1.2

La **figure IV.2-a** représente les variations de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques (EM) des séries S0, S1 et S1.2 en fonction de la teneur en eau volumique. On remarque que la vitesse de propagation des séries d'échantillons de béton S0, S1 et S1.2 diminue avec l'augmentation de la teneur en eau volumique. Cependant, la vitesse semble ne pas varier de façon significative avec l'augmentation de la concentration en chlorure.

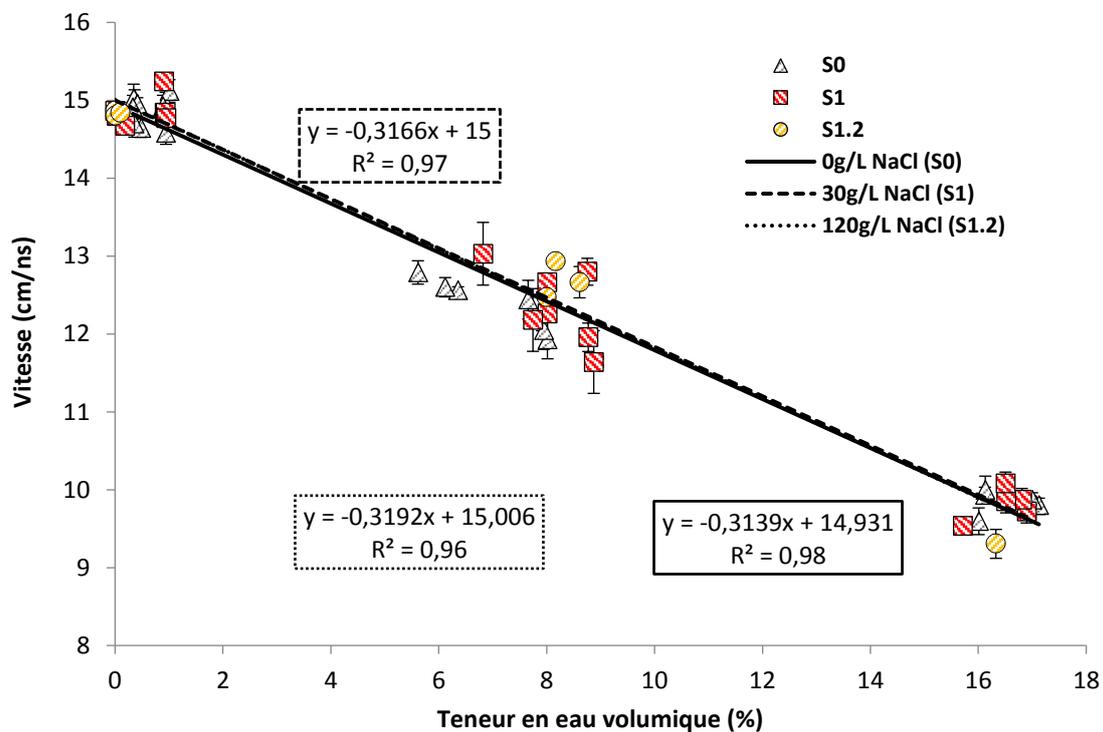


Figure IV. 2-a : Variation de la vitesse de propagation en fonction de la teneur en eau pour les séries S0, S1 et S1.2.

Les **figures IV.2-b** et **IV.2-c** représentent les valeurs moyennées de la vitesse de propagation des séries S0, S1 et S1.2 pour un degré de saturation $S_r=50\%$ et de $S_r=100\%$. Sur la **figure IV.2-b**, le coefficient de variation des valeurs moyennées des échantillons de béton S0 est de 2,01%, celui de S1 est 3,26% et celui de S1.2 est de 1,28%. Aussi, l'écart relatif de la vitesse pour la série S1 par rapport à la série S0 est de 0,2%, tandis que l'écart relatif de la vitesse de la série S1.2 par rapport à la série S0 est de 2,5%.

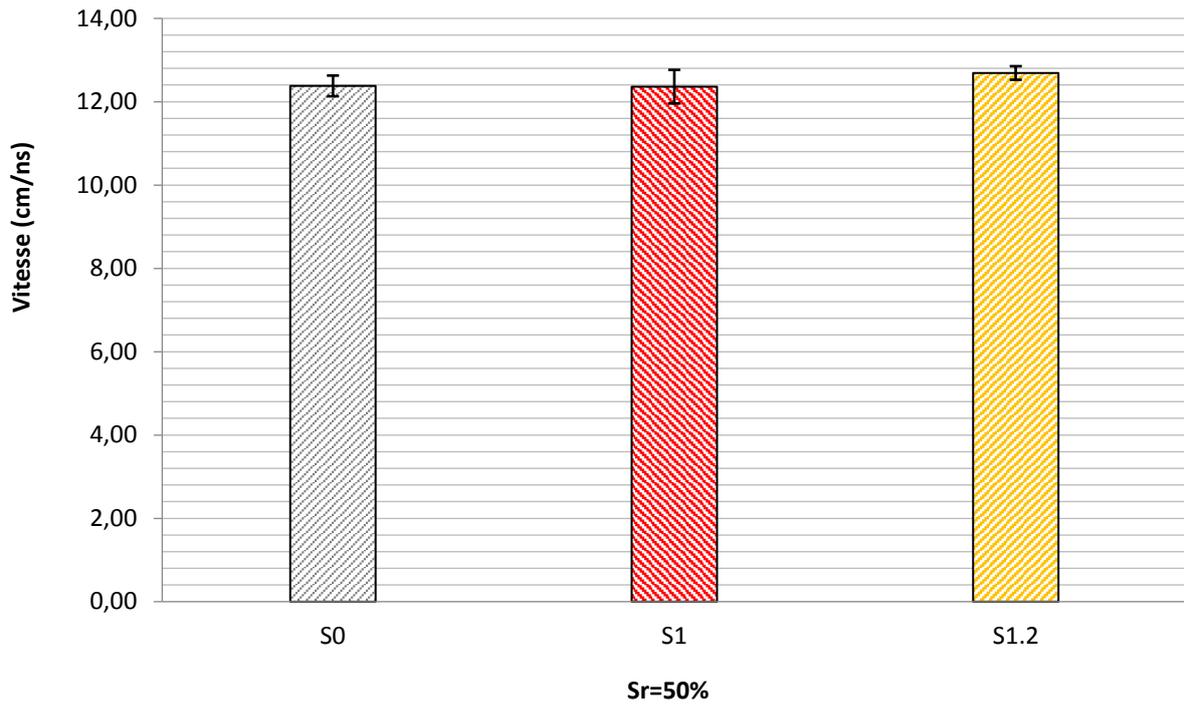


Figure IV. 2-b : Vitesse de propagation des séries S0, S1 et S1.2 pour un degré de saturation $S_r=50\%$.

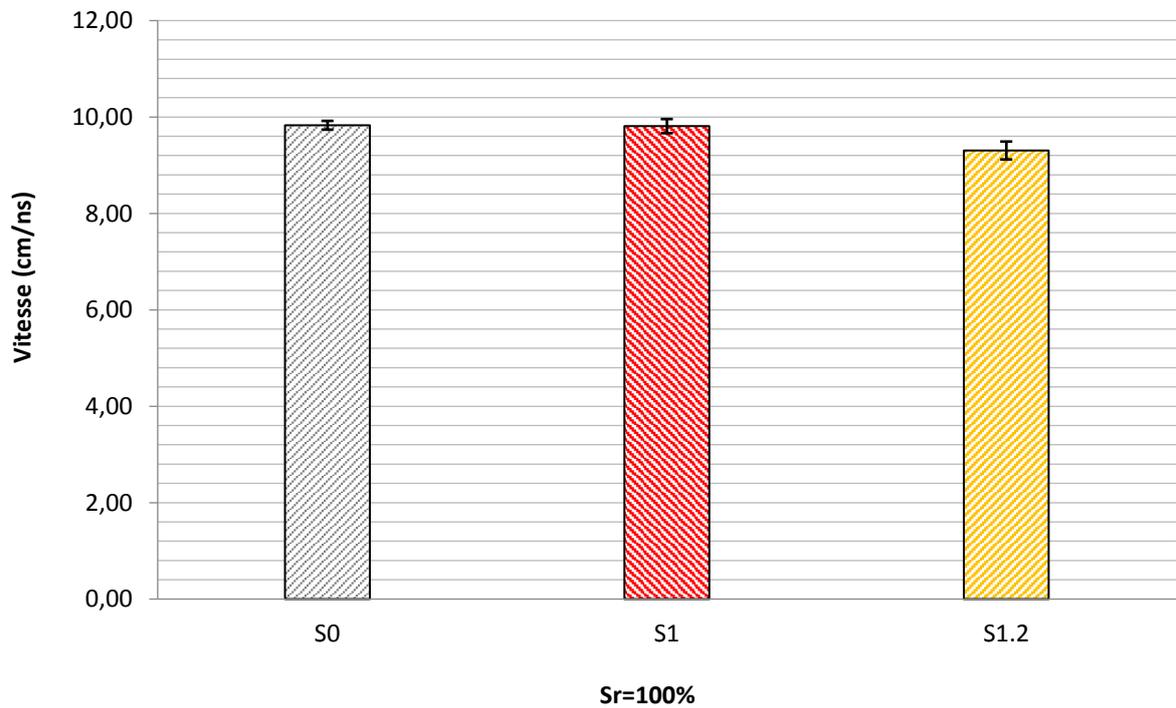


Figure IV. 2-c : Vitesse de propagation des séries S0, S1 et S1.2 pour un degré de saturation $S_r=100\%$.

D'autre part, sur la **figure IV.2-c**, le coefficient de variation des valeurs moyennées est de 0,93% sur la série S0, de 1,5% sur la série S1 et de 2% sur la série S1.2. On remarque tout

d'abord qu'une diminution de la vitesse de propagation est observée entre les degrés de saturation $S_r=50\%$ et $S_r=100\%$. Néanmoins, pour un degré de saturation donné, on observe quasiment la même valeur de vitesse sur les différentes séries d'échantillon de béton. En effet, l'écart relatif de la vitesse de propagation des ondes EM de la série S1 par rapport à la série S0 est de 0,2%, alors que l'écart relatif de la vitesse de propagation de la série S1.2 par rapport à S0 est de 5%. Les écarts relatifs sont donc négligeables.

Par conséquent, les résultats obtenus pour la vitesse de propagation des séries d'échantillons de béton S0, S1 et S1.2, montrent que celle-ci n'est pas influencée par la présence des ions chlorures. En revanche elle est fortement influencée par la présence d'eau dans la porosité du béton.

IV.1.3 Amplitudes radar : Séries S0, S1 et S1.2

IV.1.3.1 Amplitude normalisée de l'onde directe (O.D.) : Séries S0, S1 et S1.2

Sur la **figure IV.3-a** sont représentées les variations de l'amplitude normalisée de l'onde directe en fonction de la teneur en eau volumique pour les séries d'échantillons de béton S0, S1 et S1.2. Sur cette figure, l'amplitude normalisée de l'onde directe diminue de façon linéaire avec l'augmentation de la teneur en eau volumique. De plus, l'augmentation de la concentration en chlorure diminue l'amplitude normalisée (cf. **figure IV.3-a**). En effet, les **figures IV.3-b** et **IV.3-c** montrent, pour les degrés de saturation $S_r=50\%$ et $S_r=100\%$, que l'amplitude normalisée de l'onde directe de chaque série d'échantillon de béton diminue avec l'augmentation de la concentration en chlorure (séries S0, S1 et S1.2).

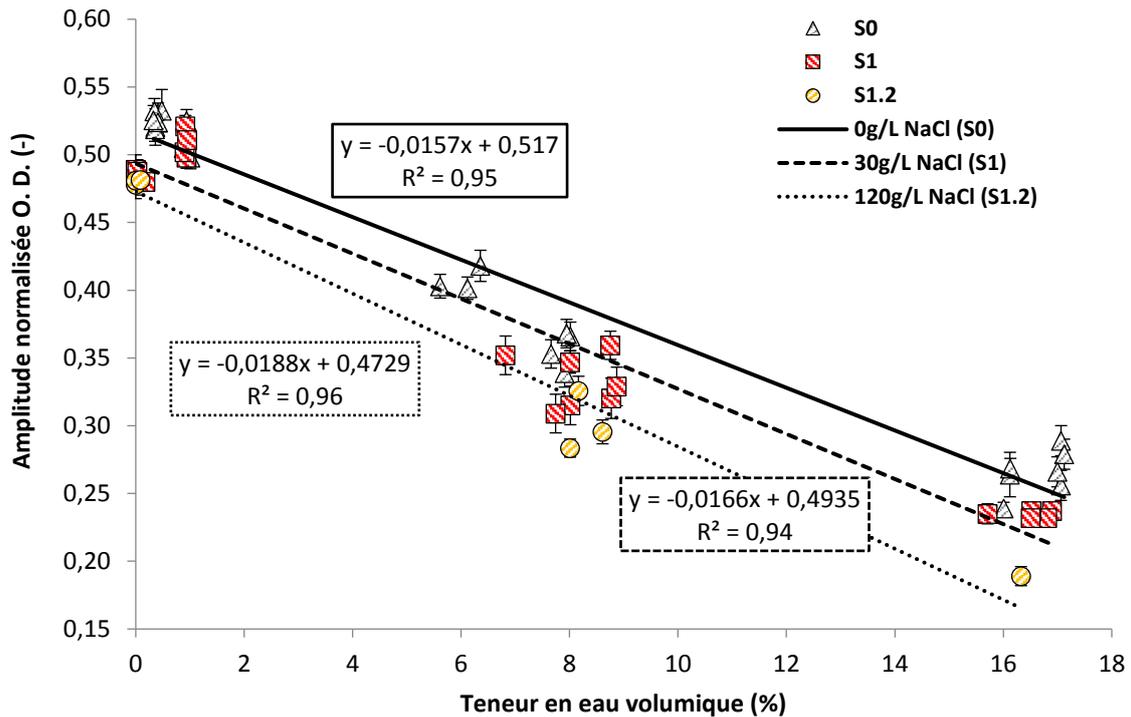


Figure IV. 3-a : Variation de l'amplitude normalisée de l'O.D. en fonction de la teneur en eau pour les séries S0, S1 et S1.2.

Les **figures IV.3-b** et **IV.3-c** représentent, respectivement, la moyenne de l'amplitude normalisée de l'onde directe des séries d'échantillons de béton S0, S1 et S1.2 pour un degré de saturation $S_r=50\%$ et pour un degré de saturation $S_r=100\%$. Sur la **figure IV.3-b**, le coefficient de variation des valeurs moyennées est de 6,6% sur la série S0, de 5,07% sur la série S1 et de 5,34% sur la série S1.2. De plus, l'écart relatif de l'amplitude normalisée des ondes directe de la série S1 par rapport à la série S0 est de 13,2% tandis que l'écart relatif de la série S1.2 par rapport à la série S0 est de 21,1%. Ici, les écarts relatifs sont significatifs en comparaison des coefficients de variation.

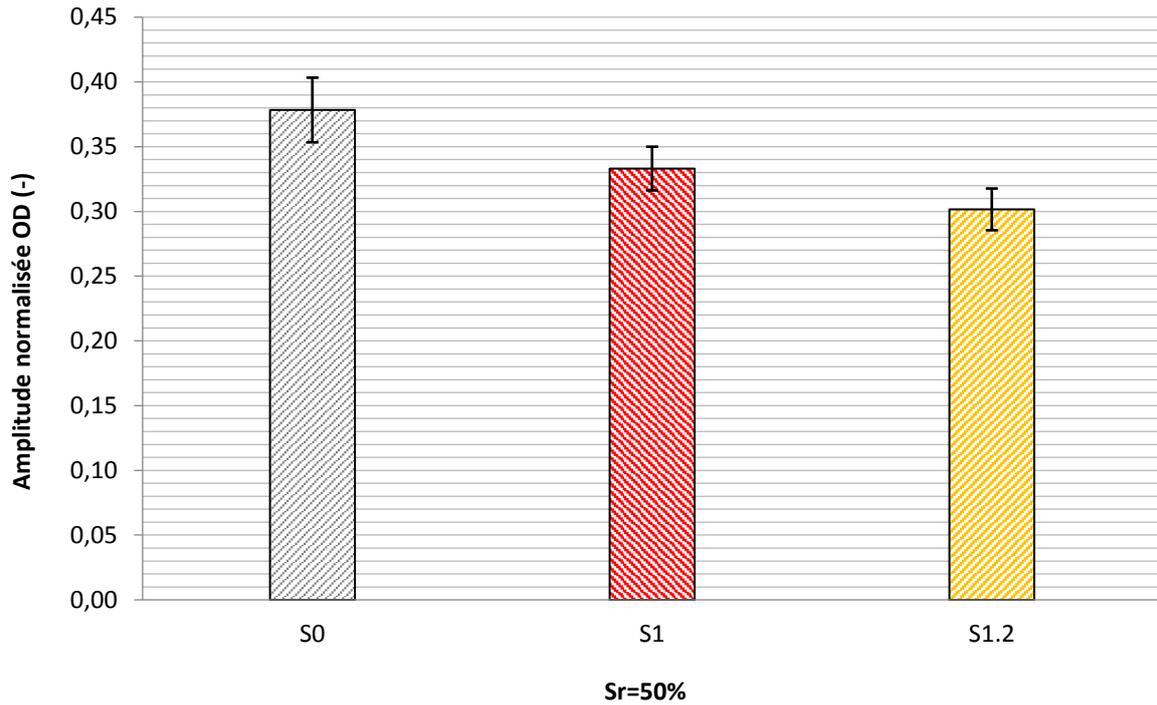


Figure IV. 3-b : Amplitude normalisée de l'O.D. des séries S0, S1 et S1.2 pour un degré de saturation $Sr=50\%$.

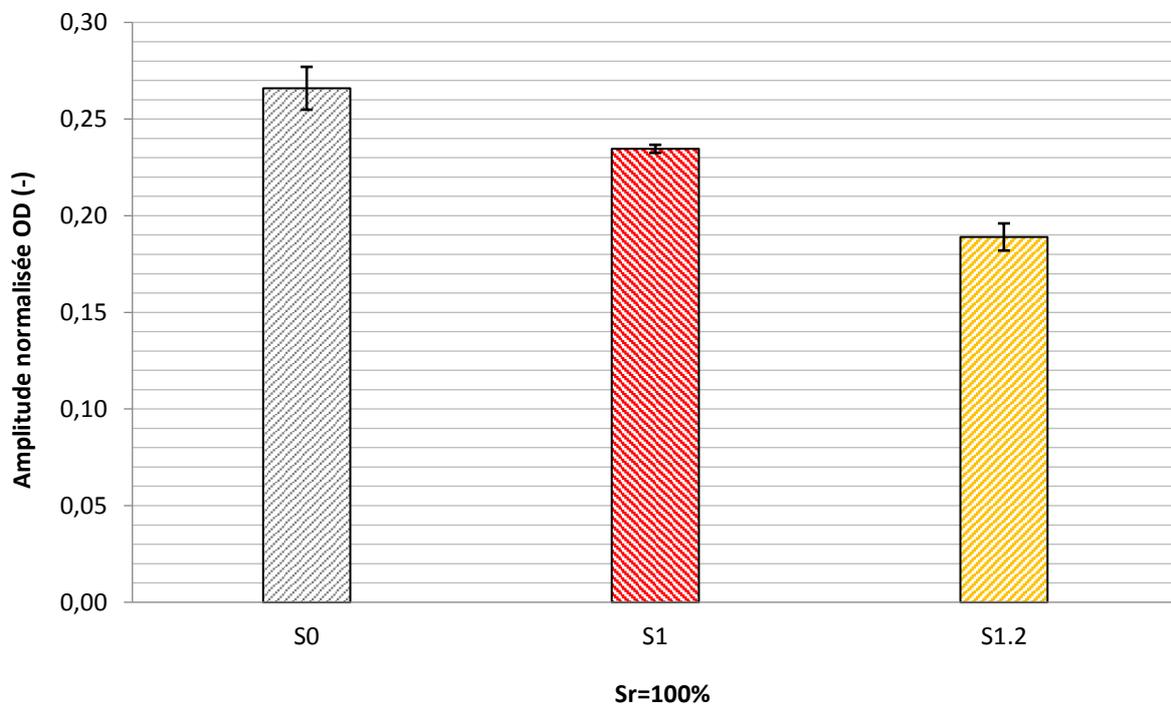


Figure IV. 3-c : Amplitude normalisée de l'O.D. des séries S0, S1 et S1.2 pour un degré de saturation $Sr=100\%$.

Sur la **figure IV.3-c**, le coefficient de variation des valeurs moyennées est de 4,17% sur la série S0, de 0,89% sur la série S1 et de 3,71% sur la série S1.2. L'écart relatif de l'amplitude normalisée de la série S1 par rapport à la série S0 est de 14,8%, alors que l'écart relatif de l'amplitude normalisée de la série S1.2 par rapport à la série S0 est d'environ 30%. Nous avons donc des écarts relatifs plus importants sur les amplitudes normalisées des ondes directes si le béton est saturé.

Par conséquent, l'amplitude normalisée de l'onde directe des séries d'échantillons de béton S1 et S1.2 varient non seulement avec l'augmentation de la teneur en eau, mais aussi avec l'augmentation de la teneur en chlorure. Des travaux [18, 26] expliquent que lorsque la teneur en eau et la teneur en chlorure augmentent dans la porosité du béton, cela a pour effet d'augmenter la constante diélectrique du béton à cause de la présence d'eau et d'augmenter le facteur de perte du béton à cause de la présence des ions chlorures. Ces deux paramètres, l'eau libre et les ions chlorures, ont pour effets d'augmenter la conductivité du béton et conduit généralement à une atténuation du signal EM rayonné. Nous avons ici les effets de l'atténuation géométrique, diminution de la densité d'énergie rayonnée avec la distance de propagation de l'onde EM, et les effets de l'atténuation par absorption, polarisation d'orientation des molécules d'eau libres et des ions chlorures sous l'effet d'un champ EM (voir **figure II.13**), diminution du lobe de rayonnement de l'onde EM avec l'augmentation de de la teneur en eau (voir **figures II.22 et II.23**).

IV.1.3.2 Amplitudes normalisées des ondes réfléchies (O.R.) : Séries S0, S1 et S1.2

Sur la **figure IV.4-a** est représentée la variation de l'amplitude normalisée de l'onde réfléchie des séries d'échantillons de béton S0, S1 et S1.2 en fonction de la teneur en eau volumique. Sur cette figure, l'amplitude normalisée de l'onde réfléchie diminue fortement avec l'augmentation de la teneur en eau volumique et l'augmentation de la concentration en chlorure. Cependant, cette forte diminution d'amplitude normalisée des ondes réfléchies peut être expliquée par la plus grande distance parcourue par l'onde EM réfléchie à l'intérieur de l'échantillon de béton saturé (cf. **figure III.9**) [27], ce qui va augmenter l'effet de l'atténuation géométrique.

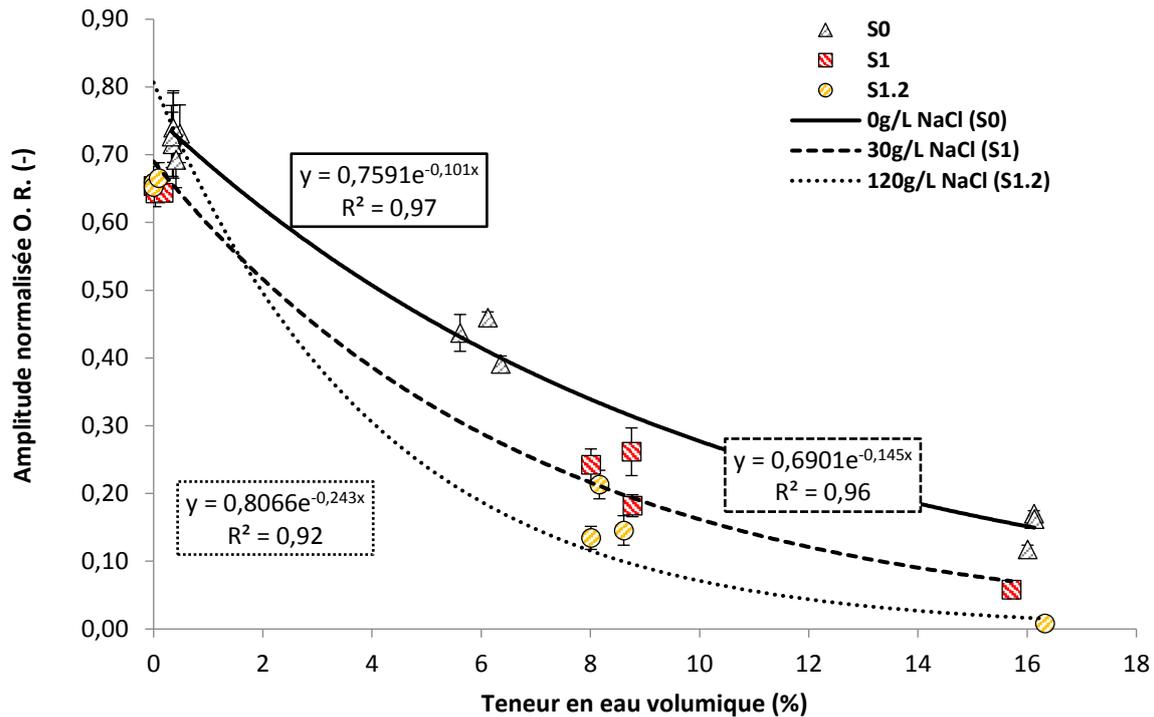


Figure IV. 4-a : Variation de l'amplitude normalisée de l'O.R. en fonction de la teneur en eau les séries S0, S1 et S1.2.

Par ailleurs, les **figures IV.4-b** et **IV.4-c** représentent, respectivement, les valeurs moyennées des amplitudes normalisées des ondes réfléchies sur les séries d'échantillons de béton S0, S1 et S1.2 pour un degré de saturation $S_r=50\%$ et pour un degré de saturation $S_r=100\%$. Sur la **figure IV.4-b**, l'écart relatif de l'amplitude normalisée de l'onde réfléchie de la série S1 par rapport à la série S0 est de 46,5%, tandis que l'écart relatif de l'amplitude normalisée de l'onde réfléchie de la série S1.2 par rapport à la série S0 est de 62,8%.

De plus, sur la **figure IV.4-c**, l'écart relatif de l'amplitude normalisée de l'onde réfléchie de la série S1 par rapport à la série S0 est de 60%, alors que l'écart relatif de l'amplitude normalisée de l'onde réfléchie de la série S1.2 par rapport à la série S0 est de 95%. L'atténuation est donc très forte sur la série S1.2, une très forte augmentation des ions chlorure dans la solution interstitielle du béton augmente donc de façon significative l'atténuation par absorption du signal EM, ce qui diminue fortement la réflexion (cf. **figure IV.1-a**).

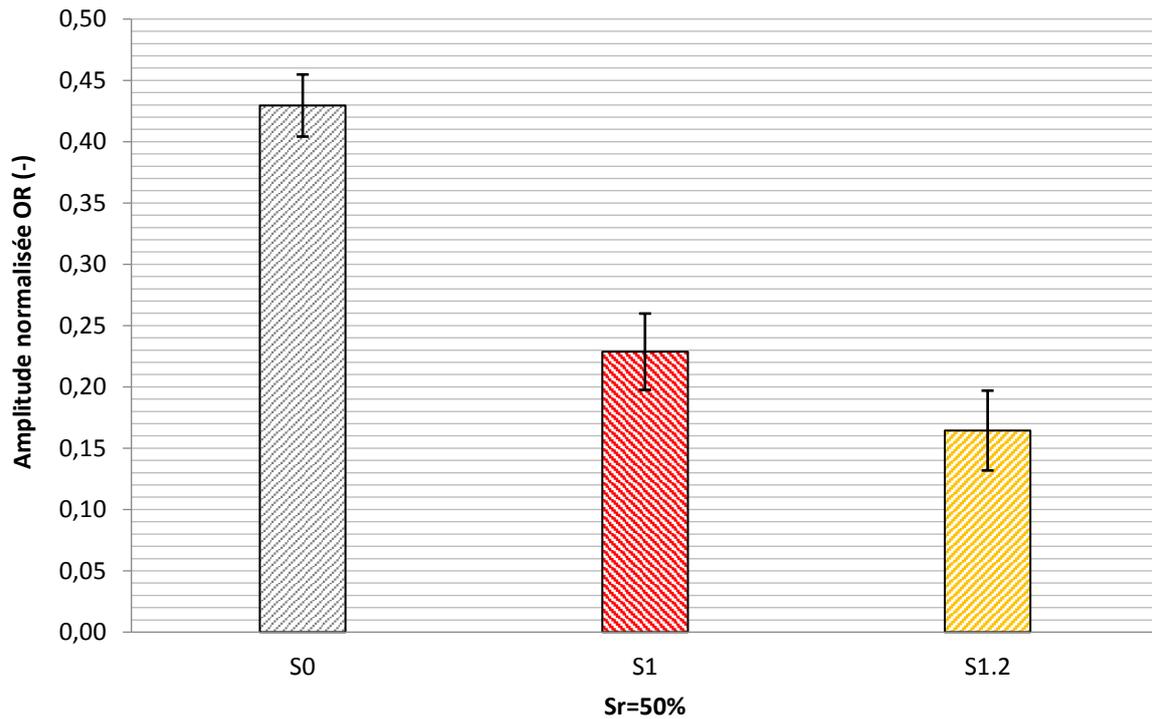


Figure IV. 4-b : Amplitude normalisée de l'O.R. des séries S0, S1 et S1.2 pour un degré de saturation $Sr=50\%$.

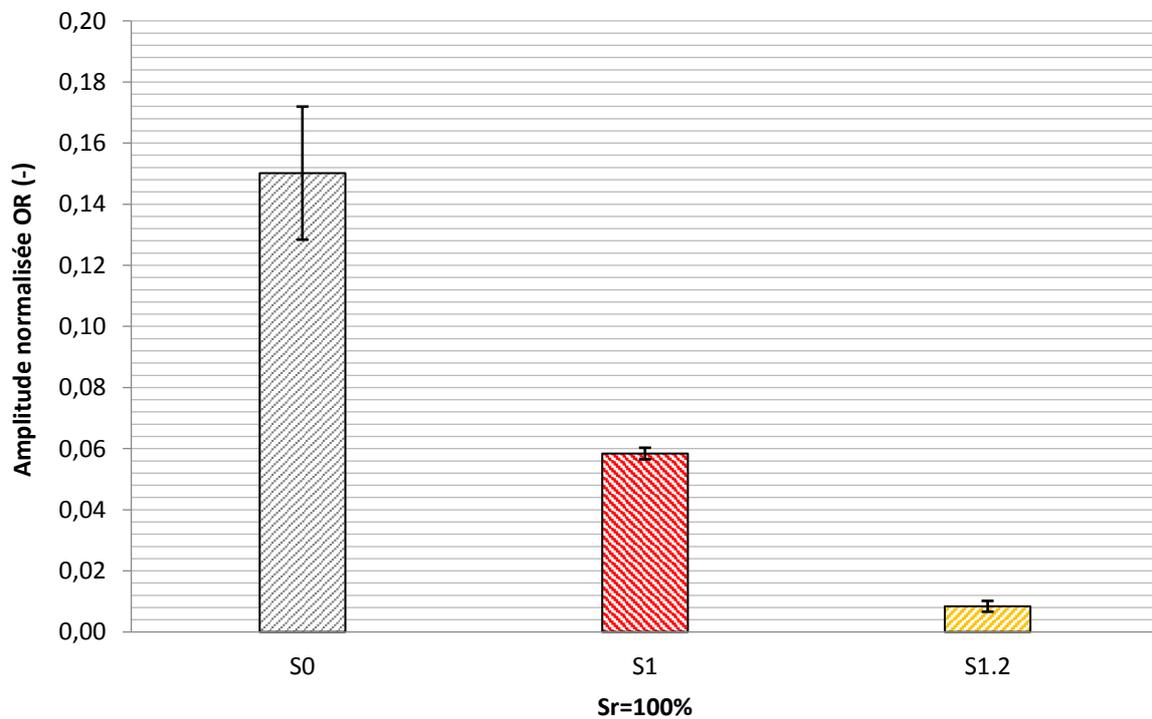


Figure IV. 4-c : Amplitude normalisée de l'O.R. des séries S0, S1 et S1.2 pour un degré de saturation $Sr=100\%$.

Les écarts relatifs de l'amplitude normalisée de l'onde réfléchi sont beaucoup plus élevés que ceux des amplitudes normalisées des ondes directes. Aussi, la **figure IV.4-c** montre que l'atténuation du signal réfléchi augmente avec l'augmentation de la concentration en chlorures. De plus, nous avons vu que l'augmentation de l'eau et de la teneur en chlorure dans les pores du béton a pour effets d'augmenter la conduction ionique et le facteur de pertes. Cela conduit à une diminution de l'énergie EM rayonnée due aux effets de l'atténuation par absorption et de l'atténuation géométrique. Par conséquent, l'atténuation de l'onde EM qui se propage à l'intérieur d'un échantillon de béton saturé est à la fois influencée par la présence d'eau, par la présence des ions chlorures et par distance parcourue de l'onde EM réfléchi dans l'échantillon de béton saturé.

IV.2 Séries d'échantillons S2 (S0 et S1)

Dans ce paragraphe nous présenterons les résultats de la série S2 en les comparant avec les résultats des séries S0 et S1. Aussi, rappelons ici que la série S2 a été contaminée de façon à obtenir un gradient de teneur en chlorure. Dans un premier temps, les résultats de vitesse de la série S2 seront présentés. Puis dans un second temps, nous verrons l'influence du gradient de teneur en chlorure sur les amplitudes normalisées de la série S2.

IV.2.1 Vitesses de propagation : Série S2 (S0 et S1)

La **figure IV.5-a** ci-dessous montre les variations des vitesses de propagation des séries d'échantillons de béton S0, S1 et S2 en fonction de la teneur en eau volumique. A noter ici qu'en plus des degrés de saturation usuels $S_r=0\%$, $S_r=50\%$ et $S_r=100\%$, des valeurs de la série S2 ont été reportées pour les degrés de saturation $S_r=25\%$ et $S_r=75\%$. Par ailleurs, sur la **figure IV.5-a** les vitesses de propagation diminuent de façon linéaire avec l'augmentation de la teneur en eau. En outre, les droites des variations des vitesses montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les trois séries d'échantillons de béton.

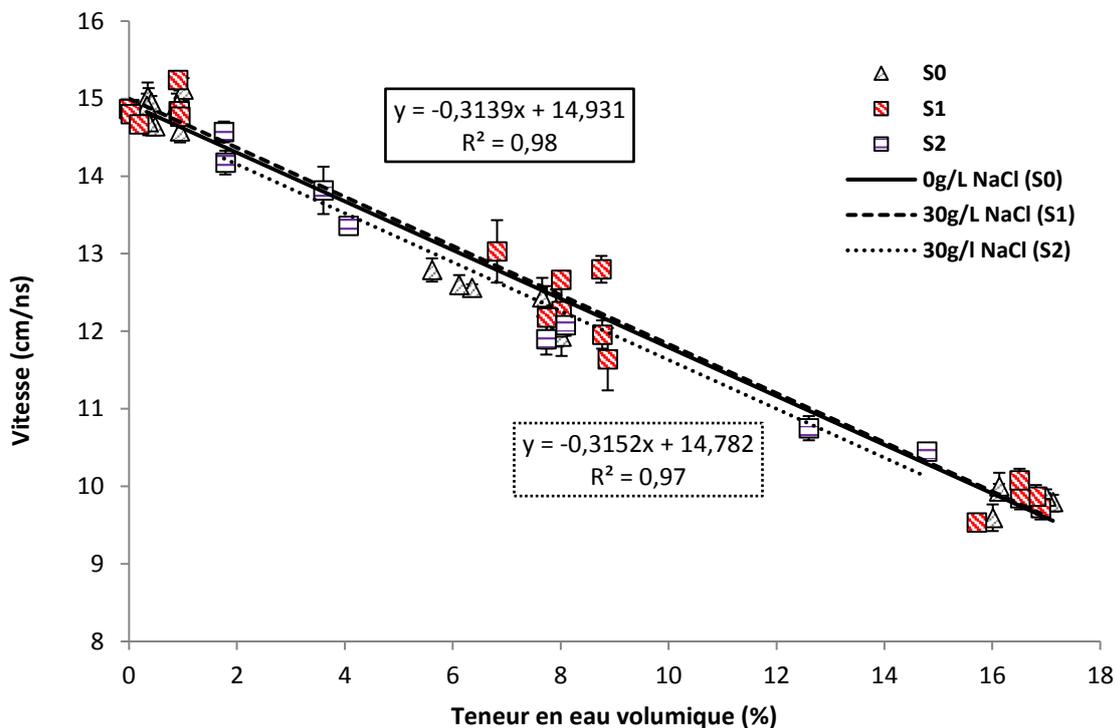


Figure IV. 5-a : Variation de la vitesse de propagation en fonction de la teneur en eau pour les séries S0, S1 et S2.

En effet, sur la **figure IV.5-b** et la **figure IV.5-c** sont reportées les valeurs moyennes des vitesses de propagation des séries d'échantillons S0, S1 et S2 pour un degré de saturation $S_r=50\%$ et pour un degré de saturation $S_r=100\%$. Sur la **figure IV.5-b**, l'écart relatif de la vitesse de propagation de la série S2 est de 3% par rapport à la série S0. Les deux valeurs de vitesse sont donc relativement proches pour un degré de saturation $S_r=50\%$.

Sur la **figure IV.5-c**, l'écart relatif de la vitesse de propagation de la série S2 par rapport à la série S0 est de seulement 6,5%. Cependant, nous avons vu au paragraphe précédent (cf. §IV.1.3.2) que la vitesse est uniquement influencée par la teneur en eau. Par conséquent, l'écart relatif dans ce cas présent ne peut être lié qu'à une présence d'eau beaucoup plus faible dans les pores capillaires des échantillons de béton de la série S2. Cela peut être dû au gradient de teneur à l'intérieur de l'échantillon de béton de la série S2. Cet écart n'est toutefois pas suffisamment important pour être considéré comme représentatif de la forte valeur de la vitesse de propagation sur la série S2 pour un degré de saturation $S_r=100\%$.

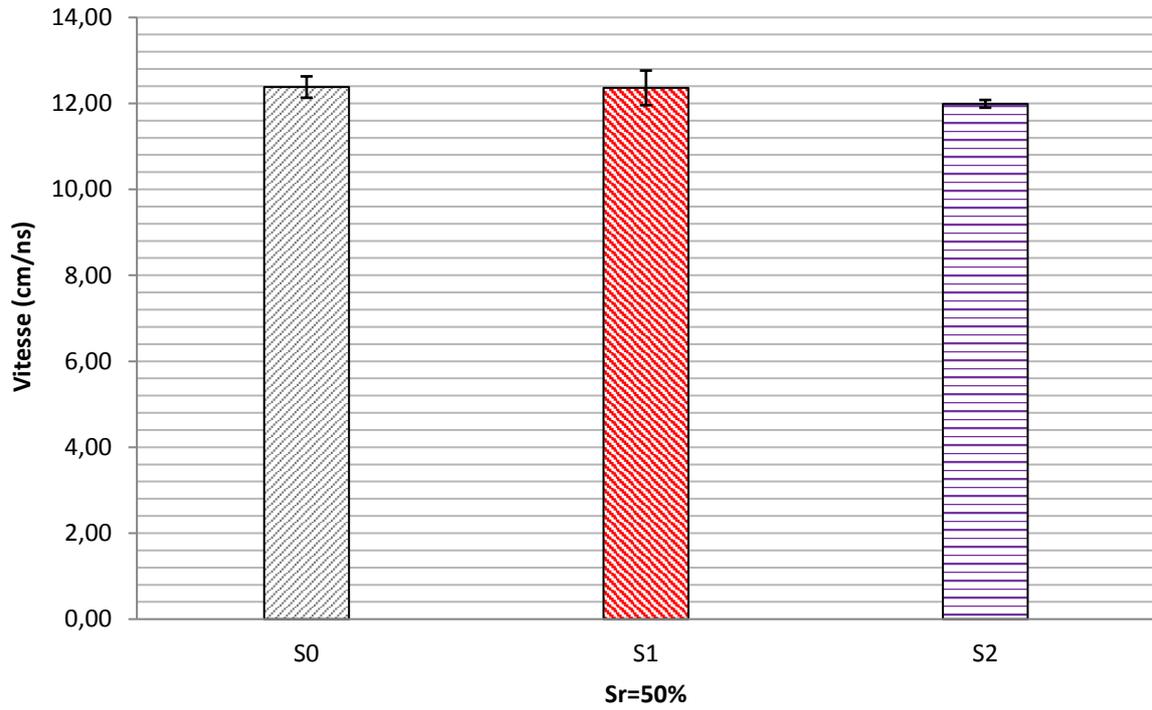


Figure IV. 5-b : Vitesse de propagation des séries S0, S1 et S2 pour un degré de saturation $Sr=50\%$.

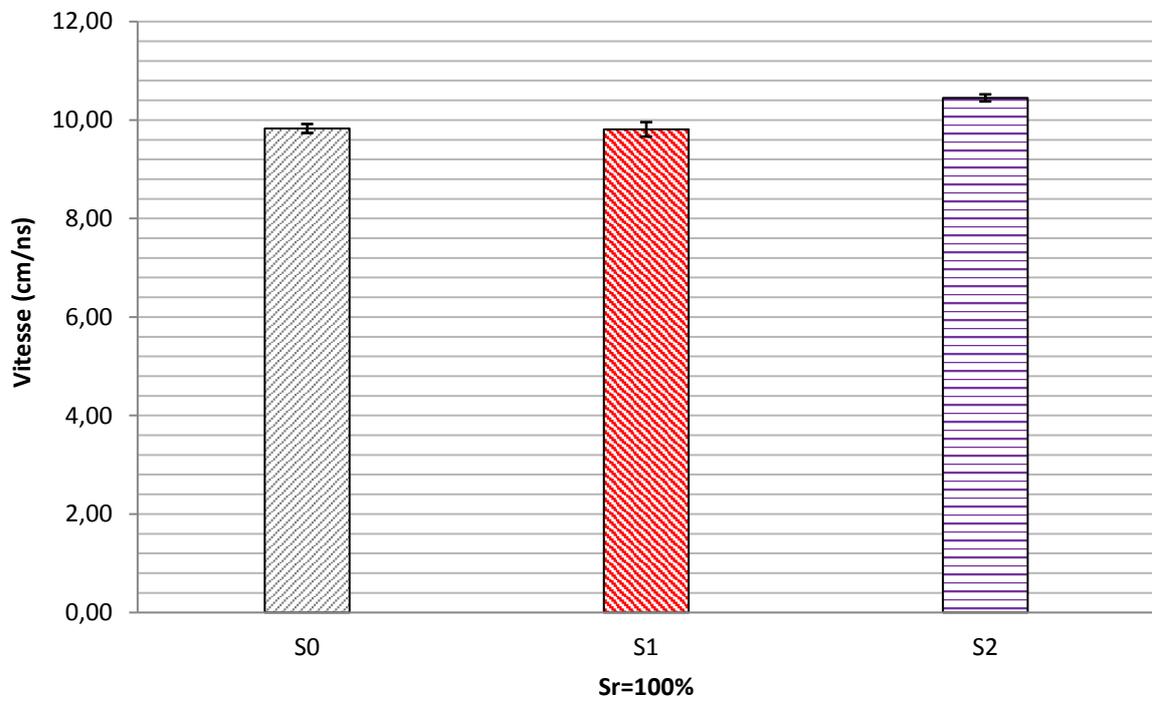


Figure IV. 5-c : Vitesse de propagation des séries S0, S1 et S2 pour un degré de saturation $Sr=100\%$.

Par conséquent, une contamination par gradient de teneur en chlorure n'influence pas de façon significative les vitesses de propagation des ondes radar. En effet, pour le même degré de saturation, on retrouve pratiquement les mêmes valeurs de vitesse que celles obtenues sur les séries S0 et S1. Ainsi, qu'il s'agisse d'une contamination homogène de la solution saline sur l'échantillon de béton, ou d'une contamination par un gradient de teneur en chlorure, la variation de la vitesse de propagation est uniquement influencée par la teneur en eau.

IV.2.2 Amplitudes radar : Série S2 (S0 et S1)

IV.2.2.1 Amplitude normalisée de l'onde directe : Série S2

Les **figures IV.6-a** et **IV.6-b** représentent la variation de l'amplitude normalisée de l'onde directe en fonction de la teneur en eau volumique pour les séries S2, S0 et S1. La **figure IV.6-a** montre que contrairement à ce qu'on observe sur les variations d'amplitude normalisée de l'onde directe des séries S0 et S1 (voir **figure IV.6-b**), la présence de gradient de distribution de la solution interstitielle à l'intérieur des échantillons de béton de la série S2 fait apparaître des paliers d'amplitude normalisée de l'onde directe avec l'augmentation de la teneur en eau.

En effet, entre 1 et 5% de teneur en eau, l'amplitude normalisée de l'onde directe semble ne pas varier, cela conduit alors à l'apparition d'un premier palier. Cependant, entre 5 à 9% de teneur en eau, l'amplitude normalisée de l'onde directe diminue fortement, et cela jusqu'à atteindre un second palier au-delà de 9% de teneur en eau volumique.

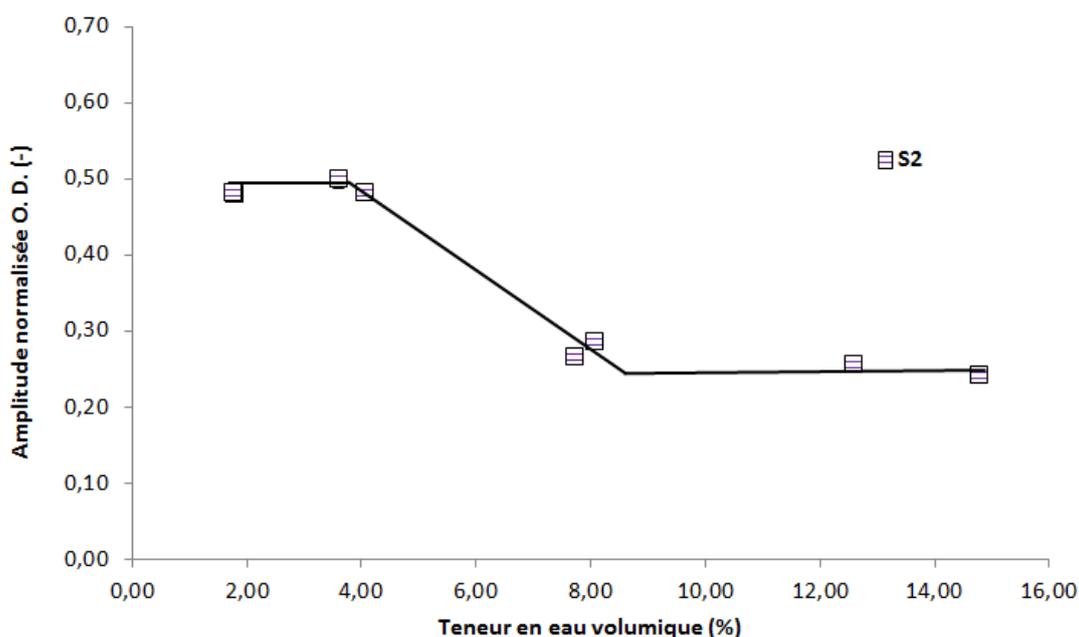


Figure IV. 6-a : Variation de l'amplitude normalisée de l'O.D. de la série S2 en fonction de la teneur en eau volumique.

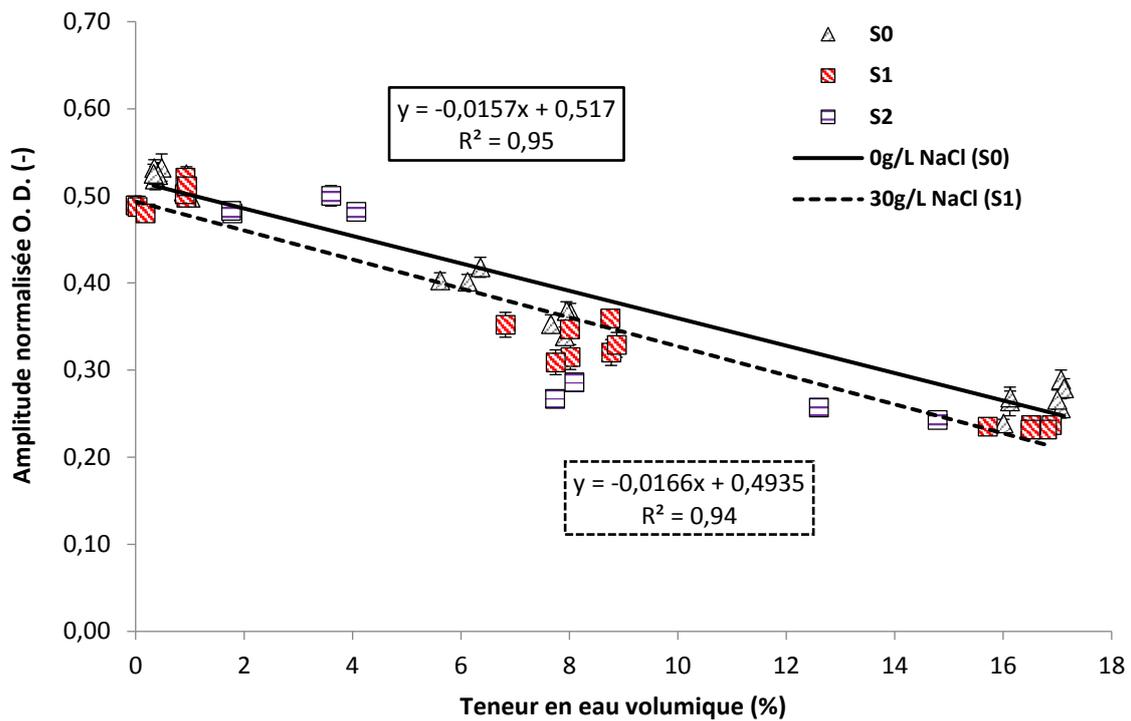


Figure IV. 6-b : Variation de l'amplitude normalisée de l'O.D. en fonction de la teneur en eau pour les séries S0, S1 et S2.

Par ailleurs, sur les **figures IV.6-c** et **IV.6-d** sont représentées les valeurs moyennées des amplitudes normalisées des ondes directes des séries d'échantillons de béton S0, S1 et S2 pour un degré de saturation 50% et de 100%. Sur la **figure IV.6-c**, l'écart relatif de l'amplitude normalisée de l'onde directe de la série S2 par rapport à la série S0 est de 26%. L'amplitude normalisée de l'onde directe de la série S2 est donc beaucoup plus atténuée par les ions chlorure comparée à la série S1, qui est de 13% par rapport à S0, pour un degré de saturation de 50%.

Sur la **figure IV.6-d**, l'écart relatif de l'amplitude normalisée de l'onde directe de la série S2 par rapport à la série S0 est de 11,1%. L'écart relatif de la série S1 par rapport à la série S0 étant de 14,8%. Nous avons donc pratiquement les mêmes atténuations sur les deux séries d'échantillons pour un degré de saturation de 100%.

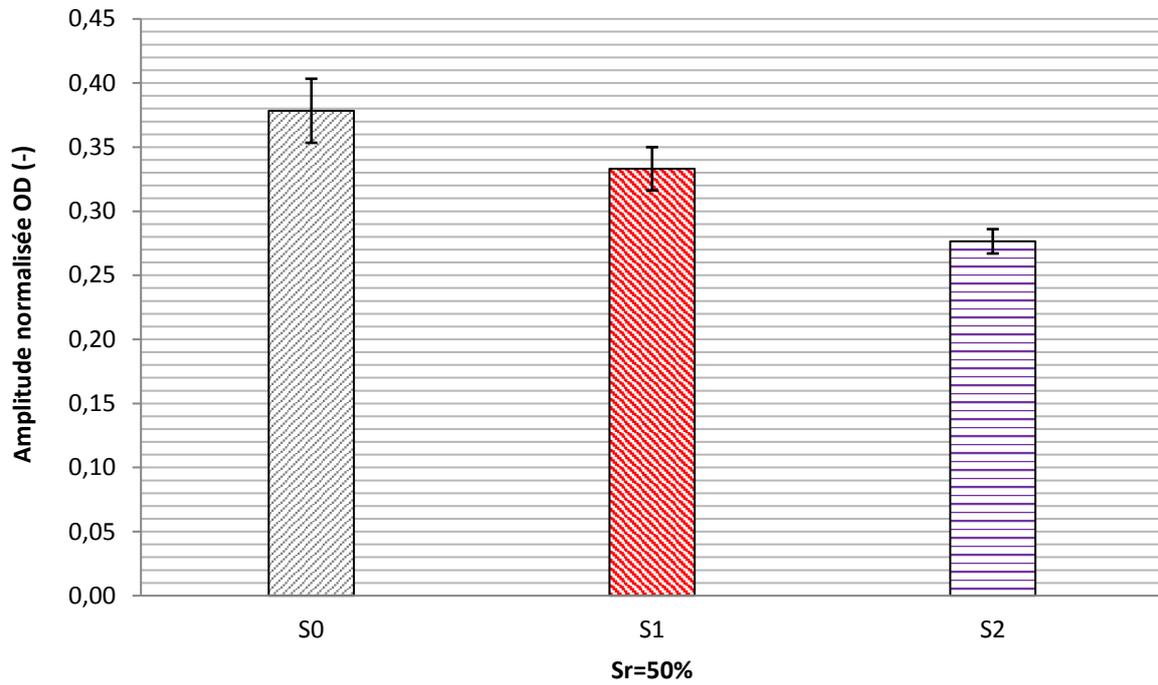


Figure IV. 6-c : Amplitude normalisée de l'onde directe des séries d'échantillons de béton S0, S1 et S2 pour un degré de saturation $Sr=50\%$.

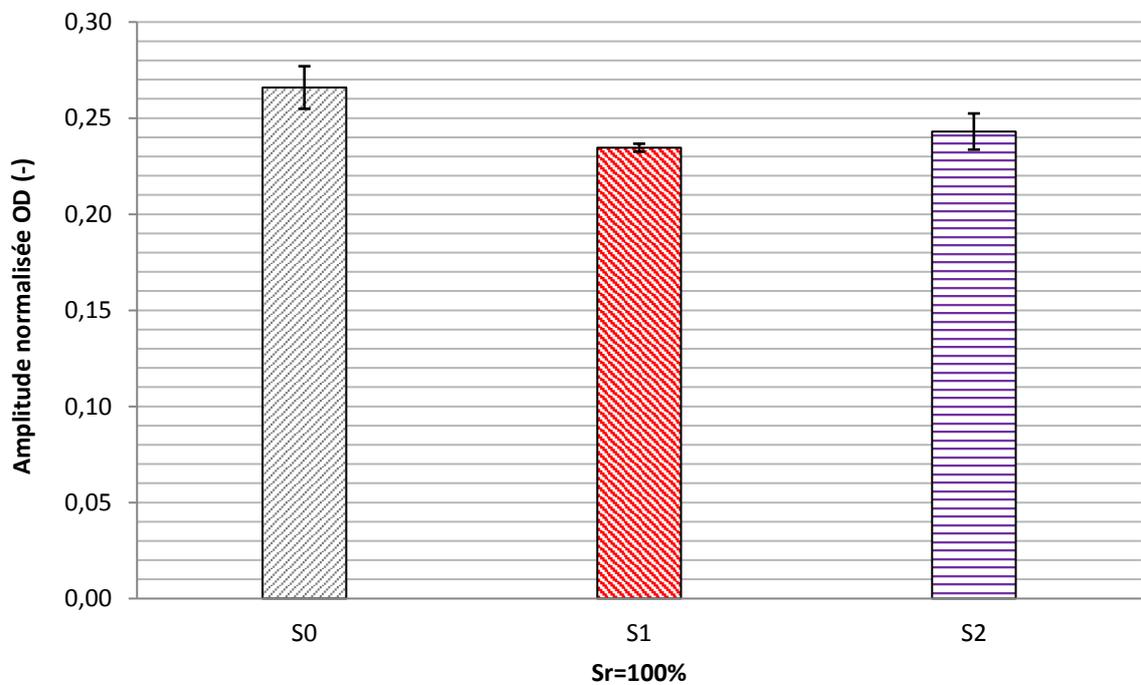


Figure IV. 6-d : Amplitude normalisée de l'onde directe des séries d'échantillons de béton S0, S1 et S2 pour un degré de saturation $Sr=100\%$.

En conclusion, malgré une forte diminution de l'amplitude normalisée de la série S2 pour un degré de saturation $S_r=50\%$ (cf. **figure IV.6-c**), on retrouve toutefois les mêmes valeurs d'amplitude normalisée sur les séries S1 et S2 lorsque le degré de saturation $S_r=100\%$. Cependant, la présence d'un gradient de distribution de la solution interstitielle à l'intérieur des échantillons de béton de la série S2 influence d'avantage l'atténuation de l'amplitude normalisée de l'onde directe lorsque le degré de saturation est de 50%.

IV.2.2.2 Amplitude normalisée de l'onde réfléchie : Série S2

Les valeurs de l'amplitude normalisée de l'onde réfléchie des séries d'échantillons S0, S1 et S2 sont représentées sur la **figure IV.7-a**. Sur cette figure, on observe non seulement une diminution d'amplitude normalisée avec l'augmentation de la concentration en chlorure mais aussi une diminution d'amplitude normalisée avec l'augmentation de la teneur en eau volumique. De plus, on observe la même tendance de variation d'amplitude normalisée sur les deux séries d'échantillon de béton S1 et S2 pour des teneurs en eau volumique plus élevées.

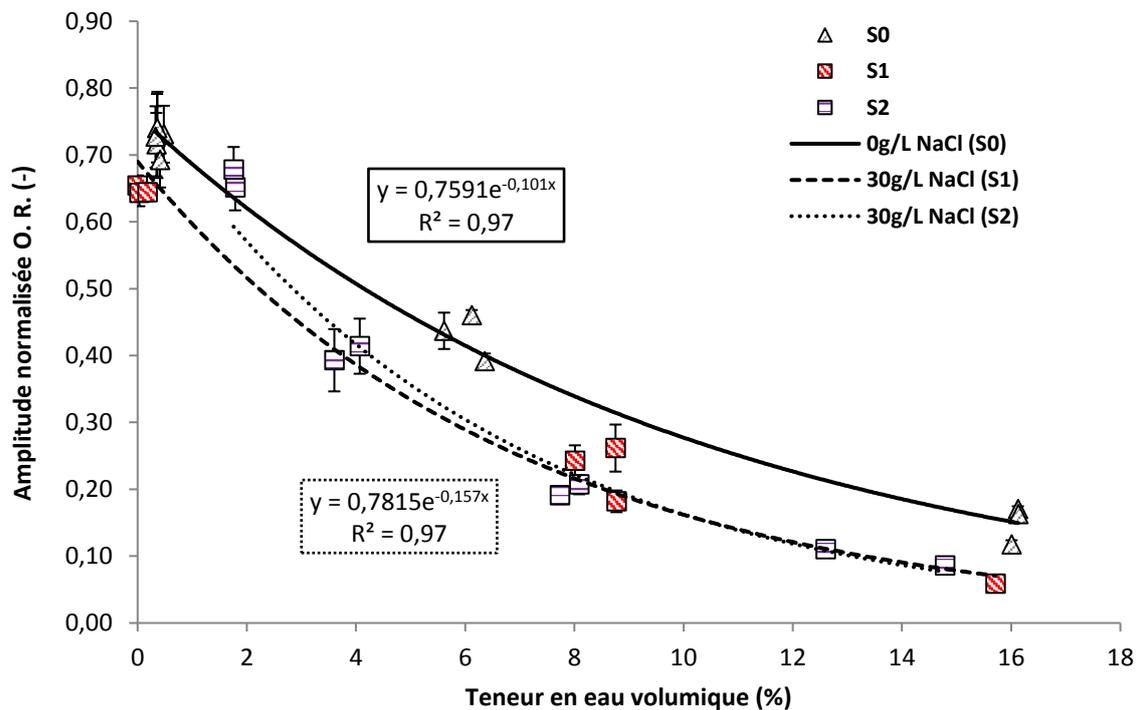


Figure IV. 7-a : Variation de l'amplitude normalisée de l'O.R. des séries S0, S1 et S2 en fonction de la teneur en eau.

Par ailleurs, les **figures IV.7-b** et **IV.7-c** représentent, respectivement, les valeurs moyennées des amplitudes normalisées des ondes réfléchies des séries d'échantillon S0, S1 et S2 pour un

degré de saturation $Sr=50\%$ et pour un degré de saturation $Sr=100\%$. La **figure IV.7-b** montre que l'écart relatif de l'amplitude normalisée de l'onde réfléchie de la série S2 par rapport à la série S0 est de 53,5%. L'amplitude normalisée de l'onde réfléchie de la série S2 est donc plus atténuée par les chlorures comparée à celle de la série S1, avec un écart relatif de 46,5% par rapport à la série S0.

Aussi, les valeurs moyennées représentées sur la **figure IV.7-c** montrent que l'écart relatif de l'amplitude normalisée de l'onde réfléchie de la série S2 par rapport à la série S0 est de 40% pour un degré de saturation $Sr=100\%$. L'amplitude normalisée de l'onde réfléchie de la série S2 est moins atténuée par les chlorures comparée à l'amplitude normalisée de l'onde réfléchie de la série S1, avec un écart relatif de 60% par rapport à la série S0.

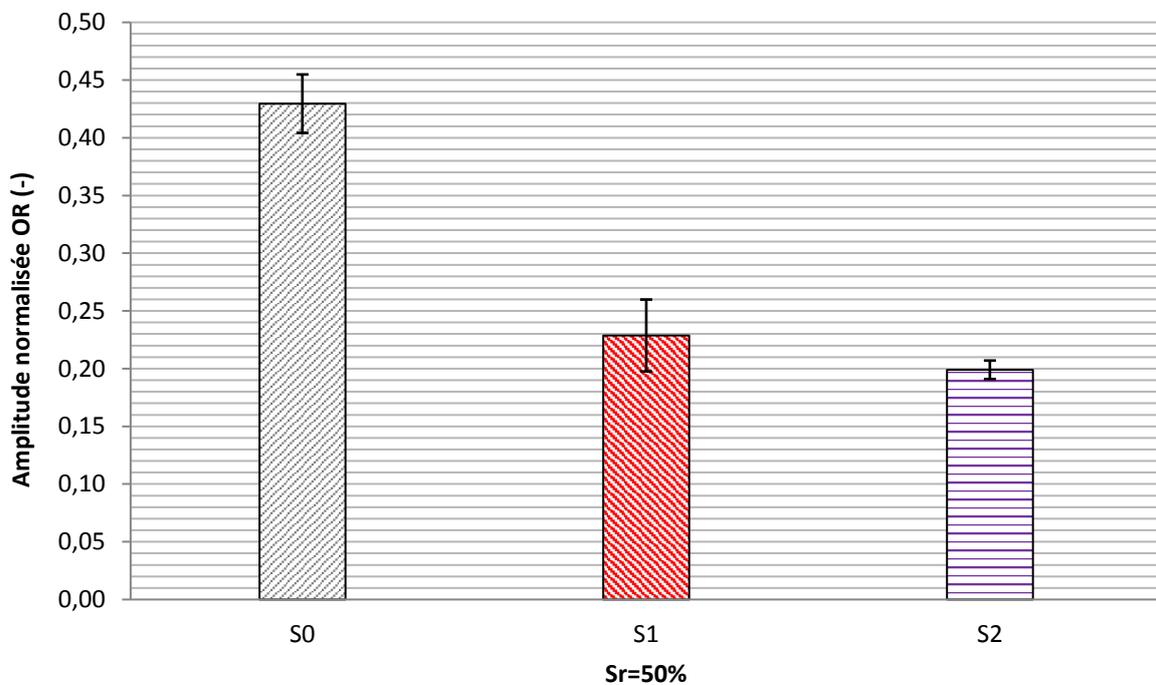


Figure IV. 7-b : Amplitude normalisée de l'onde réfléchie des séries d'échantillons de béton S0, S1 et S2 pour un degré de saturation $Sr=50\%$.

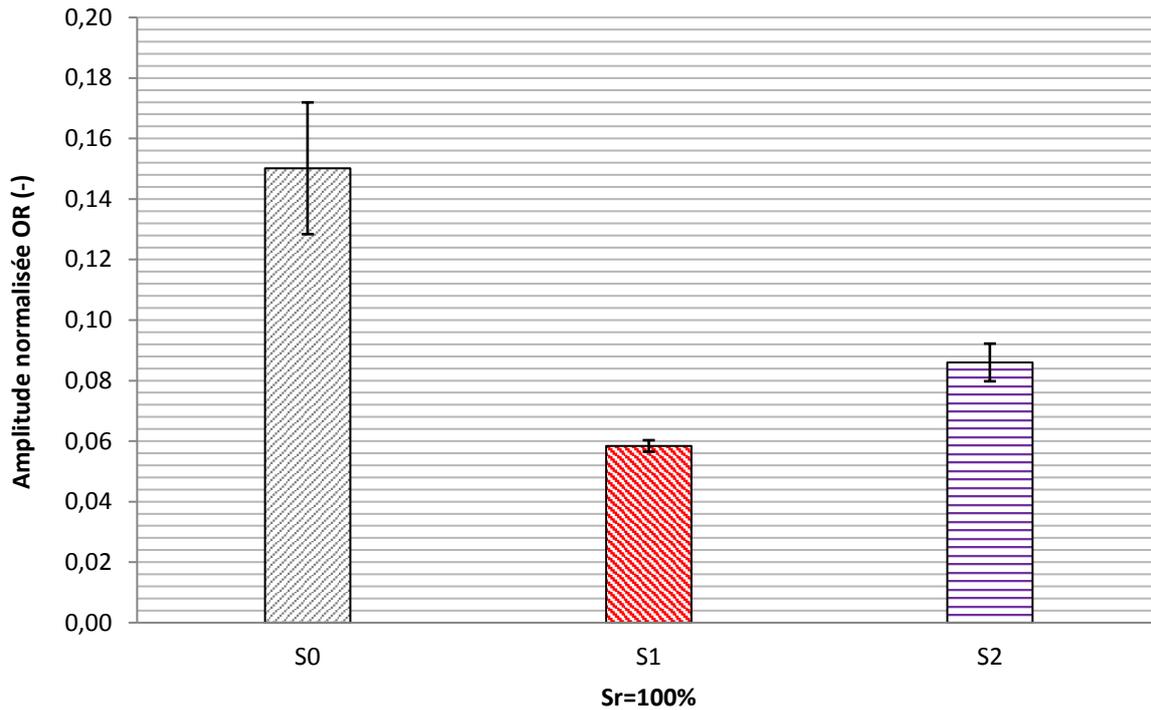


Figure IV. 7-c : Amplitude normalisée de l'onde réfléchie des séries d'échantillons de béton S0, S1 et S2 pour un degré de saturation $S_r=100\%$.

En conclusion, en supposant qu'un gradient subsiste toujours pour $S_r=100\%$, la présence d'un gradient de solution saline dans l'échantillon de béton de la série S2 influence fortement les amplitudes normalisées des ondes directes et réfléchies. Néanmoins, et bien que les écarts relatifs soient élevés entre les deux séries d'échantillons de béton S1 et S2 (pour les degrés de saturation $S_r=50\%$ et $S_r=100\%$), la présence d'un gradient en solution saline ne semble pas provoquer une différence significative de tendance entre les deux courbes de la série S1 et S2 (cf. **figure IV.7-a**). Par conséquent, et sachant que les séries d'échantillons de béton S1 et S2 ont subi une contamination de 30g/L de NaCl mais avec un mode de contamination différent, la différence d'amplitude normalisée observée entre les deux séries d'échantillons de béton S1 et S2 provient, du moins pour la série S2, de la présence d'un gradient dans l'échantillon de béton (cf. **figure III.3**, **figure IV.7-b** et **figure IV.7-c**).

IV.3 Séries d'échantillons S3 (S0, S1 et S2)

Dans cette nouvelle section sont présentés les résultats sur la série d'échantillons de béton S3. Cette série a été contaminée en introduisant 30g/L de NaCl dans l'eau de gâchage. Les résultats de cette série S3 seront comparés avec ceux des séries S0, S1 et S2. Nous verrons donc dans un premier temps les variations des vitesses de propagation en fonction de la teneur

en eau volumique. Ensuite, dans un second temps, les résultats sur les amplitudes normalisées des séries d'échantillons de béton S0, S1, S2 et S3.

IV.3.1 Vitesses de propagation : Série S3

La **figure IV.8-a** représente les variations des vitesses de propagations des séries d'échantillons de béton S0, S1, S2 et S3 en fonction de la teneur en eau volumique. La **figure IV.8-a** montre, entre autres, qu'on obtient la même tendance de vitesse sur les trois séries d'échantillons de béton, c'est-à-dire, une diminution linéaire de la vitesse de propagation avec l'augmentation de la teneur en eau volumique. Par conséquent, l'ajout de 30g/L de NaCl dans l'eau de gâchage ne semble pas influencer de façon significative la vitesse de propagation de la série d'échantillon S3.

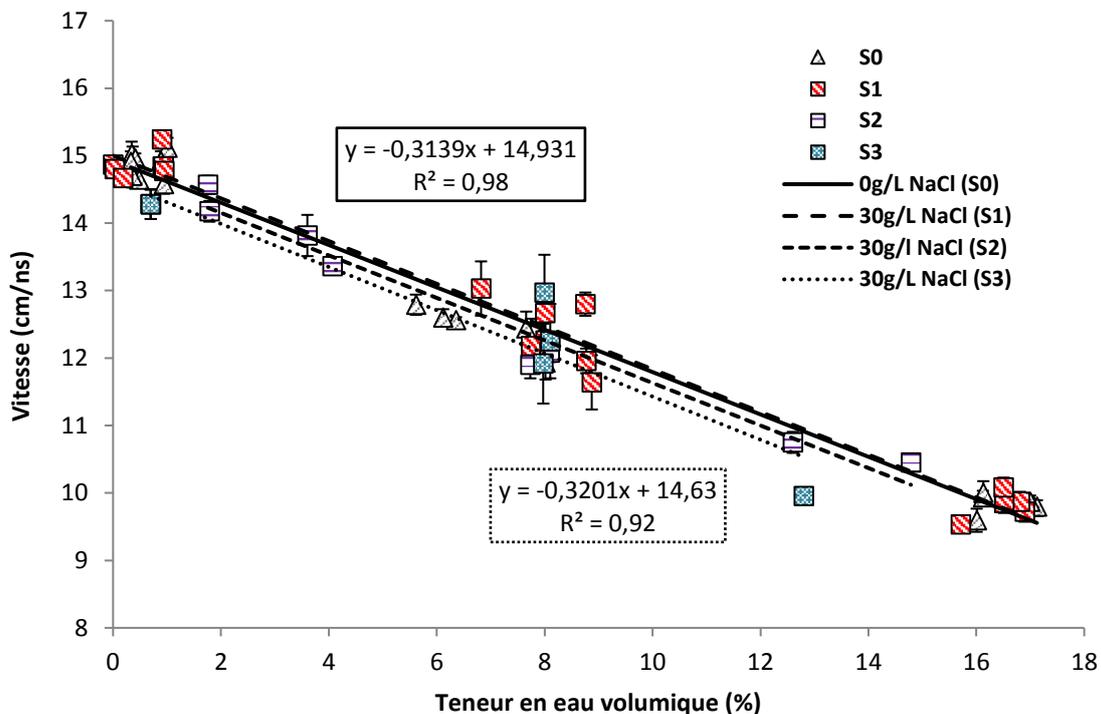


Figure IV. 8-a : Variation de la vitesse de propagation des séries S0, S1, S2 et S3 en fonction de la teneur en eau.

En effet, sur la **figure IV.8-b** et la **figure IV.8-c** sont représentées les valeurs moyennées des vitesses de propagation des séries S0, S1, S2 et S3 pour un degré de saturation $S_r=50\%$ et pour un degré de saturation $S_r=100\%$. On remarque sur la **figure IV.8-b** que l'écart relatif de la vitesse de propagation de la série S3 par rapport à la série S0 est presque nul.

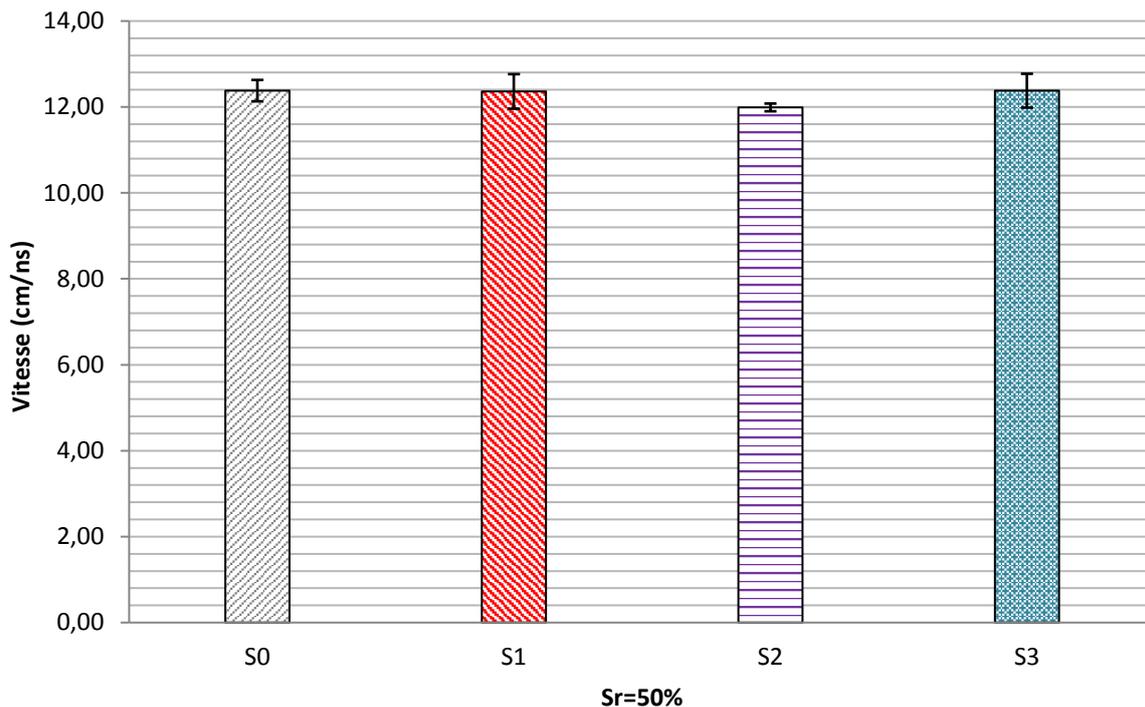


Figure IV. 8-b : Vitesse de propagation des séries d'échantillons de béton S0, S1, S2 et S3 pour un degré de saturation $Sr=50\%$.

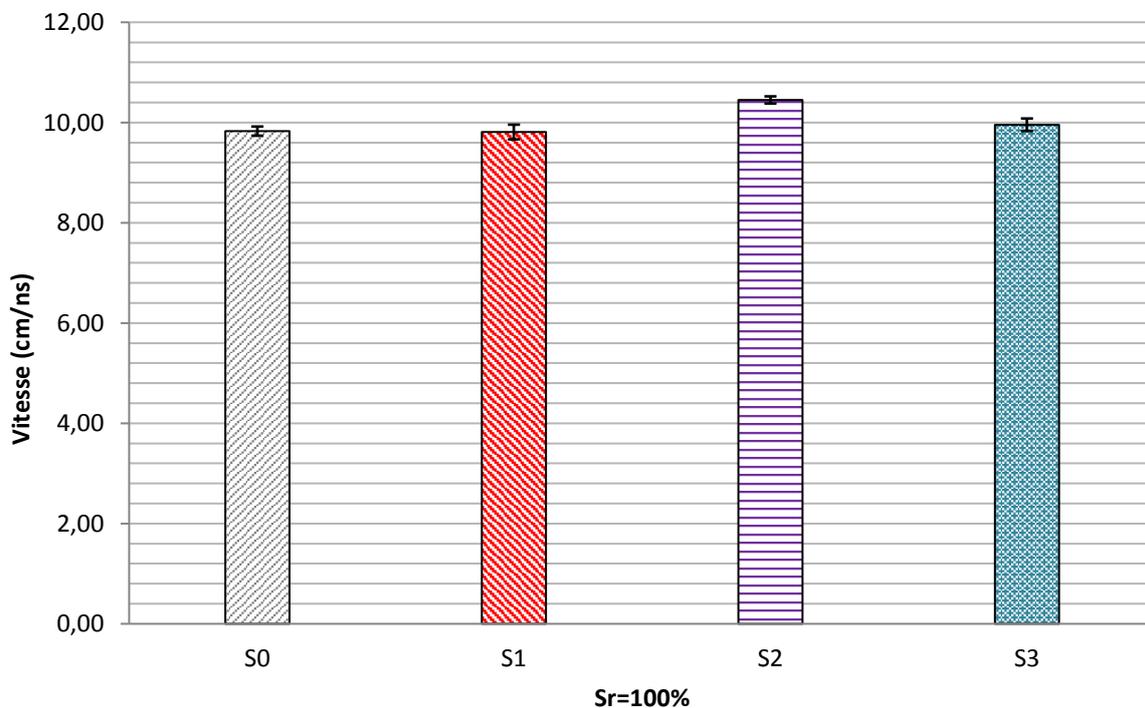


Figure IV. 8-c : Vitesse de propagation des séries d'échantillons de béton S0, S1, S2 et S3 pour un degré de saturation $Sr=100\%$.

Sur la **figure IV.8-c**, l'écart relatif de la vitesse de propagation de la série S3 par rapport à la série S0 est de 1,3%. Nous avons donc des écarts relatifs très faibles, que ce soit pour un degré de saturation de 50% ou de 100%.

En conclusion, les écarts relatifs des vitesses de propagation de la série S3 restent inférieurs à 2% pour les degrés de saturation $S_r=50\%$ et $S_r=100\%$. L'ajout de 30g/L de NaCl dans l'eau de gâchage semble donc ne pas influencer les vitesses de la série S3. On peut donc à nouveau constater que quel que soit le mode de contamination par les chlorures, la vitesse de propagation est uniquement influencée par la teneur en eau.

IV.3.2 Amplitudes radar : Série S3 (S0, S1 et S2)

IV.3.2.1 Amplitude normalisée de l'onde directe : série S3

Les amplitudes normalisées de l'onde directe des séries d'échantillons de béton S0, S1, S2 et S3 sont représentées sur la **figure IV.9-a**. Sur cette figure, on observe une diminution des amplitudes normalisées avec l'augmentation de la teneur en eau volumique. Cependant, on observe que l'amplitude normalisée de l'onde directe des échantillons de la série S3 est beaucoup plus élevées que celles des séries S1 et S2 autour d'une teneur en eau volumique d'environ 8%.

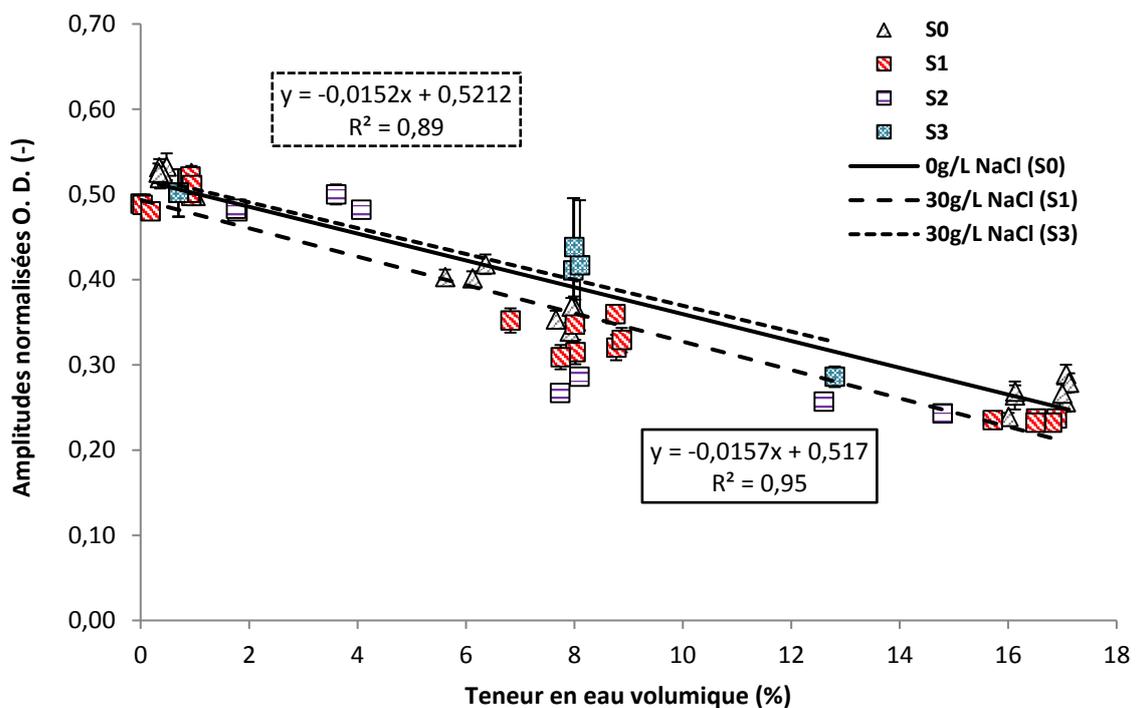


Figure IV. 9-a : Variation de l'amplitude normalisée de l'O. D. en fonction de la teneur en eau pour les séries S0, S1, S2 et S3.

Les **figures IV.9-b** et **IV.9-c** représentent les valeurs moyennées de l'amplitude normalisée de l'onde directe des séries S0, S1, S2 et S3 pour un degré de saturation $S_r=50\%$ et pour un degré de saturation $S_r=100\%$. Sur la **figure IV.9-b**, l'écart relatif de l'amplitude normalisée de l'onde directe de la série S3 par rapport à la série S0 est de 10,5%. D'autre part, sur la **figure IV.9-c**, l'écart relatif de l'amplitude normalisée de l'onde directe de la série S3 par rapport à la série S0 est de 7,4%.

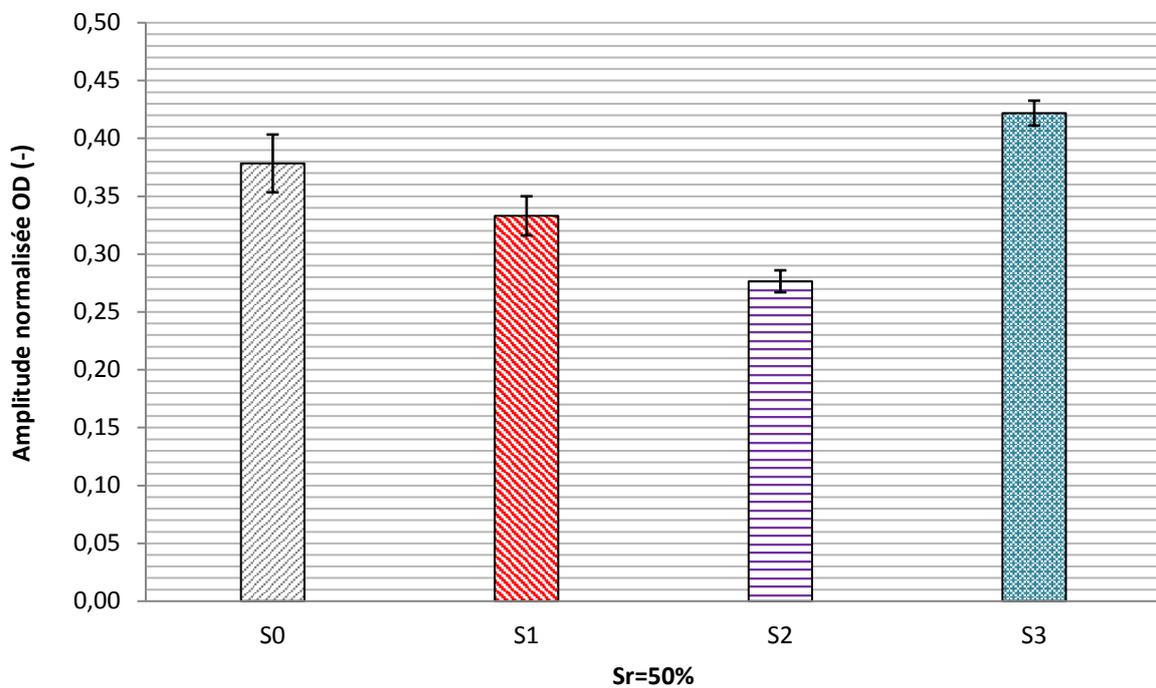


Figure IV. 9-b : Variations de l'amplitude normalisée de l'onde directe des séries S0, S1, S2 et S3 pour un degré de saturation $S_r=50\%$.

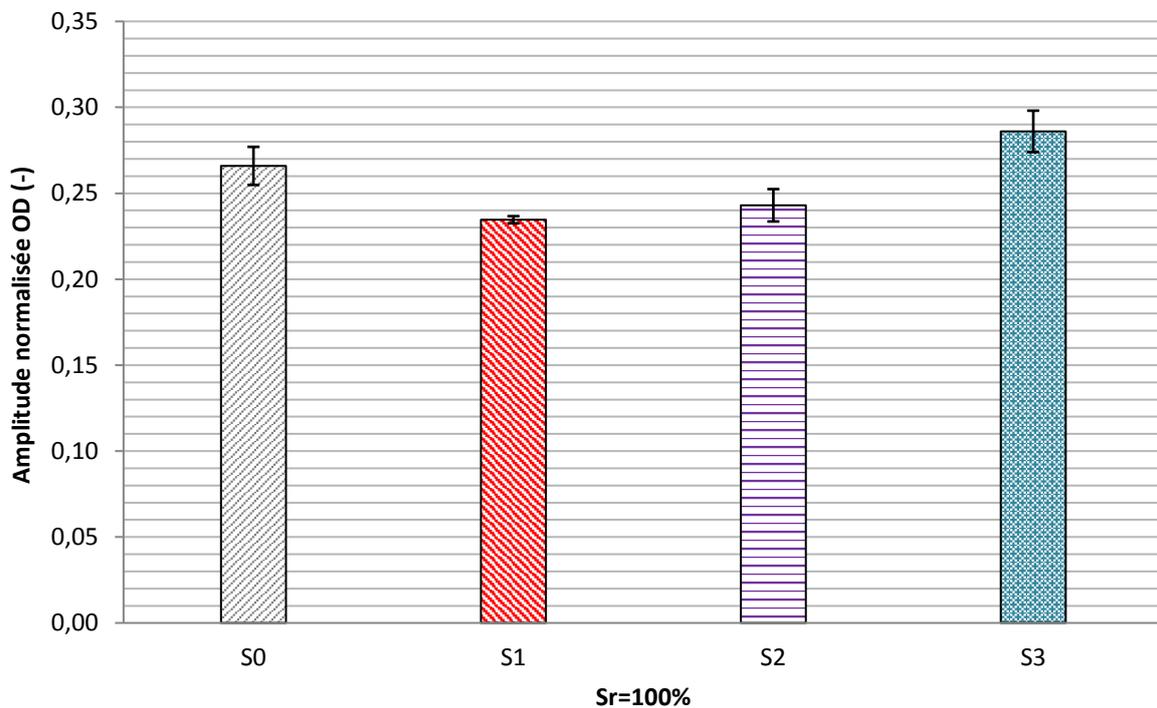


Figure IV. 9-c : Variations de l'amplitude normalisée de l'onde directe des séries S0, S1, S2 et S3 pour un degré de saturation $S_r=100\%$.

En conclusion, les **figures IV.9-b** et **IV.9-c** montrent que l'amplitude normalisée de l'onde directe de la série S3 est nettement plus élevée que celle des autres séries. Cela pourrait venir de la quantité de teneur en chlorure libres présent dans les pores capillaires du béton de la série S3. Pour la deuxième hypothèse on peut supposer, en comparant les amplitudes normalisées de la série S3 aux deux autres séries, que la série S3 possède une teneur en chlorure libres beaucoup plus faible comparée aux séries S1 et S2.

En effet, l'ajout de 30g/L de NaCl dans l'eau de gâchage pourrait très bien favoriser, au jeune âge, les processus des réactions chimiques (ou de liaisons physiques) des ions chlorures présents dans la solution interstitielle des échantillons de béton S3 avec les produits d'hydratation du ciment. Ce qui pourrait, en conséquence, diminuer la teneur en chlorures libres présents dans la solution interstitielle du béton, et favoriser l'augmentation de l'amplitude normalisée de l'onde directe de la série S3 (cf. **figure IV.9-a**, **figure IV.9-b**, **figure IV.9-c**). Cette hypothèse sera vérifiée par la suite en confrontant les résultats obtenus ici avec les dosages en chlorures.

IV.3.2.2 Amplitude normalisée de l'onde réfléchie : Série S3

Sur la **figure IV.10-a** sont représentées les variations de l'amplitude normalisée de l'onde réfléchie des séries S0, S1, S2 et S3 en fonction de la teneur en eau volumique. On retrouve les mêmes résultats que précédemment à savoir une amplitude significativement plus élevée pour cette série ce qui est d'ailleurs quantifiable par les valeurs moyennes présentées sur les **figures IV.10-b** et **IV.10-c**.

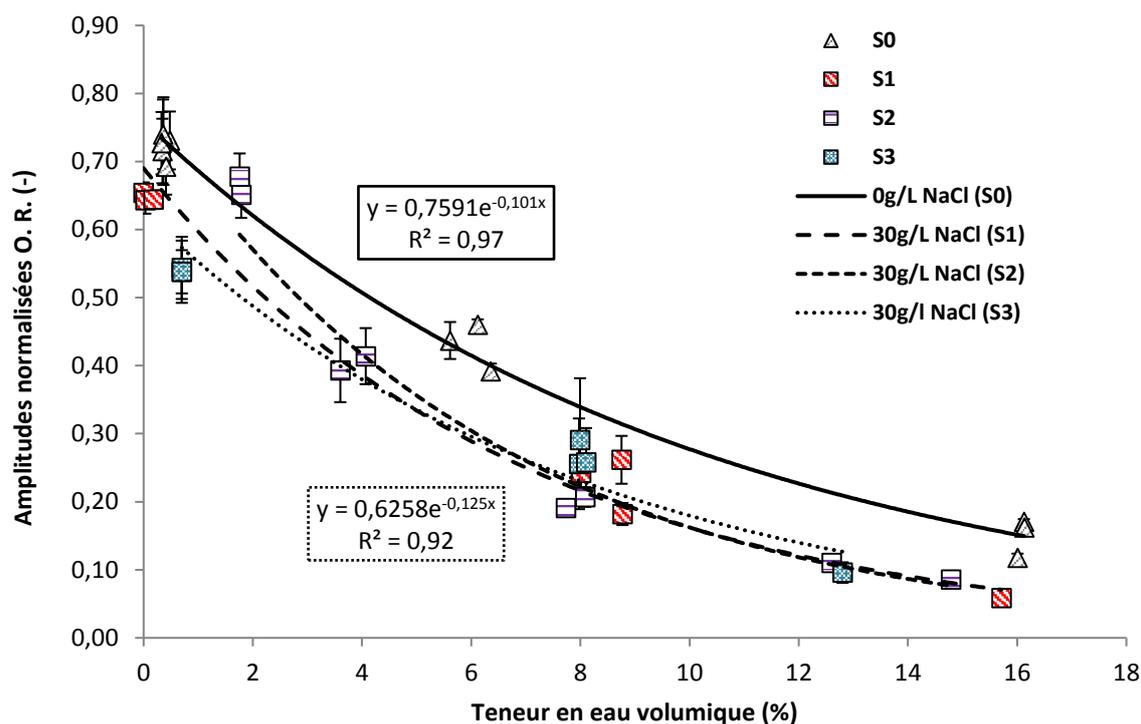


Figure IV. 10-a : Variation des amplitudes normalisées des OR en fonction de la teneur en eau pour les séries S0, S1, S2 et S3.

L'écart relatif de l'amplitude normalisée de l'onde réfléchie de la série S3 par rapport à la série S0 est de 37,2% pour un degré de saturation de 50% et de 33,3% pour un degré de saturation de 100%.

Les observations sont identiques à celles réalisées pour l'onde directe, l'hypothèse d'une diminution de la teneur en chlorures libres dans la solution interstitielle du béton de la série S3, due aux réactions des ions chlorures avec les produits d'hydratations du ciment au jeune âge, pourrait donc à nouveau être retenue.

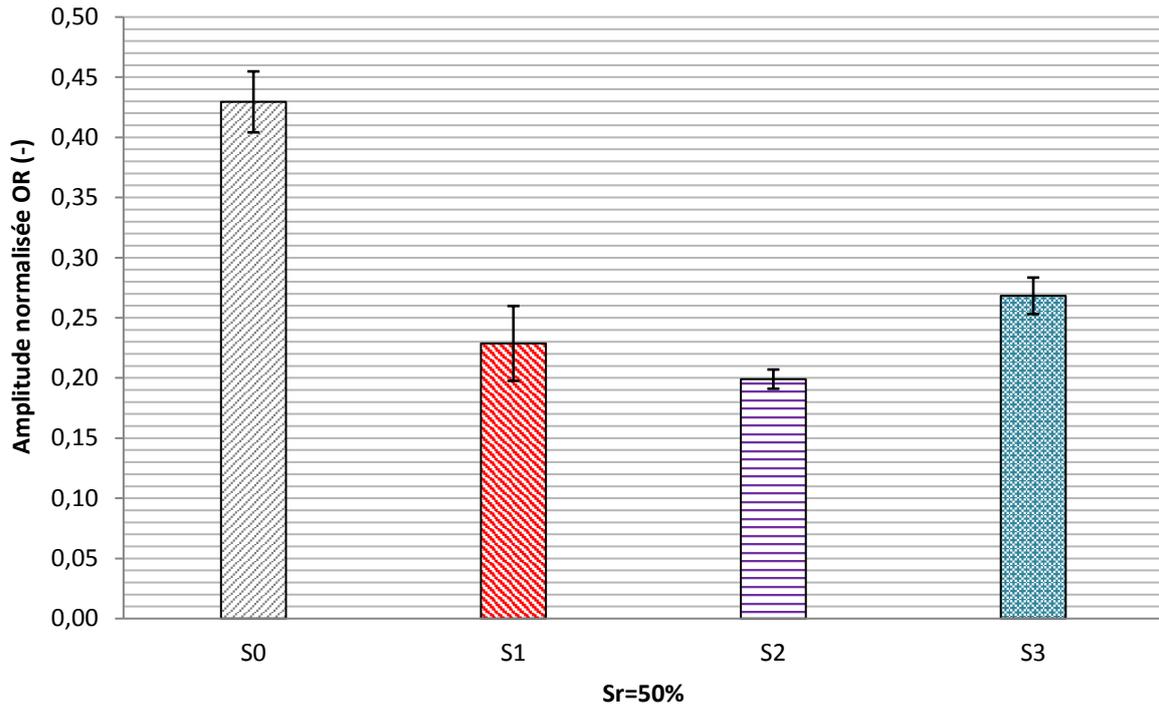


Figure IV. 10-b : Variations des amplitudes normalisées des ondes réfléchies des séries d'échantillon de béton S0, S1, S2 et S3 pour un degré de saturation $Sr=50\%$.

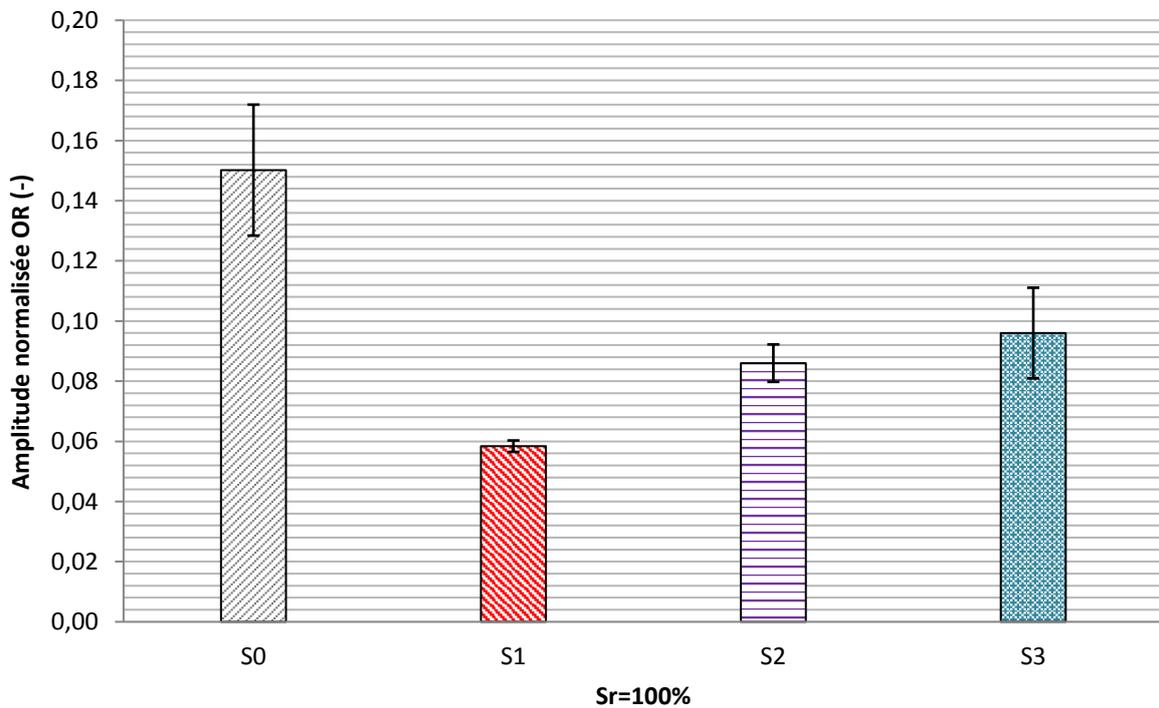


Figure IV. 10-c : Variations des amplitudes normalisées des ondes réfléchies des séries d'échantillon de béton S0, S1, S2 et S3 pour un degré de saturation $Sr=100\%$.

Par ailleurs, nous avons vu jusqu'à présent que les fortes diminutions d'amplitude normalisée observées sur les différentes séries d'échantillon de bétons contaminés sont principalement causées par plusieurs variables, notamment la teneur en eau et la teneur en chlorures. De plus, la **figure III.18** a montré que la proportion en chlorures libres est significativement plus faible sur la série S3. Ce qui corrobore bien les tendances observées sur l'amplitude normalisée de l'onde réfléchie et de l'onde directe.

IV.4 Comparaison des résultats pour toutes les séries d'échantillons

IV.4.1 Comparaison des vitesses de propagations de toutes les séries d'échantillons

La **figure IV.11-a** et la **figure IV.11-b** représentent, respectivement, les variations de la vitesse de propagation en fonction de la teneur eau volumique et les variations de la vitesse de propagation en fonction du degré de saturation des séries d'échantillon de béton S0, S1, S2, S3 et S1.2. Cependant, sur la **figure IV.11-b**, les valeurs de la vitesse de propagations correspondent à des valeurs moyennées sur plusieurs groupes de dalles de la même série d'échantillon béton pour un degré de saturation donné ($S_r=0\%$, $S_r=50\%$ et $S_r=100\%$). Par ailleurs, la série d'échantillons de béton S0 correspond à une série non contaminée par les chlorures. De ce fait, cette série va nous servir de référence pour des comparaisons avec les autres séries de béton contaminée.

La **figure IV.11-a** montre qu'en effet toutes les séries d'échantillons de béton suivent les mêmes allures des droites de vitesse. C'est-à-dire, une diminution de la vitesse de propagation des ondes EM avec l'augmentation de la teneur en eau. Nous avons donc une grande répétabilité au niveau de nos mesures de vitesse radar. D'autre part, la **figure IV.11-b** montre que, pour un degré de saturation donné, l'écart relatif de la vitesse de propagation des échantillons de béton contaminés par rapport à la série de béton non contaminée S0 est au moins inférieur ou égale à 6%. Cela vient étayer le fait que la vitesse de propagation des ondes EM se propageant dans un échantillon de béton est uniquement influencée par la teneur en eau.

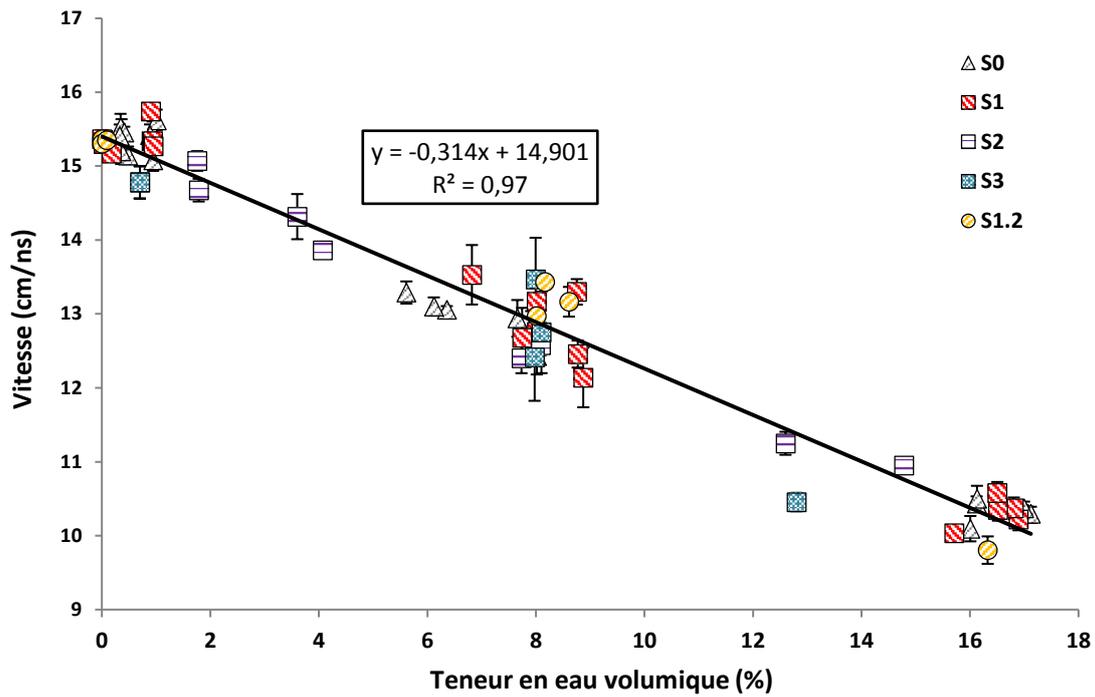


Figure IV. 11-a : Variation de la vitesse de propagation en fonction de la teneur en eau pour toutes les séries d'échantillons de béton.

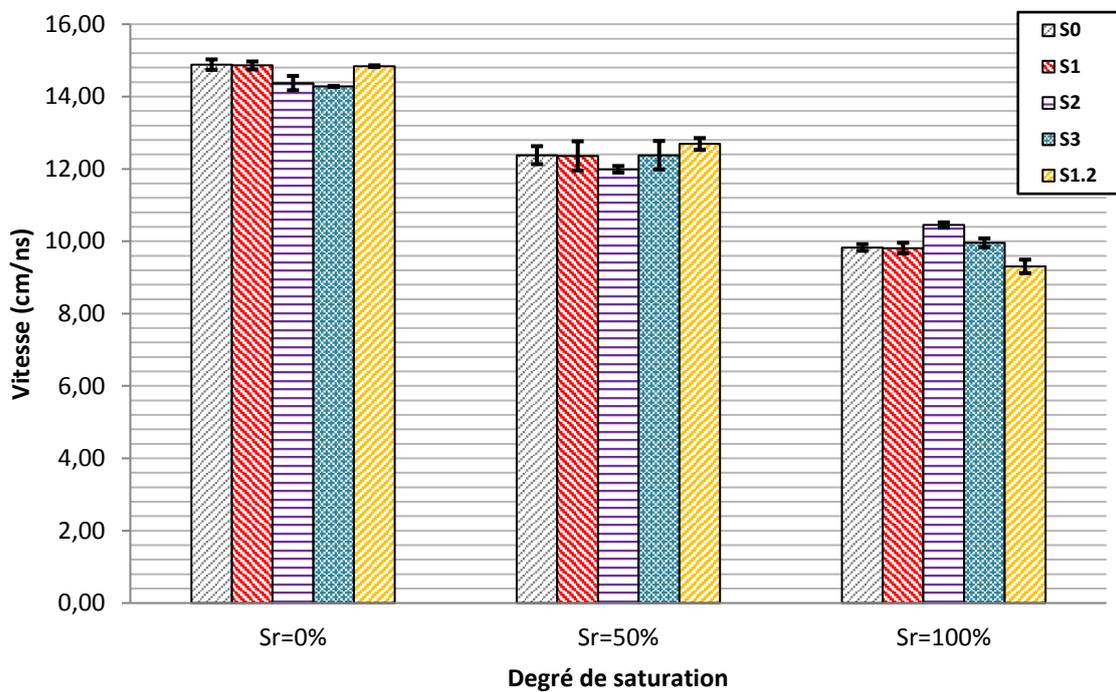


Figure IV. 11-b : Variations de la vitesse de propagation en fonction du degré de saturation pour toutes les séries d'échantillons de béton.

Cependant, cela est vrai lorsqu'on travaille dans les hautes fréquences radar, et avec des faibles teneurs en chlorures. Aussi, des travaux de recherches ont souligné que lorsqu'on se trouve en basses fréquences, fréquence inférieure à 100 MHz, la vitesse de propagation est très sensible à la présence des ions chlorures dans la solution interstitielle du béton car une grande partie des molécules d'eau libres ou d'ions chlorures reste présente dans la solution interstitielle du béton et n'est pas affectée par l'effet du champ EM. Pour des fréquences supérieures, la vitesse de propagation est en revanche très peu modifiée par la présence des chlorures car la plupart des ions sont orientés sous l'effet du champs EM [12, 19, 28]. La constante diélectrique du béton augmente alors uniquement avec l'augmentation de la teneur en eau.

IV.4.2 Comparaison des amplitudes normalisées de toutes les séries d'échantillons

IV.4.2.1 Amplitude normalisée de l'onde directe

Sur la **figure IV.12-a** la variation d'amplitude de l'onde directe en fonction de la teneur en eau volumique est approximée par une loi linéaire en considérant trois familles d'échantillons, ceux de la série S0, ceux des séries S1 et S2 et ceux de la série S1.2. Les échantillons de la série S3 ont été volontairement écartés du fait de leur différence de comportement. On remarque que les coefficients de détermination sont supérieurs à 0,8 pour les trois régressions ce qui est plutôt satisfaisant.

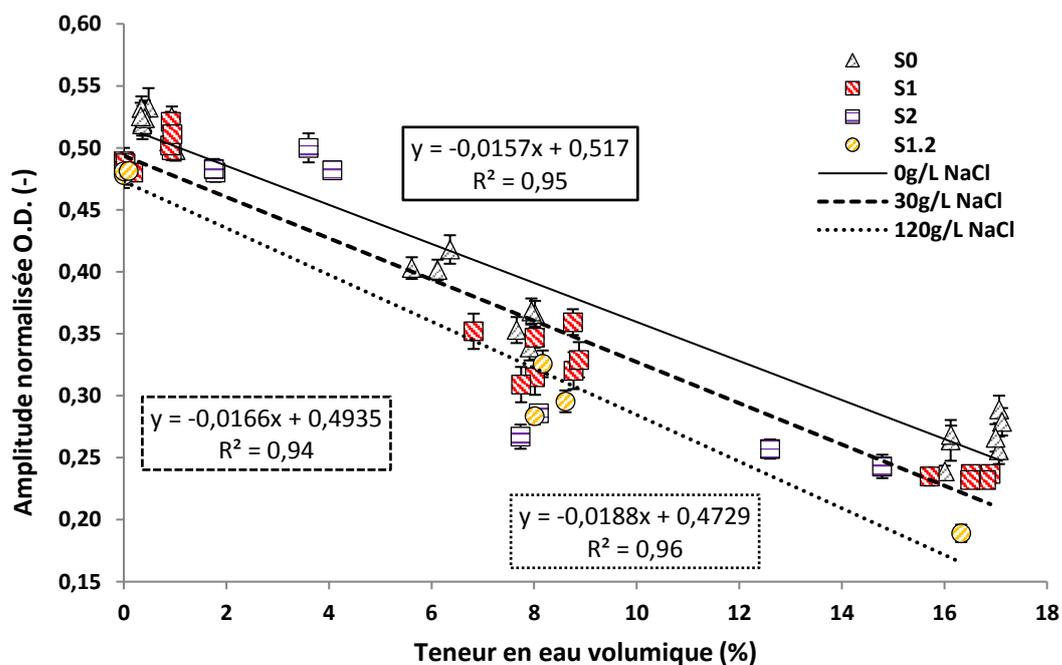


Figure IV. 12-a : Variation de l'amplitude normalisée de l'O.D. en fonction de la teneur en eau pour toutes les séries d'échantillons de béton.

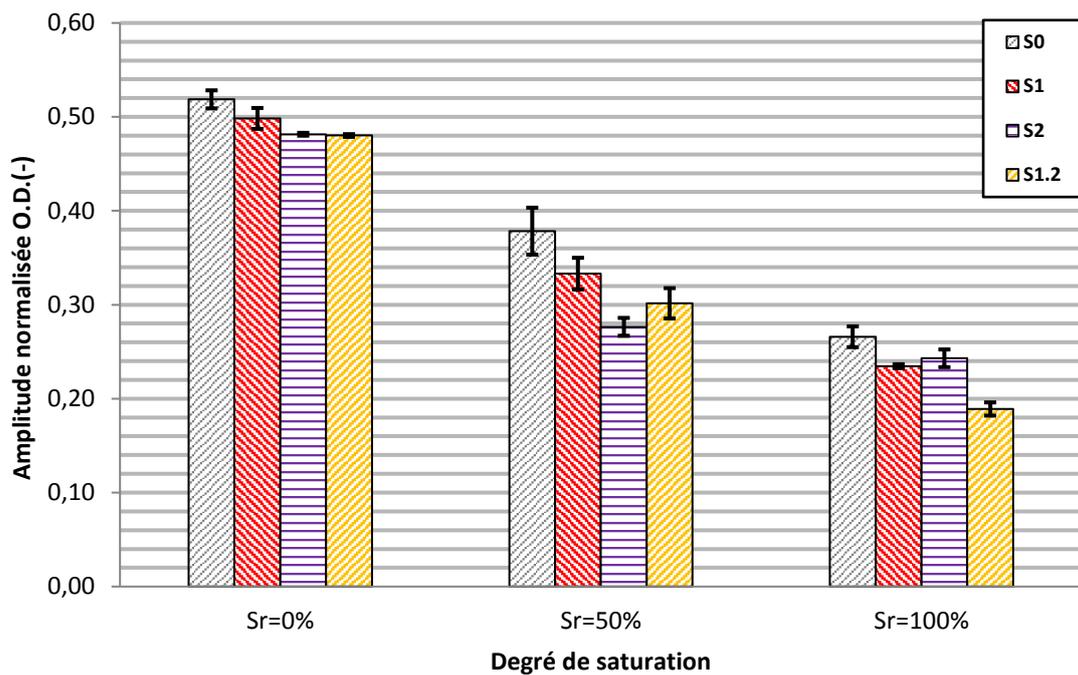


Figure IV. 12-b : Variation de l'amplitude normalisée de l'O.D. en fonction du degré de saturation pour toutes les séries d'échantillons de béton.

La **figure IV.12-b** permet de visualiser l'amplitude moyenne de chaque série et pour chaque degré de saturation. L'augmentation de la concentration en chlorures (séries S1 et S1.2) se traduit par une diminution de l'amplitude de l'onde directe.

IV.4.2.2 Amplitude normalisée de l'ondes réfléchie

Sur la **figure IV.13-a** sont représentées les variations d'amplitude normalisée de l'onde réfléchie en fonction de la teneur en eau volumique des séries d'échantillons de béton S0, S1, S2, S3 et S1.2. Cette figure présente les régressions obtenues par une loi exponentielle entre amplitude normalisée de l'onde réfléchie et teneur en eau volumique en considérant les mêmes familles d'échantillons que pour l'onde directe (les échantillons de la série S3 ont également été écartés). On met en évidence trois lois clairement distinctes avec des coefficients de détermination significatifs.

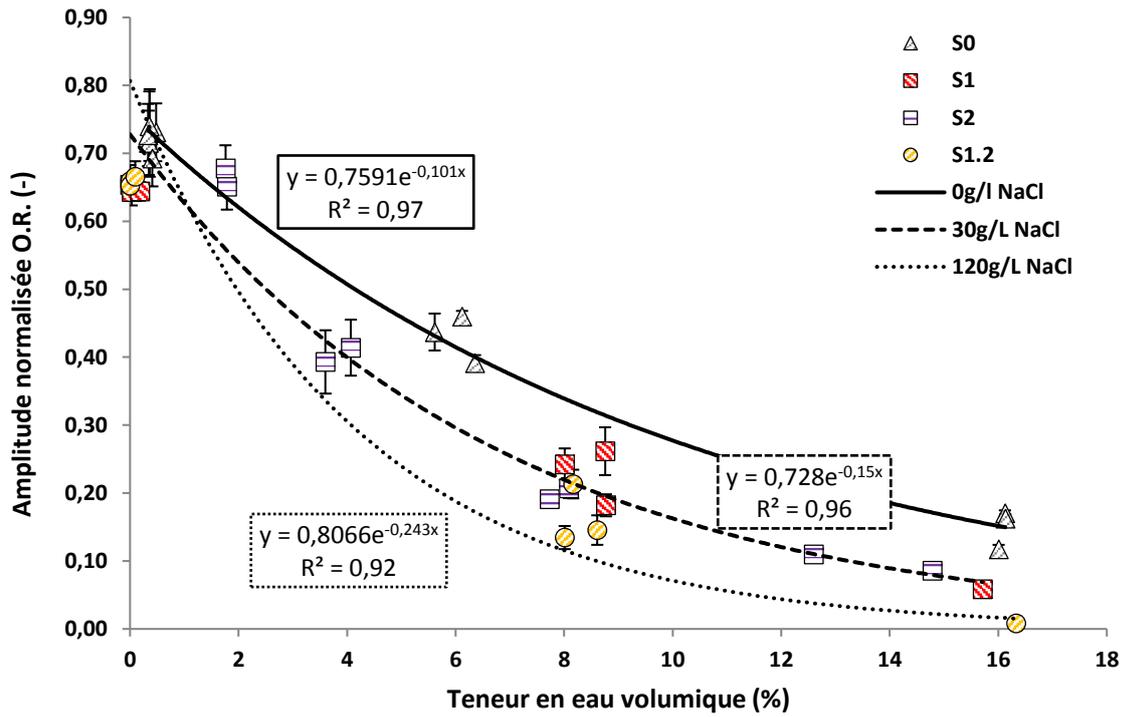


Figure IV. 13-a : Variation d'amplitude normalisée de l'O.R. en fonction de la teneur en eau pour toutes les séries d'échantillons de béton.

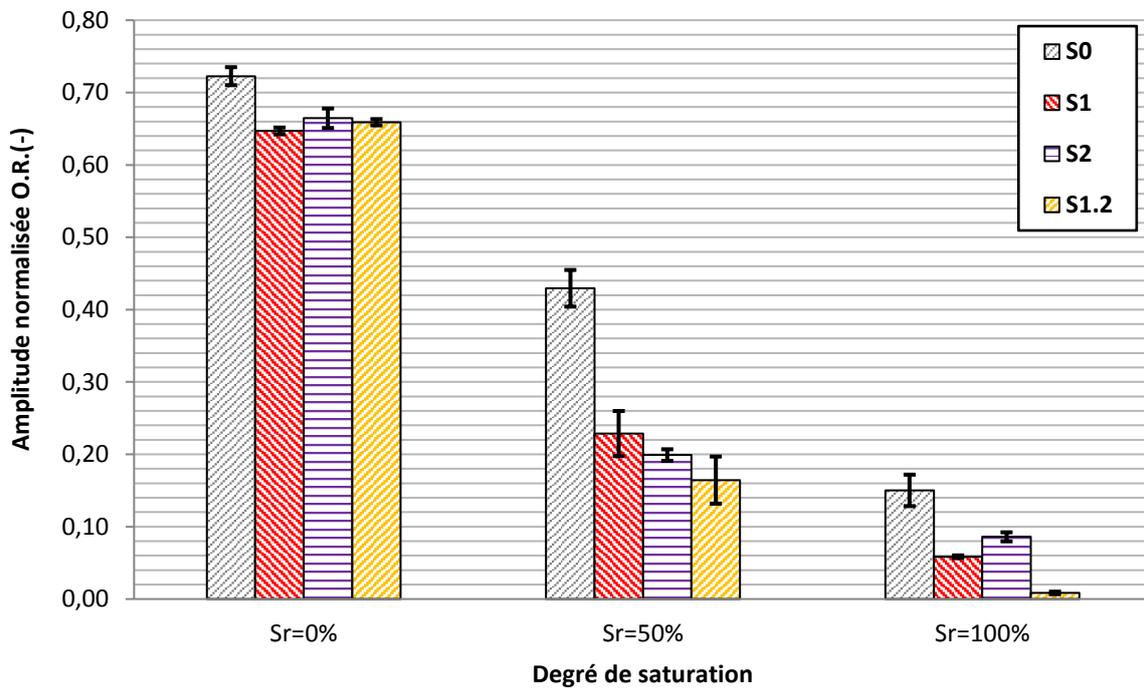


Figure IV. 13-b : Variation d'amplitude normalisée de l'O.R. en fonction du degré de saturation pour toutes les séries d'échantillons de béton.

La **figure IV.13-b** montre bien que, pour $Sr=100\%$, la série S1.2 affiche une atténuation beaucoup plus forte. La contamination sur la série S1.2 étant quatre fois plus importante que celles des séries S1 et S2, les phénomènes de diffusion et d'absorption de l'énergie EM rayonnée sont donc très présents.

IV.4.2.3 Comparaison des atténuations du signal EM avec des valeurs issues d'autres travaux

Sur les **figures IV.14** et **15** sont reportées les valeurs de Sbartaï sur l'atténuation de l'onde directe et réfléchiée en fonction de la concentration en NaCl pour un degré de saturation $Sr=100\%$. Ces valeurs sont alors comparées avec celles obtenues sur les séries S0, S1, S1.2, S2 et S3 pour un degré de saturation $Sr=100\%$. Le calcul de l'atténuation de l'onde directe et réfléchiée est fait à l'aide de la relation (4.1), Sabartaï [18].

$$a = -20 * \log(A_{Nor}) \quad (4.1)$$

Avec A_{nor} , l'amplitude normalisée de l'onde directe ou de l'onde réfléchiée données par les relations (3.13) et (3.14).

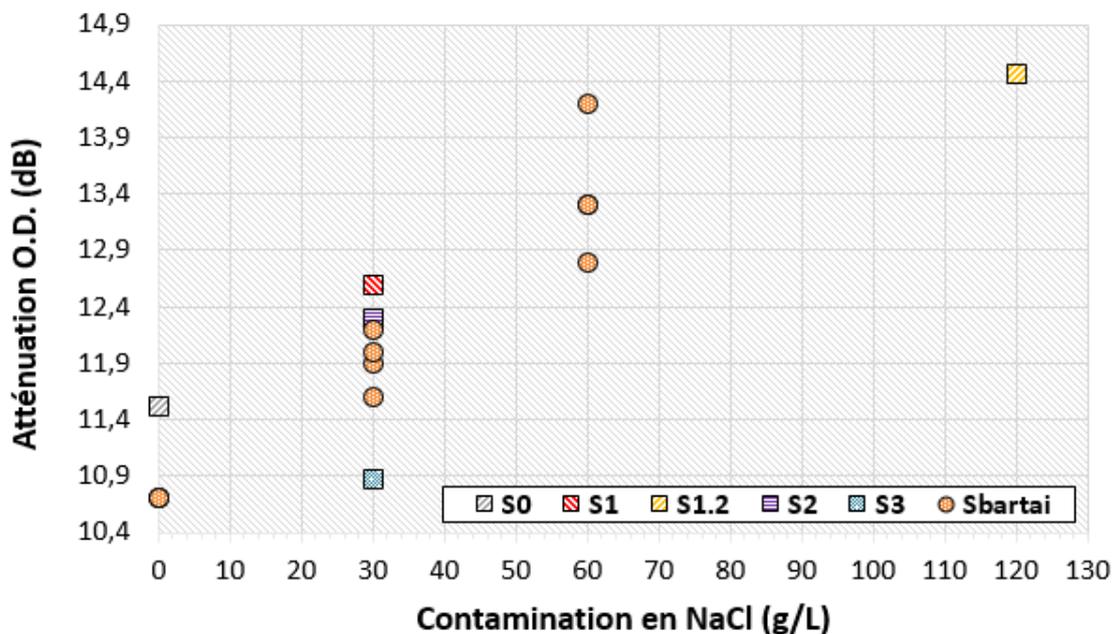


Figure IV. 14 : Variation de l'atténuation de l'onde directe en fonction de la contamination en chlorure.

La **figure IV.14** montre une augmentation de l'atténuation de l'onde directe avec l'augmentation de la contamination en NaCl sur les valeurs de Sbartai. Cette tendance est observée, en fonction de la concentration en NaCl, sur les séries S0, S1, S1.2, S2 et S3. La faible atténuation sur la série S3 pour une concentration à 30 g/L de NaCl et la forte atténuation sur la série S0 pour une concentration à 0 g/l de NaCl est due à la quantité de teneur en eau présente dans la porosité du béton lorsque $S_r=100\%$. Par conséquent, les valeurs de Sbartai restent assez similaires à celles obtenues sur les séries S0, S1, S1.2, S2 et S3.

Concernant l'atténuation de l'onde réfléchie, la **figure 15** montre le même comportement que précédemment. À savoir une augmentation de l'atténuation du signal réfléchi avec l'augmentation de la contamination en NaCl. Cependant, contrairement au signal direct, la série S3 affiche les mêmes valeurs que celles obtenues par Sbartai.

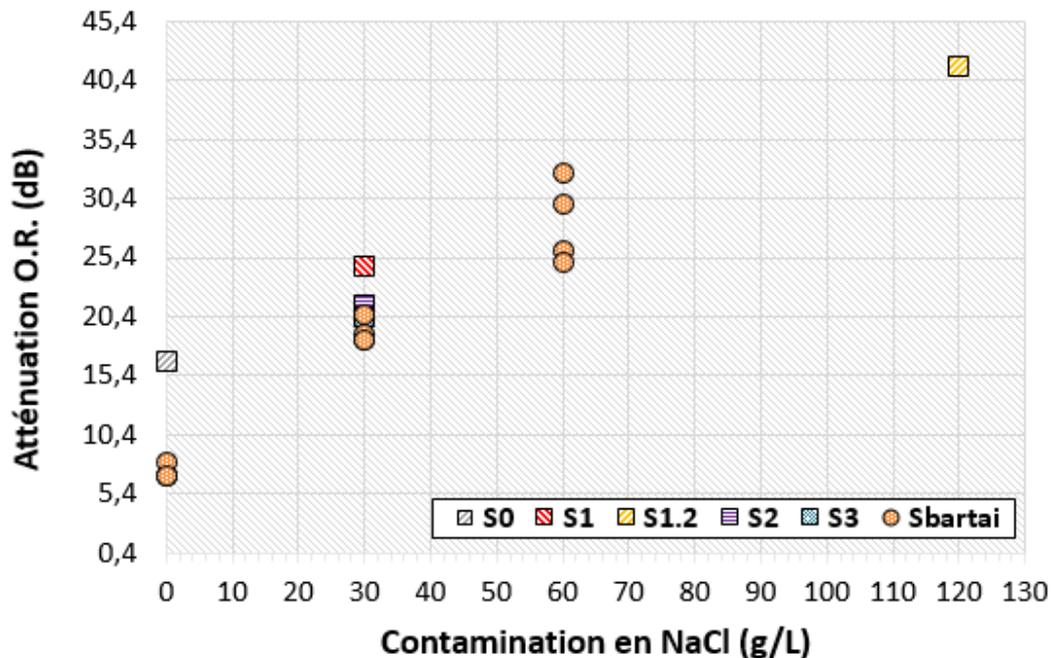


Figure IV. 15 : Variation de l'atténuation de l'onde réfléchie en fonction de la contamination en chlorure.

Par conséquent, on observe une assez bonne corrélation des résultats obtenus avec ceux des travaux de Sbartai lorsque la contamination en NaCl est de 30 g/L.

IV.5 Proposition d'un modèle à deux variables

Il s'agit ici d'analyser la corrélation entre la vitesse ou l'amplitude de l'onde directe et deux variables, la teneur en eau volumique et la teneur en chlorures libres. Les valeurs représentées sur les figures ci-dessous concernent uniquement les séries d'échantillons de béton contaminés S1, S2 et S1.2. Des modèles de régression bi-linéaire sont également présentés.

IV.5.1 Vitesse de propagation : Séries S1, S2 et S1.2

La **figure IV.16** représente les variations de la vitesse de propagation en fonction de la teneur en eau volumique et de la teneur en chlorures libres. L'équation de régression bilinéaire de la vitesse de propagation (Vit.) est donc calculée à partir des données sur les vitesses, les teneurs en eau (Ww) et les teneurs en chlorures libres (Ch.L) mesurées sur les différents échantillons de béton des séries S1, S2 et S1.2 en utilisant la fonction « droitreg ». L'équation de régression est alors :

$$Vit = 14,9505 - (0,3216 * Ww) - (0,1152 * ChL) \quad (4.2)$$

Avec un coefficient de détermination élevé $R^2 = 0,97$.

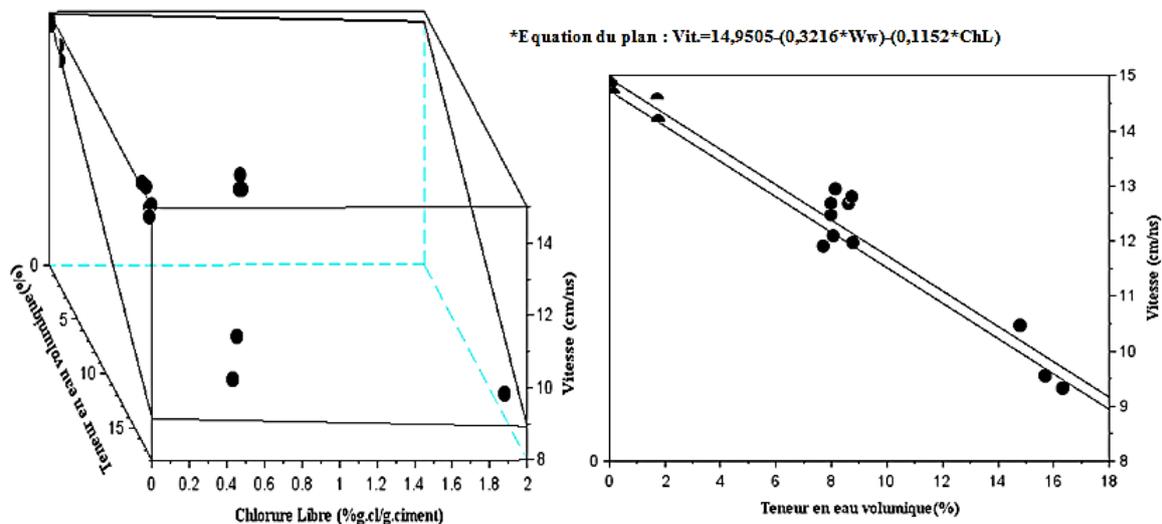


Figure IV. 16 : Variation de la vitesse en fonction de la teneur en eau et de la teneur en chlorure libres pour les séries S1, S2 et S1.2.

On remarque sur la **figure IV.16** la faible dépendance de la vitesse à la teneur en chlorures et son lien fort avec la teneur en eau. Cela corrobore bien avec les résultats obtenus précédemment, c'est-à-dire une faible dépendance de la vitesse à la concentration en chlorures.

Par ailleurs, sur le **tableau IV.1** sont représentés les tests de validation des coefficients directeurs et de l'ordonnée à l'origine de l'équation de plan de vitesse de la **figure IV.16**.

Tableau IV. 1 : Tests de validations des coefficients de l'équation de plan de vitesse.

	Ch.L	Ww	Ordonnée à l'origine
Coeff.	-0,115	-0,322	14,950
Ecart type	0,177	0,017	0,117
T.test	0,65	19,02	127,25

Le test de validation des coefficients directeurs et de l'ordonnée à l'origine de l'équation de plan de la **figure IV.16** est calculé à partir de la relation (4.3).

$$T_{test} = \frac{Coefficient}{Ecart\ type} > 1,946 \quad (4.3)$$

Lorsque la valeur T_{test} est supérieure à 1,946, la probabilité que la variable affectée par le coefficient (ou bien l'ordonné à l'origine) donné par la fonction de régression soit représentatif est de 95%.

Par conséquent, le coefficient directeur de la teneur en eau volumique (Ww) et l'ordonnée à l'origine de l'équation de plan peuvent être considérés comme représentatifs. En revanche, le coefficient directeur de la teneur en chlorures libres (Ch.L) est loin d'être vrai. La vitesse est donc très dépendante de la teneur en eau.

IV.5.2 Amplitude normalisée d'onde directe : Séries S1, S2 et S1.2

La **figure IV.17** représente les variations des amplitudes normalisées des ondes directes en fonction de la teneur en eau volumique et de la teneur en chlorures libres pour les séries d'échantillons S1, S2 et S1.2. L'équation de régression bilinéaire de l'amplitude normalisée des ondes directes représentée sur la **figure IV.17** est à la fois fonction de la teneur en eau volumique (Ww) et de la teneur en chlorure (Ch.L). L'équation de régression est donc :

$$A_{od} = 0,476 - (0,0155 * Ww) - (0,0243 * ChL) \quad (4.4)$$

Avec $R^2 = 0,93$.

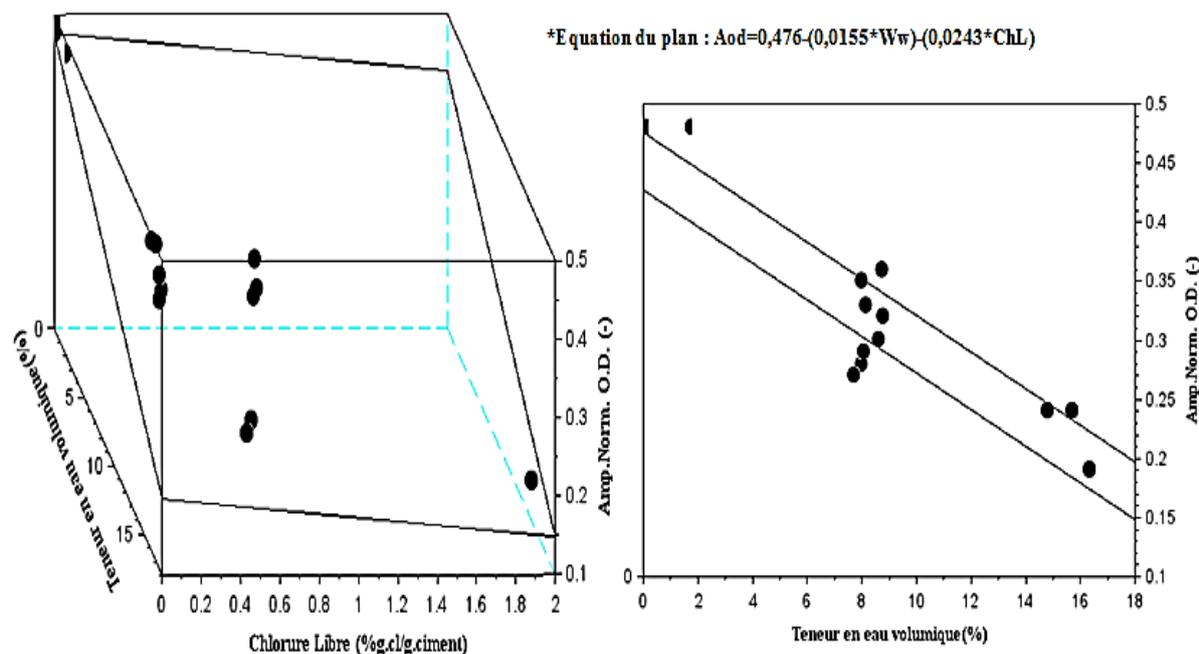


Figure IV. 17 : Variation de l'amplitude normalisée de l'O.D. en fonction de la teneur en eau et de la teneur en chlorure libres pour les séries S1, S2 et S1.2.

Par ailleurs, l'équation de plan montre bien une diminution de l'amplitude normalisée de l'onde directe avec l'augmentation de la teneur en eau volumique et l'augmentation de la teneur en chlorures libres ce qui corrobore les observations précédentes. D'autre part, sur le **tableau IV.2** sont représentés les valeurs des tests de validation des coefficients directeurs et de l'ordonnée à l'origine de l'équation de plan de l'amplitude normalisée de l'onde directe représentée sur la **figure IV.17**.

Tableau IV. 2 : Tests de validation des coefficients de l'équation de plan de l'amplitude normalisée de l'O.D.

	Ch.L	Ww	Ordonnée à l'origine
Coeff.	-0,024	-0,015	0,476
Ecart type	0,015	0,001	0,010
T.test	1,64	10,87	48,13

Ici, le coefficient directeur de la teneur en eau volumique (Ww) et l'ordonnée à l'origine de l'équation de plan sont bien représentatifs. Cependant, le coefficient directeur de la teneur en chlorures libres (Ch.L) n'est pas assez représentatif des valeurs des chlorures libres obtenues sur les échantillons de béton, car la valeur test de ce coefficient est inférieure à 1,946. Par conséquent, d'après les valeurs des tests de validation données par le **tableau IV.2**, l'amplitude normalisée de l'onde directe est très dépendante de la teneur en eau volumique et moyennement dépendante de la teneur en chlorures libres.

IV.6 Analyses fréquentielles des signaux radar

IV.6.1 Analyse fréquentielle des séries d'échantillons S0, S1 et S1.2

La **figure IV.18** représente les variations d'amplitude en fonction de la fréquence. Ces courbes ont été obtenues à partir de la transformée de Fourier rapide faite sur les signaux radar des séries S0, S1 et S1.2. Sur cette figure, l'amplitude radar maximale diminue à la fois avec l'augmentation du degré de saturation et l'augmentation de la concentration en chlorure.

Aussi, on observe un décalage de la fréquence centrale vers les basses fréquences lorsque le degré de saturation et la concentration en chlorure augmentent. Ce décalage est particulièrement sensible pour le béton saturé avec 120g/L de NaCl.

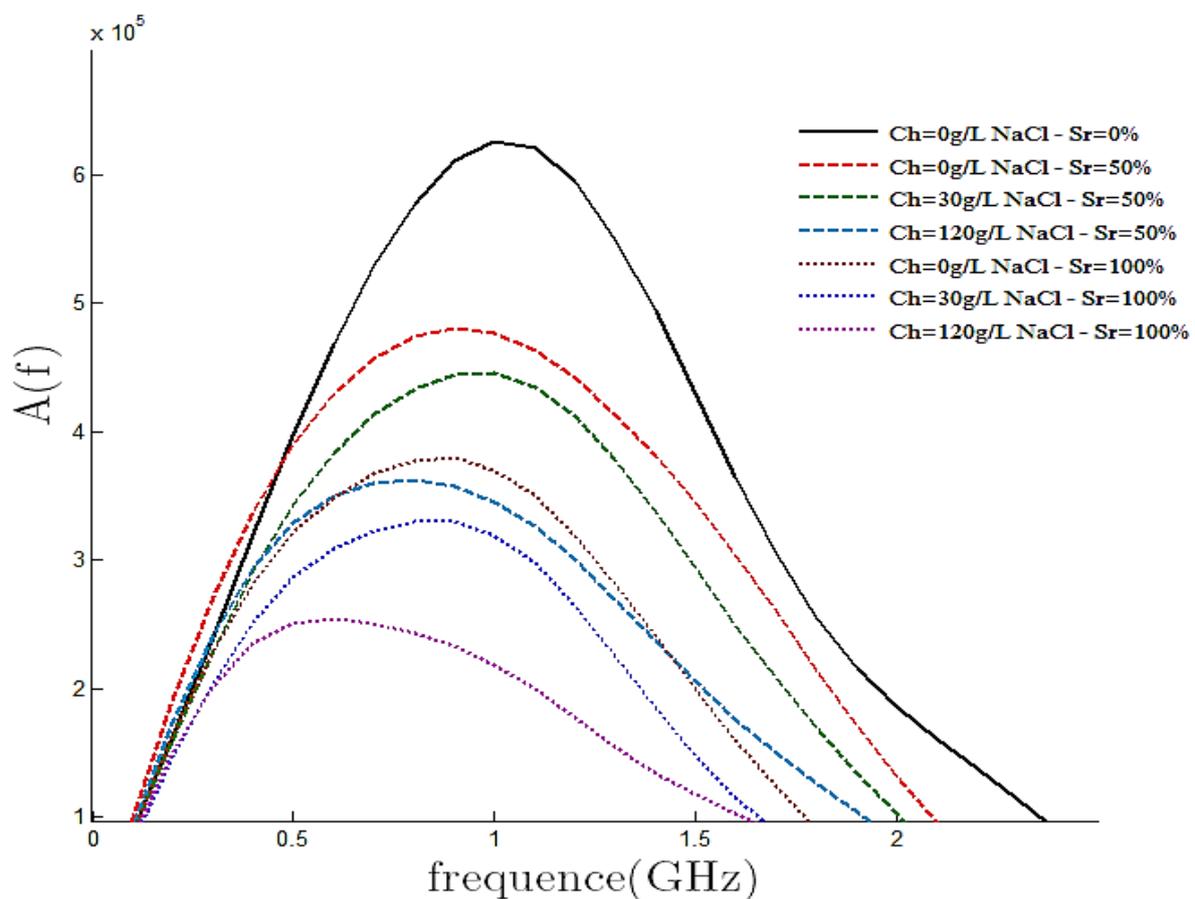


Figure IV. 18 : Transformée de Fourier rapide sur les signaux EM des séries S0, S1 et S1.2.

Par ailleurs, sur le **tableau IV.3** sont reportées les valeurs des fréquences centrales (f_0) de chaque série d'échantillon de béton S0, S1, S1.2, S2 et S3 en fonction de la concentration en chlorure et du degré de saturation. Ce tableau montre bien que la fréquence centrale du béton

et l'amplitude maximale ($A(f_0)$) diminuent à la fois avec l'augmentation de la concentration en chlorure et l'augmentation du degré de saturation.

Tableau IV. 3 : Fréquences centrales en fonction de la concentration en chlorure et du degré de saturation.

Série	NaCl (g/L)	Sr (%)	f_0 (GHz)	$A(f_0).10^5$
S0	0	0	1	6.26
S0	0	50	0.9	4.81
S1	30	50	0.9	4.45
S1.2	120	50	0.8	3.62
S0	0	100	0.9	3.8
S1	30	100	0.8	3.30
S1.2	120	100	0.6	2.54
S2	0	0	1	5.93
S2	30	50	0.9	3.7
S2	0	100	0.9	3.89
S2	30	100	0.8	3.09
S3	30	0	1	6.2
S3	30	50	1	4.74
S3	30	100	0.9	3.8

IV.7 Conclusion

Au cours de ce chapitre, on a vu que les ondes EM étaient à la fois sensibles à la présence d'eau et aux ions chlorures présents dans la solution interstitielle du béton. Toutefois, l'analyse des résultats a montré que la vitesse de propagation d'une onde EM est uniquement influencée par la teneur en eau. L'analyse des résultats a aussi montré que l'amplitude normalisée de l'onde directe et de l'onde réfléchie sont fortement influencées, à la fois, par la teneur en eau et par la teneur en chlorure libres. Cependant, pour la même contamination et le même conditionnement, l'amplitude normalisée de l'onde réfléchie diminue davantage par

rapport à l'amplitude normalisée de l'onde directe du fait de la plus grande distance parcourue. De plus, la diminution des amplitudes normalisées est plus accentuée lorsque la concentration en chlorure est élevée.

D'autre part, nous avons vu que la vitesse de propagation et l'amplitude normalisée de l'onde directe sont toutes deux corrélées aux deux variables teneur en eau et teneur chlorures libres. Toutefois, le test de validation des coefficients directeurs de l'équation du plan de corrélation entre vitesse et teneur en eau et en chlorures a montré que le coefficient relatif à la teneur en chlorure n'est pas représentatif (avec un niveau de confiance de 95%). En revanche le coefficient relatif à la teneur en eau est très représentatif ce qui prouve bien que la vitesse est fortement et quasiment uniquement dépendante de ce paramètre. La même analyse sur le plan de corrélation entre amplitude de l'onde directe et teneur en eau et en chlorures a permis de démontrer que cette mesure est dépendante des deux paramètres, avec toutefois un effet plus significatif de la teneur en eau.

Enfin, l'analyse fréquentielle faite sur les différents signaux radar a montré que l'augmentation du degré de saturation et de la concentration en chlorure affecte les phénomènes d'atténuation géométrique et d'atténuation par absorption de l'énergie EM rayonnée. Cela conduit donc à une diminution de l'amplitude radar et à un décalage de la fréquence centrale vers les basses fréquences.

IV.8 Références

- [26] S. F. Senin, R. Hamid. (2016). “Ground penetrating radar wave attenuation models for estimation of moisture and chloride content in concrete slab”. *Construction and Building Materials*. Volume 106, pages 659 – 669 ;
- [27] G. Klysz, J. P. Balayssac. (2007). “Determination of volumetric water content of concrete using ground-penetrating radar”. *Cement and Concrete Research*. Volume 37, pages 1164 – 1171 ;
- [28] X. Derobert, G. Vilain, R. Cortas, J.-L. Chazelas. (2009). “EM characterization of hydraulic concretes in the GPR frequency- band using a quadratic experimental design”. *Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes*.

Chapitre V

Modèles de permittivité

V. Modèles de permittivité diélectrique

V.1 Introduction

Les résultats présentés dans le chapitre IV ont montré que les teneurs en eau et en chlorure affectent de façon significative les paramètres de propagation des ondes EM. Dans ce chapitre nous allons tester la capacité de quelques modèles de permittivité à reproduire les mesures effectuées. Dans un premier temps nous allons détailler les modèles considérés.

V.2 Les modèles

Dans cette partie nous allons voir trois modèles de permittivité. Ces modèles sont basés sur des lois de mélange qui permettent de considérer le béton comme un milieu à trois phases, une phase solide constituée des granulats et de la pâte de ciment, d'une phase liquide assimilée à la solution interstitielle et d'une phase gazeuse, l'air contenue dans la porosité non occupée par la phase liquide. Trois modèles vont être utilisés, le modèle volumique de CRIM, le modèle géométrique de De Looer et le modèle d'homogénéisation de Maxwell-Garnett.

V.2.1 Modèles volumiques

Ici, les modèles volumiques prennent uniquement en compte les fractions volumiques des constituants. Pour un modèle à N phases, la constante diélectrique est définie comme suit [29] :

$$(\varepsilon^*)^\alpha = \varepsilon_h^\alpha + \sum_{i=1}^N v_i (\varepsilon_i^\alpha - \varepsilon_h^\alpha) \quad (5.1)$$

Avec h et i des indices propres aux constituants. Ici l'hôte h représente la phase solide dans laquelle seront mélangées une ou plusieurs phases fluides appelées inclusions i .

Par ailleurs, lorsque $\alpha = 1$, le modèle diélectrique (5.1) devient un modèle de mélange linéaire entre hôte et inclusions, et lorsque $\alpha = \frac{1}{2}$ le modèle diélectrique devient un modèle d'indice de réfraction complexe (modèle de CRIM). Dans ce modèle de permittivité, pour représenter le comportement et les propriétés diélectriques d'un béton, un modèle tri-phasique est considéré, avec $N=3$. De plus, afin d'observer les performances du modèle volumique (5.1), un deuxième modèle volumique avec $\alpha = \frac{1}{3}$ est étudié en parallèle avec le modèle volumique de CRIM.

Modèle d'indice de réfraction complexe (CRIM) :

Dans un milieu de propagation, l'indice de réfraction est donné par la relation (5.2).

$$\eta_i = C_0 \sqrt{\mu_i \varepsilon_0 \varepsilon_i} \quad (5.2)$$

Avec C_0 la vitesse de la lumière dans le vide, μ_i la perméabilité du milieu de propagation, ε_0 la permittivité du vide et ε_i la permittivité du milieu.

Le modèle de CRIM est défini comme étant le volume moyen des indices de réfraction complexe des constituants d'un mélange, et est donné par la relation (5.3) ci-dessous :

$$\sqrt{\varepsilon^*} = (1 - \Phi) \sqrt{\varepsilon_h} + (1 - S_w) \Phi \sqrt{\varepsilon_a} + \Phi S_w \sqrt{\varepsilon_{sw}} \quad (5.3)$$

Avec ε^* la permittivité complexe, Φ la porosité, S_w le degré de saturation, ε_h la permittivité de la partie solide, ε_a la permittivité diélectrique de l'air et ε_{sw} la permittivité diélectrique de la partie liquide.

Etant donné qu'il s'agit d'un modèle assez simple, il est largement utilisé dans des études de sols, de roches ou de bétons. Cependant, le modèle est connu pour être imprécis dans le cas où la salinité de la solution interstitielle est élevée, ou à basse fréquence.

V.2.2 Modèle géométrique

Les modèles géométriques sont beaucoup plus précis, ils fournissent une représentation globale de la nature physique d'un mélange donné. Ils ont donc une portée d'application beaucoup plus large que celle des modèles volumiques, de ce fait ce sont des modèles beaucoup plus complets. Le modèle géométrique que nous avons adopté est le modèle de De Loor.

Modèle à trois phases (De Loor) :

Pour ce modèle, on fait l'hypothèse que le béton est un hôte, dont l'air et la solution saline sont considérés comme étant des inclusions sphériques ajoutées à cet hôte [29]. Le modèle de De Loor est donc donné par l'équation ci-dessous :

$$\frac{\varepsilon^* - \varepsilon_h}{3\varepsilon^*} = (1 - S_w) \Phi \frac{(\varepsilon_a - \varepsilon_h)}{(\varepsilon_a + 2\varepsilon^*)} + S_w \Phi \frac{(\varepsilon_{sw} - \varepsilon_h)}{(\varepsilon_{sw} + 2\varepsilon^*)} \quad (5.4)$$

Cette équation (5.4) est une formulation implicite, c'est-à-dire qu'il ne peut y avoir une résolution analytique. La détermination de la permittivité complexe nécessite de résoudre l'équation (5.5) ci-dessous :

$$\frac{\varepsilon^* - \varepsilon_h}{3\varepsilon^*} - (1 - S_w) \Phi \frac{(\varepsilon_a - \varepsilon_h)}{(\varepsilon_a + 2\varepsilon^*)} - S_w \Phi \frac{(\varepsilon_{sw} - \varepsilon_h)}{(\varepsilon_{sw} + 2\varepsilon^*)} = 0 + 0j \quad (5.5)$$

V.2.3 Modèle d'homogénéisation

Les modèles d'homogénéisation, modèles issus de la théorie du milieu effectif, reposent essentiellement sur les lois de mélange. Ces modèles diffèrent des autres modèles du fait qu'on ne considère plus chaque phase comme étant symétrique par rapport aux autres, mais chaque phase peut être considérée comme hôte ou inclusion. Ces modèles utilisent les propriétés isolantes ou conductrices des phases d'un milieu hétérogène pour calculer la permittivité diélectrique d'un milieu homogène équivalent. Dans ce travail nous allons considérer le modèle de Maxwell-Garnett.

Modèle de Maxwell-Garnett :

La permittivité effective d'un système constitué d'inclusions sphériques de permittivité diélectrique ε_i , de fraction volumique f_i dispersée de façon aléatoire dans une matrice dite hôte de permittivité diélectrique ε_h peut être décrite par l'équation (5.6) de Maxwell-Garnett.

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_h + 3\varepsilon_h \frac{f_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_h}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_h}}{1 - f_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_h}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_h}} \quad (5.6)$$

Ce modèle repose sur l'hypothèse que les interactions entre les inclusions du même système sont négligeables. Cette hypothèse est uniquement valide lorsque les fractions volumiques des inclusions sont relativement faibles dans le milieu « hôte ».

V.3 Données d'entrée des modèles

Pour les trois types de modèles présentés en V.2 nous avons choisi les données d'entrées suivantes :

Une porosité $\phi = 0,165$, valeur moyenne des porosités mesurées sur tous les échantillons de béton.

Une constante diélectrique de la phase solide, dit « hôte », de $\varepsilon_h = 5$. Cette constante diélectrique est obtenue à partir de la relation (5.3) en faisant l'hypothèse que le béton est totalement sec, soit $S_w = 0$. La permittivité effective complexe ε^* de la relation (5.3) est prise égale à la constante diélectrique du béton sec calculée à partir de la mesure de vitesse radar car le facteur de perte (partie imaginaire de la permittivité diélectrique complexe) devient négligeable lorsque le béton est sec (voir **figure III.20**). Connaissant donc la porosité ϕ et la constante diélectrique de l'air $\varepsilon_a=1$ (cf. **tableau V.2**), on peut alors remonter à la constante diélectrique de la phase solide ε_h .

Concernant la phase liquide, différentes permittivités diélectriques complexes ont été utilisées selon le type de contamination :

- Pour la simulation d'un béton sain (0g/L de NaCl), trois permittivités diélectriques complexes de la phase liquide ont été retenues. Les deux premières étant celles extraites du modèle de Debye [20] (§ II.8.1, **figures II.28 et II.29**) :

$$\varepsilon_{sw} = 80 + 6j \quad (\text{i})$$

$$\varepsilon_{sw} = 76 + 41j \quad (\text{ii})$$

Ces permittivités diélectriques complexes correspondent, respectivement, à une contamination de 0g/L de NaCl (i) et de 10g/L de NaCl (ii).

La troisième permittivité diélectrique complexe (iii) est obtenue à partir des mesures faites à l'aide de la sonde coaxiale développée par EDF R&D (voir chapitre III), sur une solution interstitielle synthétique (sol.1). Les proportions du mélange pour les solutions synthétiques sont reportées sur le **tableau V.1**.

$$\varepsilon_{sw} = 80 + 75j \quad (\text{iii})$$

- Pour la simulation d'un béton contaminé à 30g/L de NaCl, deux permittivités diélectriques complexes de la phase liquide ont été choisies. La première étant extraite du modèle de Debye [20] :

$$\varepsilon_{sw} = 71 + 89j \quad (\text{iv})$$

Et la seconde étant obtenue à partir des mesures faites avec la sonde coaxiale sur une solution synthétique (sol.2), (cf. **tableau V.1**).

$$\varepsilon_{sw} = 60 + 134j \quad (\text{v})$$

- Enfin, pour la simulation d'un béton contaminé à 120g/L de NaCl, deux permittivités diélectriques complexes de la phase liquides ont été choisies. La première est donnée par le modèle de Debye [20] (vi) :

$$\varepsilon_{sw} = 50 + 380j \quad (\text{vi})$$

Et la seconde permittivité diélectrique complexe est donnée par (vii) :

$$\varepsilon_{sw} = 11 + 300j \quad (\text{vii})$$

Elle est obtenue à partir des mesures faites avec la sonde coaxiale sur une solution synthétique (sol.3), une eau distillée mélangé à 120g/L de NaCl (cf. **tableau V.1**).

Le **tableau V.1** donne les caractéristiques des solutions interstitielles synthétiques, d'après Mercado et al. [30], pour un béton fabriqué avec un CEM-I, comme dans ce travail.

Tableau V. 1 : Caractéristiques des solutions interstitielles synthétiques.

Solutions pour béton CEM-I	Na ⁺ (mol/m ³)	K ⁺ (mol/m ³)	OH ⁻ (mol/m ³)	NaCl (g/L)	σ (S/m)
Sol. 1	31,5	122,8	154,3	0	3,32
Sol. 2	31,5	122,8	154,3	30	7,16
Sol. 3	31,5	122,8	154,3	120	16,1

Le **tableau V.2** synthétise les valeurs utilisées dans les modèles électromagnétiques.

Tableau V. 2 : Synthèse des valeurs utilisées dans les modèles.

Simulations	Contamination	Φ (%)	$\varepsilon_a(-)$	$\varepsilon_m(-)$	ε_{sw} (<i>Debye</i>)	ε_{sw} (<i>Sonde coaxiale</i>)
S0	0g/L NaCl	16,5	1	5	80 + 6j	80 + 75j
	10g/L NaCl				76 + 41j	
S1, S2, S3	30g/L NaCl	16,5	1	5	71 + 89j	60 + 134j
S1.2	120g/L NaCl	16,5	1	5	50 + 380j	11 + 300j

Comme on peut le voir dans le **tableau V.2** la permittivité diélectrique complexe de la phase liquide est la seule variable qui influence le résultat de la simulation.

V.4 Valeurs mesurées

Le **tableau V.3** reprend les mesures des constantes diélectriques qui seront utilisées pour évaluer l'efficacité des modèles électromagnétiques. Ces valeurs moyennes de constantes diélectriques ont été obtenues en utilisant la relation (3.12) connaissant les valeurs de la vitesse de propagation de chaque série d'échantillons.

Tableau V. 3 : Constantes diélectriques obtenues à partir de la mesure de vitesse qui seront utilisées dans les modèles.

Constante diélectrique	S0	S1	S2	S3	S1.2
$\epsilon'(Sr=0\%)$	4,06	4,08	4,36	4,41	4,09
$\epsilon'(Sr=50\%)$	5,87	5,89	6,26	5,81	5,59
$\epsilon'(Sr=100\%)$	9,32	9,35	8,24	9,08	10,39
$\epsilon'(Sr=100\% \text{ à } 28j)$	9,25	-	-	-	-

Le facteur de pertes est défini à partir de la relation (5.7) [31, 29].

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0} \quad (5.7)$$

Cette relation fait intervenir : σ la conductivité électrique du béton [S/m], f la fréquence [GHz] et $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ [F/m] la constante diélectrique du vide. À noter que la valeur de la fréquence est choisie par rapport au degré de saturation Sr (voir le **tableau IV.3**).

En considérant que la conductivité peut être calculée comme étant l'inverse de la résistivité mesurée à basse fréquence avec une sonde Wenner (voir §II.3, **figure II.4**), il est possible de déterminer le facteur de pertes pour différents états de saturation et différentes contaminations en chlorures. Par ailleurs, la résistivité n'ayant été mesurée qu'aux degrés de saturation de 50 et 100% (mesure impossible à l'état sec) le facteur de pertes a été calculé uniquement pour ces deux degrés de saturation (voir **tableau V.5**). De plus, les mesures de résistivité ont été réalisées uniquement sur les séries S1 et S1.2.

Pour pouvoir comparer les facteurs de pertes des bétons contaminés à ceux des bétons sains (série S0) des mesures réalisées sur le même béton au cours du projet SENSO ont été utilisées (voir **figure V.1**). Une loi de comportement a donc été déterminée à partir de ces mesures, et a permis de calculer une résistivité sur la série S0 pour les degrés de saturations 25, 40, 50, 70 et 100%. Les valeurs de résistivité sont donc reportées sur le **tableau V.4**.

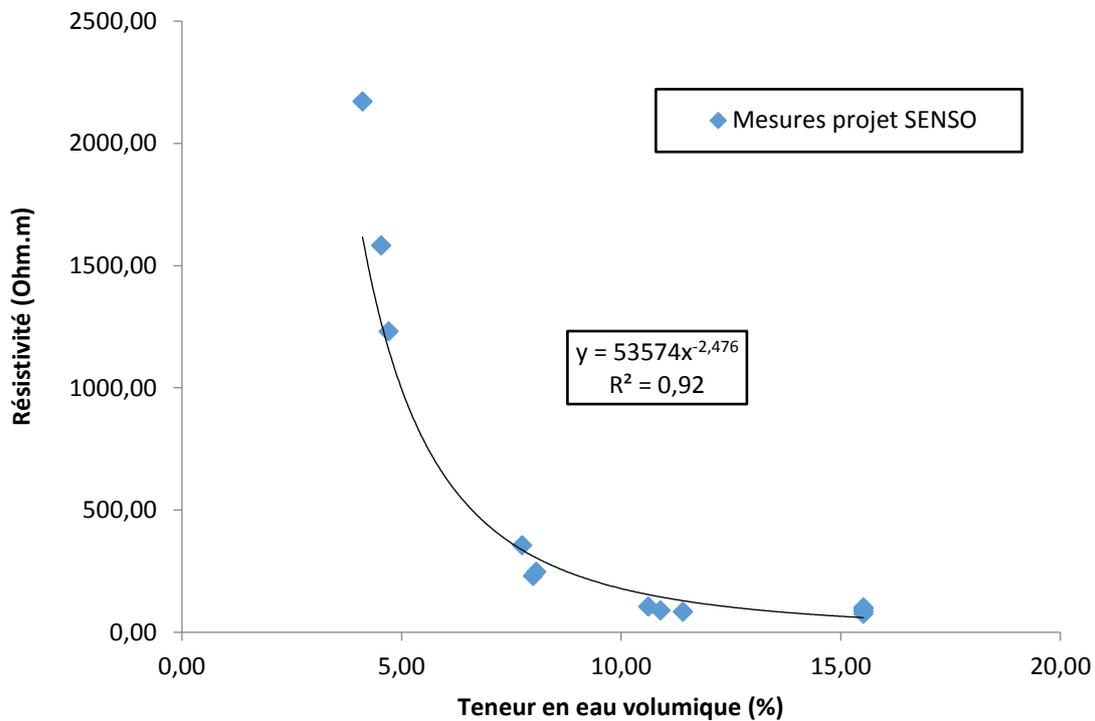


Figure V. 1 : Résistivité en fonction de la teneur en eau (Mesures projet SENSO).

La **figure V.1** représente la variation de la résistivité des mesures du projet SENSO en fonction de la teneur en eau volumique. La **figure V.1** montre, entre autres, que plus la teneur en eau volumique diminue et plus la résistivité du béton tend vers l'infinie. Sur le **tableau V.4** sont reportées les valeurs de la résistivité pour la série S0 estimées à partir du modèle de corrélation entre résistivité et teneur en eau issu du projet SENSO.

Tableau V. 4 : Résistivités de la série S0 estimées à partir des résultats du projet SENSO.

Degré de saturation	R ($\Omega.m$)
Sr=25%	1662,11
Sr=40%	419,73
Sr=50%	278,97
Sr=70%	93,83
Sr=100%	50,74

Le **tableau V.5** récapitule les valeurs de facteur de pertes utilisées dans les modèles de permittivité calculées à partir de la relation (5.7).

Tableau V. 5 : Valeurs des facteurs de pertes utilisés dans les modèles EM.

Facteur de pertes	S0	S1	S1.2
$\epsilon''(\text{Sr}=25\%)$	0,011	-	-
$\epsilon''(\text{Sr}=40\%)$	0,043	-	-
$\epsilon''(\text{Sr}=50\%)$	0,072	0,35	0,81
$\epsilon''(\text{Sr}=70\%)$	0,213	-	-
$\epsilon''(\text{Sr}=100\%)$	0,394	0,85	2,68

Afin de quantifier la qualité de prédiction de la constante diélectrique et du facteur de pertes de chaque modèle testé on calculera l'erreur quadratique moyenne suivant la relation (5.8).

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (5.8)$$

Avec :

F_i , la valeur de la prévision, O_i , la valeur mesurée ou estimée et N , le nombre de points de vérification.

L'EQM est une mesure de l'erreur moyenne, pondérée par le carré de l'erreur. Elle permet de connaître la magnitude de l'erreur de la prévision mais n'indique pas la direction des erreurs. Toutefois, plus l'EQM est faible, plus le résultat est précis.

V.5 Résultats

On va présenter ici les résultats des différentes simulations des permittivités complexes d'un béton sain et contaminé, pour les trois modèles. Les graphes représentent, pour chaque modèle, la variation des paramètres électromagnétiques en fonction de la teneur en solution interstitielle.

V.5.1 Simulation d'un béton sain

Les **figures V.2-a** et **V.2-b** représentent les simulations de la variation de la constante diélectrique en fonction de la teneur en solution interstitielle pour le modèle volumique avec $\alpha=1/3$ et $\alpha=1/2$ (CRIM), relation (5.1). Les **figures V.2-a** et **V.2-b** montrent que le modèle volumique est assez bien corrélé avec les constantes diélectriques obtenues sur la série d'échantillons de béton S0.

Sur la **figure V.2**, l'erreur quadratique moyenne (EQM) entre les valeurs de la constante diélectrique à 0g/L de NaCl et à 10g/L de NaCl, avec le modèle volumique ($\alpha=1/3$) dont les données d'entrée sont extraites du modèle de Debye, et les mesures de la série S0 est de 0,69. Cette erreur est de 0,76 en considérant les valeurs mesurées avec la sonde coaxiale (cf. **tableau V.6**).

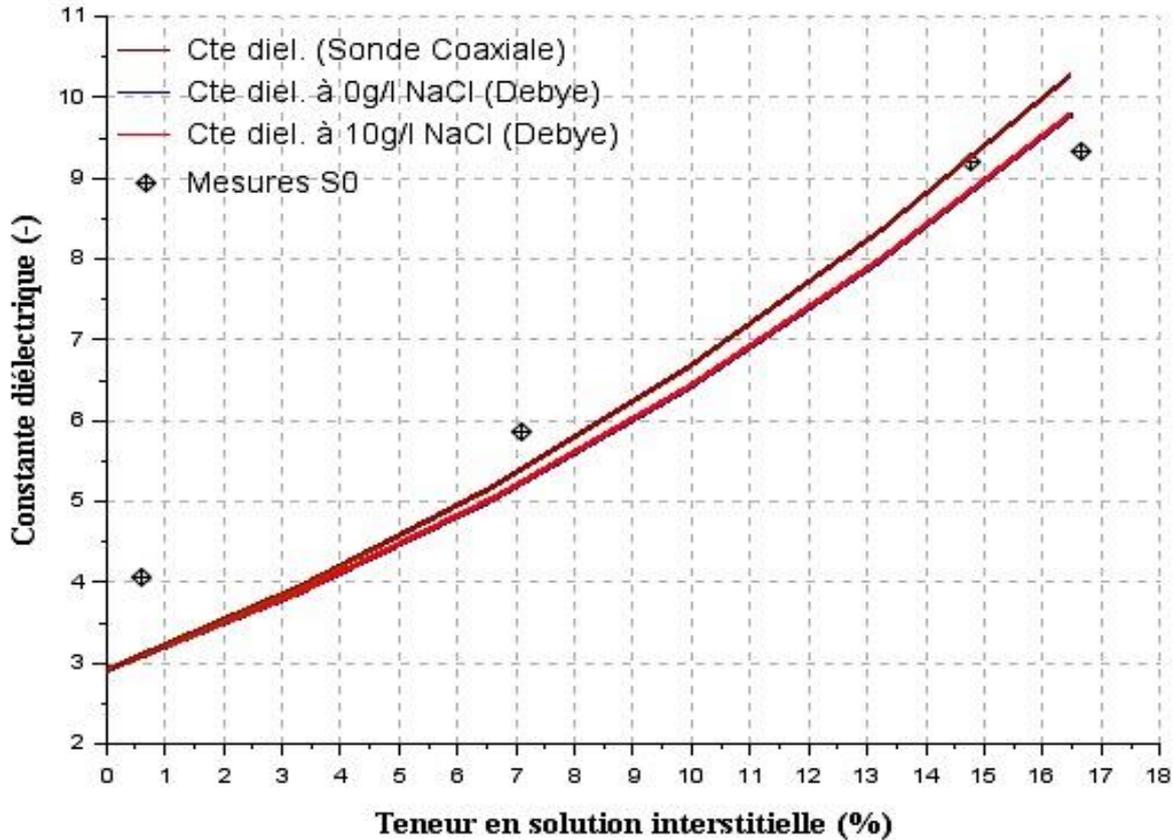


Figure V. 2-a : Variation de la constante diélectrique en fonction de la teneur en solution interstitielle – Modèle volumique avec $\alpha =1/3$.

Tableau V. 6 : EQM pour la constante diélectrique – Modèle volumique avec $\alpha =1/3$.

	ϵ'	Debye (0g/L NaCl)	Debye (10g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (0g/L NaCl)
M.V. (1/3)	EQM (S0)	0,69	0,69	0,76

L'EQM entre les valeurs de la constante diélectrique à 0g/L de NaCl et à 10g/L de NaCl, calculées avec le modèle de CRIM (**figure V.2-b**) dont les données d'entrée sont extraites du modèle de Debye, et les mesures de la série S0 est de 1,10. Cette erreur est de 1,47 si l'on considère la simulation à partir de la mesure de la sonde coaxiale (voir **tableau V.7**).

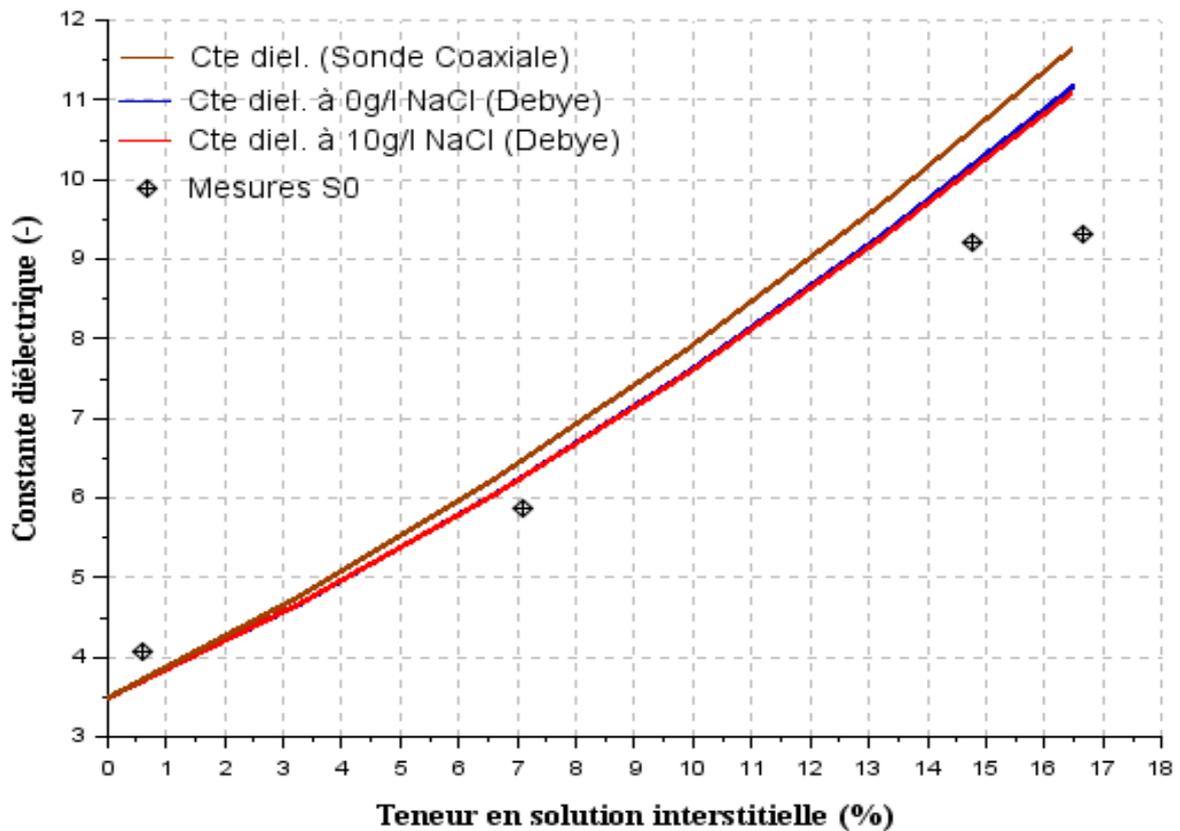


Figure V. 2-b : Variation de la constante diélectrique en fonction de la teneur en solution interstitielle – Modèle de CRIM.

Tableau V. 7 : EQM de la constante diélectrique – Modèle de CRIM.

	ϵ'	Debye (0g/L NaCl)	Debye (10g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (0g/L NaCl)
CRIM	EQM (S0)	1,10	1,10	1,47

Au final, le modèle volumique avec $\alpha=1/3$ reproduit assez bien les valeurs des constantes diélectriques obtenues sur la série S0 quelle que soit le mode de détermination des paramètres électromagnétiques de la solution interstitielle (modèle de Debye avec différentes salinités ou mesure à la sonde coaxiale). De plus ce modèle est plus efficace que le modèle de CRIM, les EQM obtenues sont en effet plus faibles (cf. **tableaux V.6** et **V.7**).

Les **figure V.2-c** et **V.2-d** représentent le résultat de la simulation de la variation du facteur de pertes en fonction de la teneur en solution interstitielle pour $\alpha=1/3$ et $1/2$. On peut remarquer que le facteur de pertes augmente à la fois avec l'augmentation de la teneur en solution interstitielle, et l'augmentation de la valeur de la partie imaginaire de la permittivité de la phase liquide (cf. (i), (ii) et (iii)) (voir aussi **tableau V.2**).

La **figure V.2-c** montre que la courbe du facteur de pertes calculée à partir du modèle volumique ($\alpha=1/3$) pour le béton non contaminé (0g/L de NaCl), dont la permittivité de la phase liquide est extraite du modèle de Debye, retranscrit avec satisfaction les facteurs de pertes calculés à partir de la résistivité. L'EQM entre les valeurs calculées et mesurées pour la série S0 est de respectivement 0,08, 0,72 et 1,37 pour une permittivité de la phase liquide calculée à partir du modèle de Debye à 0g/L de NaCl, à 10g/L de NaCl et mesurée avec la sonde coaxiale à 0g/L de NaCl (voir **tableau V.8**).

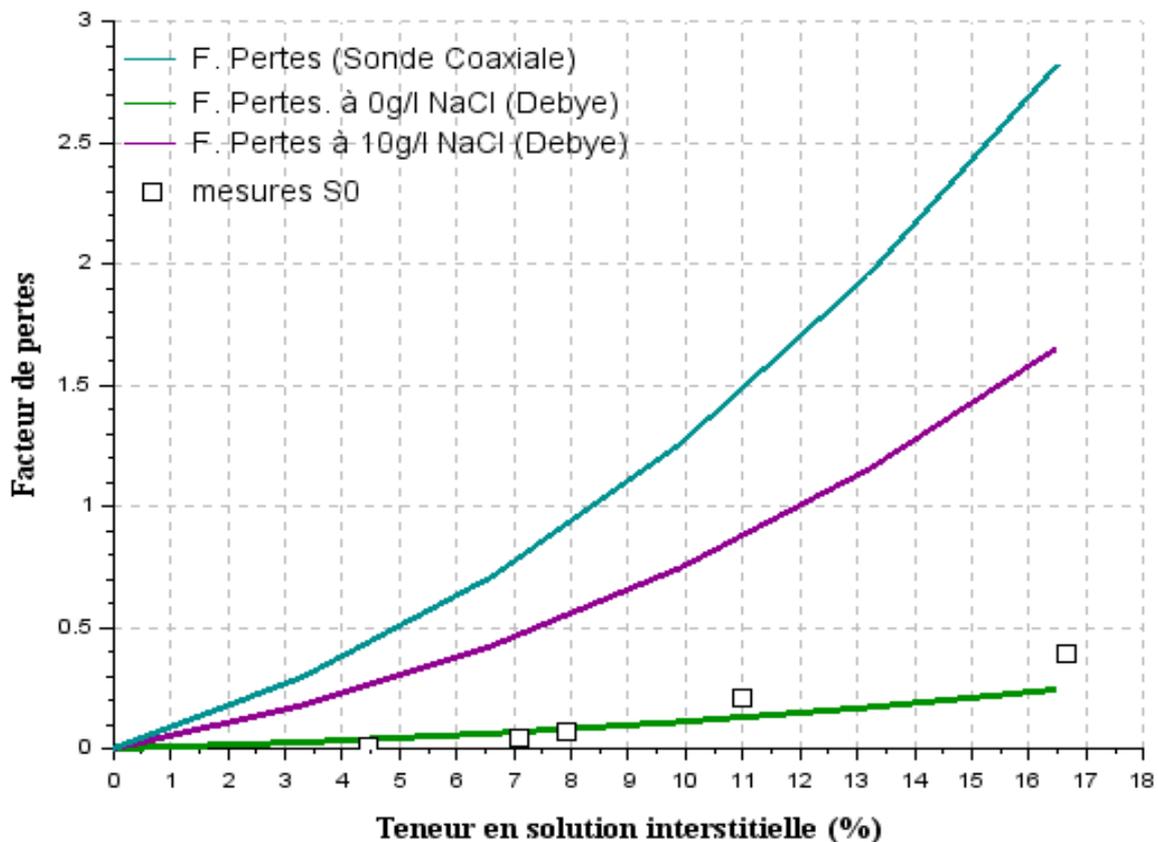


Figure V. 2-c : Variation du facteur de perte en fonction de la teneur en solution interstitielle –
Modèle volumique avec $\alpha=1/3$.

Tableau V. 8 : EQM pour le facteur de pertes – Modèle volumique avec $\alpha=1/3$.

ε''	Debye (0g/L NaCl)	Debye (10g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (0g/L NaCl)
M.V. (1/3) EQM (S0)	0,08	0,72	1,37

Aussi, sur la **figure V.2-d** l'EQM entre les valeurs calculées avec le modèle de CRIM et les valeurs obtenues à partir de la mesure de résistivité pour la série S0 est de 0,05 et 1,21 lorsque la permittivité de la phase liquide est extraite du modèle de Debye, et de 2,32 pour une

permittivité de la phase liquide obtenue à partir d'une mesure à la sonde coaxiale (voir **tableau V.9**).

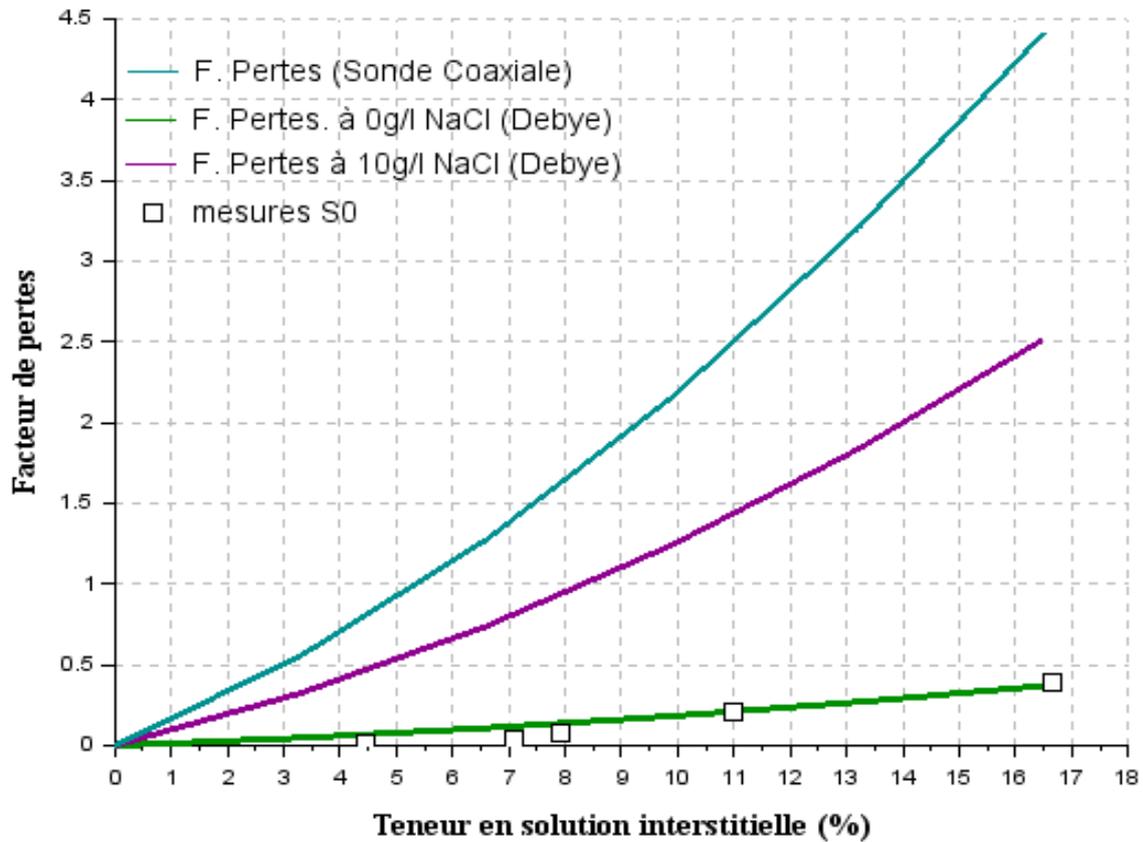


Figure V. 2-d : Variation du facteur de perte en fonction de la teneur en solution interstitielle – Modèle de CRIM, $\alpha=1/2$.

Tableau V. 9 : EQM pour le facteur de pertes – Modèle de CRIM.

	ϵ''	Debye (0g/L NaCl)	Debye (10g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (0g/L NaCl)
CRIM	EQM (S0)	0,05	1,21	2,32

Le modèle de CRIM affiche donc une assez bonne corrélation des mesures de la série S0 pour la courbe de simulation à 0g/L de NaCl dont la permittivité de la phase liquide est extraite du modèle de Debye.

Les **figures V.3-a** et **V.3-b** représentent, respectivement, les résultats de la simulation avec le modèle géométrique de De Loor, relation (5.4), de la constante diélectrique et du facteur de pertes d'un béton sain en fonction de la teneur en solution interstitielle. La **figure V.3-a** montre que le modèle est bien corrélé avec les mesures des constantes diélectriques de la série d'échantillons de béton S0. Les erreurs quadratiques moyennes entre les résultats de la simulation et les mesures de la série S0 sont de 1,06 et 0,92 lorsque la permittivité de la phase

liquide est extraite du modèle de Debye, et de 0,74 lorsque la permittivité de la phase liquide est obtenue par une mesure à la sonde coaxiale (voir **tableau V.10**).

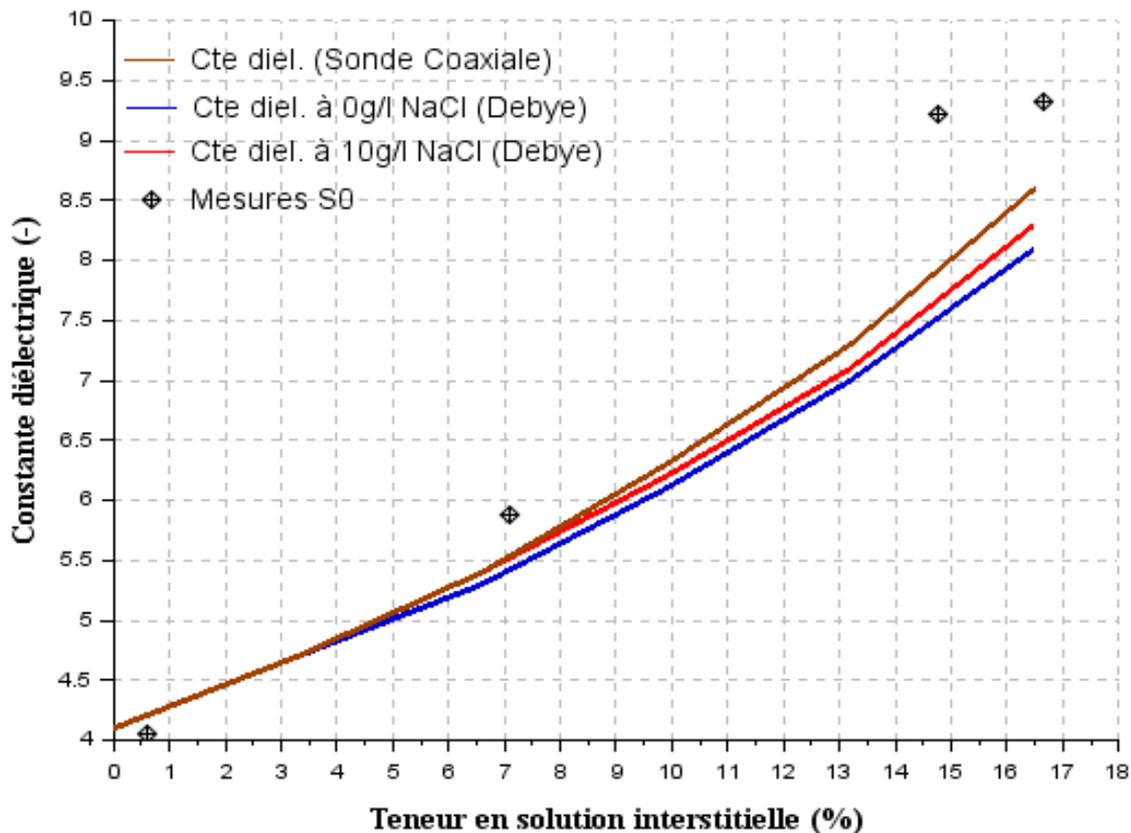


Figure V. 3-a : Variation de la constante diélectrique en fonction de la teneur en solution interstitielle – Modèle de De Loor.

Tableau V. 10 : EQM de la constante diélectrique – Modèle de De Loor.

	ϵ'	Debye (0g/L NaCl)	Debye (10g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (0g/L NaCl)
DeLoor	EQM (S0)	1,06	0,92	0,74

Au final, on observe ici une bonne corrélation du modèle géométrique de DeLoor lorsque la permittivité de la phase liquide est extraite du modèle de Debye pour une contamination à 10g/L de NaCl et lorsque la permittivité de la phase liquide est obtenue à partir d'une mesure coaxiale (cf. **tableau V.10**).

Concernant le facteur de pertes, les courbes obtenues à partir du modèle de De Loor montrent que les valeurs du facteur de pertes restent inférieures à 1 (voir **figure V.3-b**). De plus, l'EQM montre que les courbes calculées par le modèle géométrique de DeLooe reproduisent avec satisfaction les valeurs de facteur de pertes de la série S0. On peut alors conclure que dans

l'ensemble le modèle géométrique de De Loor prédit assez bien les mesures de facteur de pertes de la série S0 (voir **tableau V.11**).

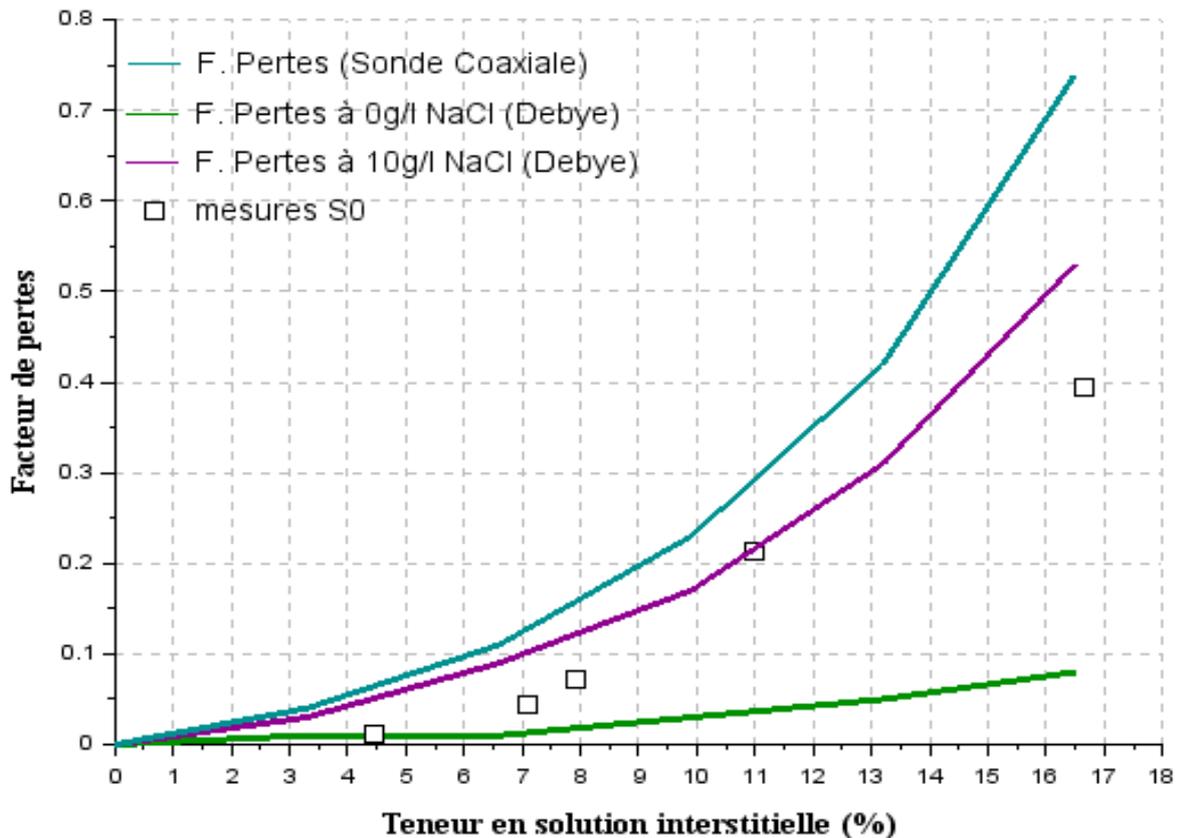


Figure V. 3-b : Variation du facteur de perte en fonction de la teneur en solution interstitielle– Modèle de De Loor.

Tableau V. 11 : EQM pour le facteur de pertes – Modèle de De Loor.

	ϵ''	Debye (0g/L NaCl)	Debye (10g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (0g/L NaCl)
DeLoor	EQM (S0)	0,16	0,08	0,18

Les **figures V.4-a** et **V.4-b** représentent, respectivement, les résultats de la simulation de la constante diélectrique et du facteur de pertes en fonction de la teneur en solution interstitielle. Cette simulation a été obtenue à partir du modèle de Maxwell-Garnett, relation (5.6). Au premier regard, la **figure V.4-a** montre que le modèle ne reproduit pas correctement les mesures de la constante diélectrique obtenue sur les échantillons de béton de la série S0. Les EQM entre les courbes de la simulation et les mesures de la série S0 sont de 1,49 pour une permittivité de la phase liquide, à 0g/L de NaCl et à 10g/L de NaCl, extraite du modèle de Debye et de 1,36 dans le cas où la permittivité de la phase liquide est obtenue à partir d'une mesure à la sonde coaxiale (cf. **tableau V.12**).

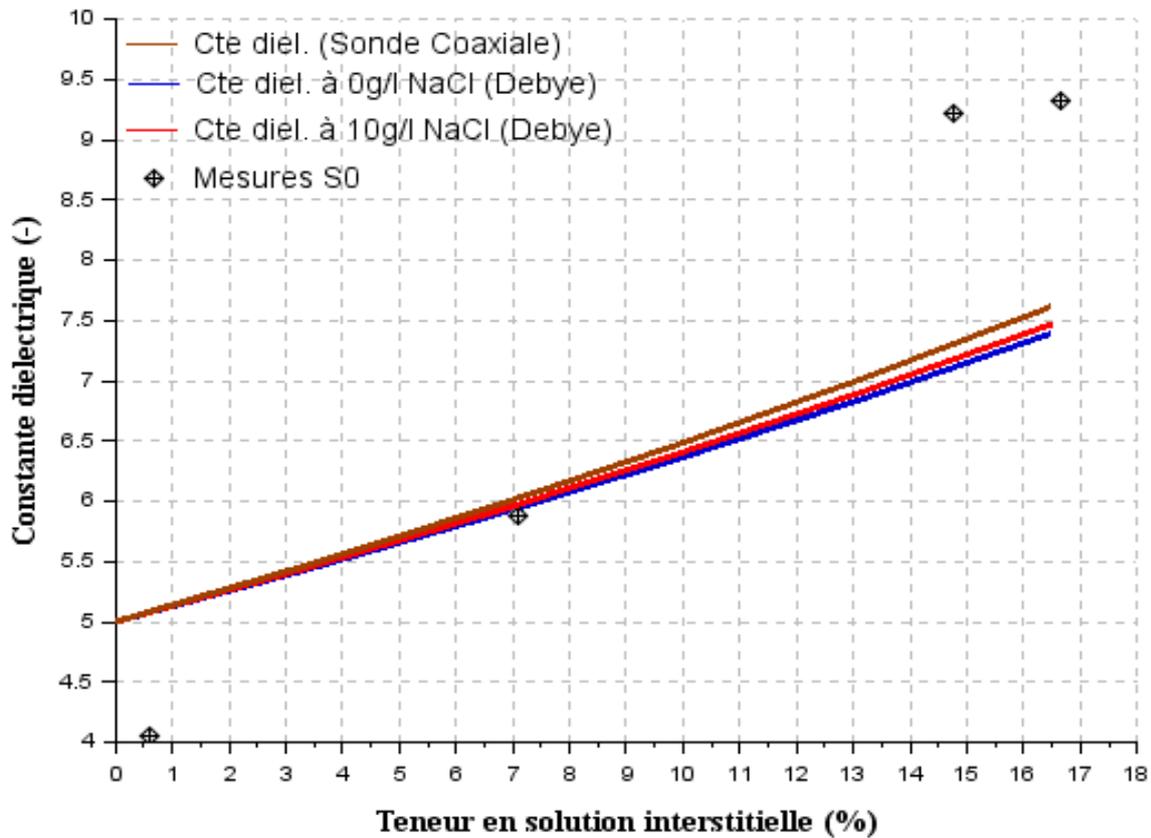


Figure V. 4-a : Variation de la constante diélectrique en fonction de la teneur en interstitielle – Modèle de Maxwell-Garnett.

Tableau V. 12 : EQM de la constante diélectrique – Modèle de Maxwell-Garnett.

	ϵ'	Debye (0g/L NaCl)	Debye (10g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (0g/L NaCl)
MG	EQM (S0)	1,49	1,49	1,36

Nous pouvons remarquer ici que les erreurs quadratiques moyennes obtenues avec la prédiction de la constante diélectrique par Maxwell-Garnett sont assez proche à celles obtenues avec le modèle volumique de CRIM.

Sur la **figure V.4-b** les courbes du facteur de pertes obtenues à partir du modèle de Maxwell-Garnett montrent une assez bonne prédiction entre les valeurs calculées et mesurées. L'EQM entre les valeurs calculées avec une permittivité de la solution interstitielle issue du modèle de Debye à 0g/L de NaCl et les mesures sur dalle est de 0,18. Cette erreur est d'environ 0,07 pour les valeurs calculées avec une permittivité extraite du modèle de Debye à 10g/L de NaCl et de 0,7 pour une permittivité de la phase liquide obtenue par une mesure à la sonde coaxiale (voir **tableau 13**). Aussi, la **figure V.4-b** montre que les valeurs fournies par le modèle restent inférieures à 0,4.

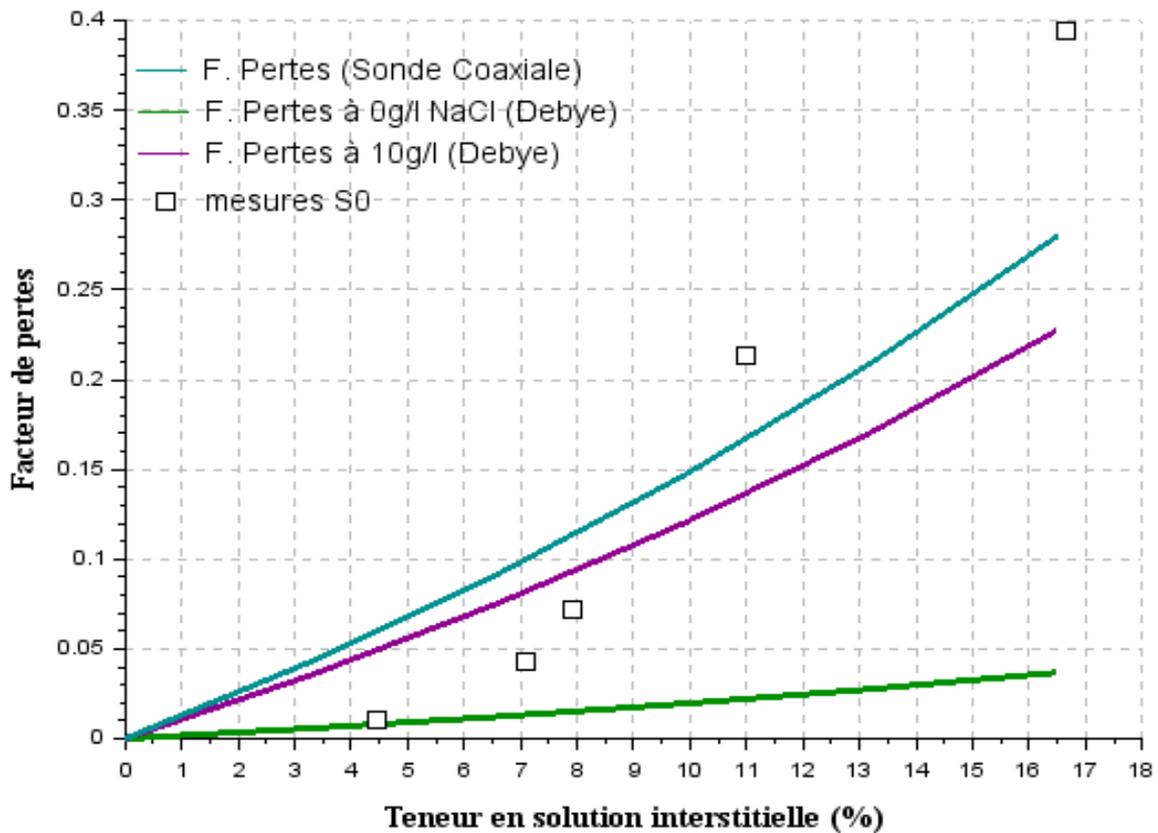


Figure V. 4-b : Variation du facteur de perte en fonction de la teneur en solution interstitielle – Modèle de Maxwell-Garnett.

Tableau V. 13 : EQM pour le facteur de pertes – Modèle de Maxwell-Garnett.

	ϵ''	Debye (0g/L NaCl)	Debye (10g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (0g/L NaCl)
MG	EQM (S0)	0,18	0,08	0,07

En conclusion, le modèle géométrique de De Loor et le modèle volumique avec $\alpha=1/3$ reproduisent assez bien les mesures des constantes diélectriques de la série S0. Toutefois, on observe seulement une bonne prédiction des valeurs du facteur de pertes uniquement sur le modèle géométrique de DeLoor et le modèle d'homogénéisation de Maxwell-Garnett.

V.5.2 Simulation pour un béton contaminé à 30 g/L de NaCl

La figure V.5-a et V.5-b représentent respectivement la simulation de la constante diélectrique du béton contaminé à 30g/L de NaCl en fonction de la teneur en solution interstitielle pour $\alpha=1/3$ et $1/2$ (modèle de CRIM). La figure V.5-a montre que le modèle

volumique avec $\alpha=1/3$ affiche une bonne prédiction des valeurs de constantes diélectriques des séries S1, S2 et S3.

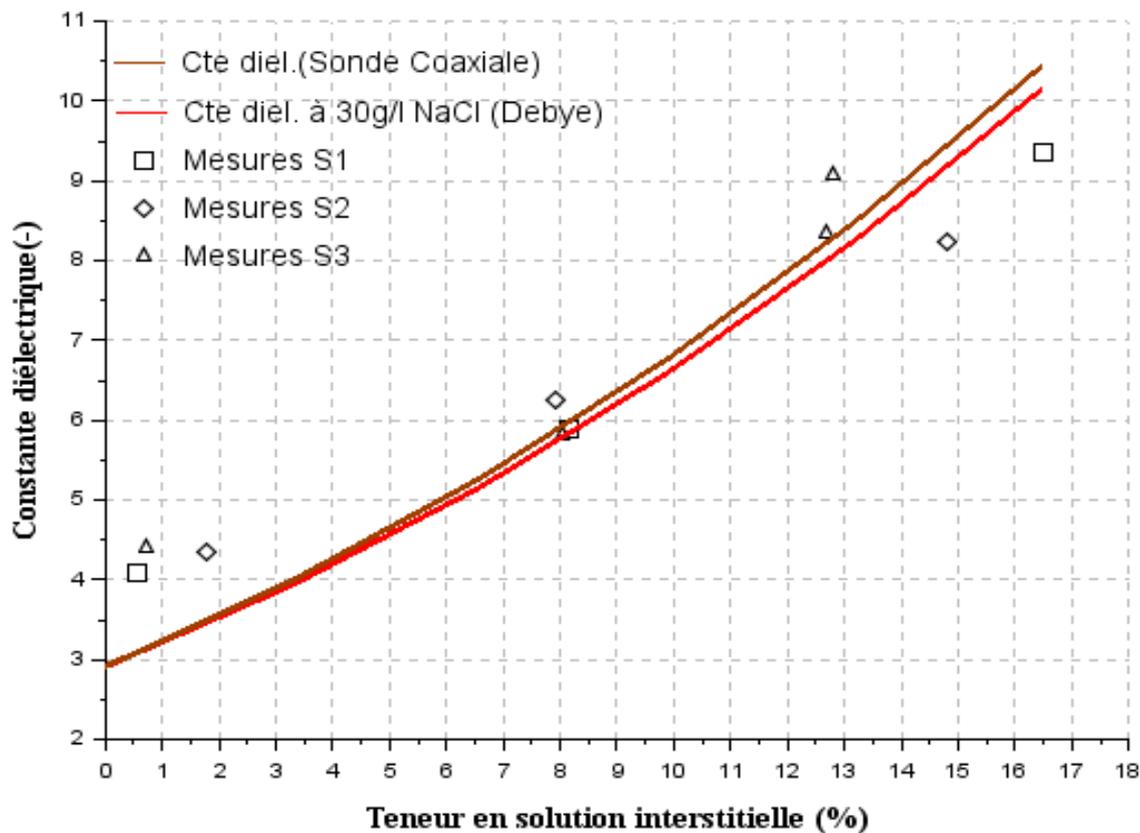


Figure V. 5-a : Variation de la constante diélectrique en fonction de la teneur en eau – Modèle volumique avec $\alpha=1/3$.

En effet, l'erreur quadratique moyenne entre les résultats de la simulation à 30g/L de NaCl fournis par le modèle volumique avec $\alpha=1/3$ et les mesures des différentes séries de béton est d'environ 0,80 (voir **tableau V.14**).

Tableau V. 14 : EQM de la constante diélectrique pour 30g/L de NaCl – Modèle volumique $\alpha =1/3$.

	ϵ'	Debye (30g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (30g/L NaCl)
M.V. (1/3)	EQM (S1)	0,73	0,83
	EQM (S2)	0,80	0,88
	EQM (S3)	0,83	0,75

Sur la **figure V.5-b** l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs calculées avec le modèle de CRIM et les mesures sur dalle est d'environ 1,3 pour les séries S1 et S2, et de 0,76 pour la série S3 (voir **tableau V.15**).

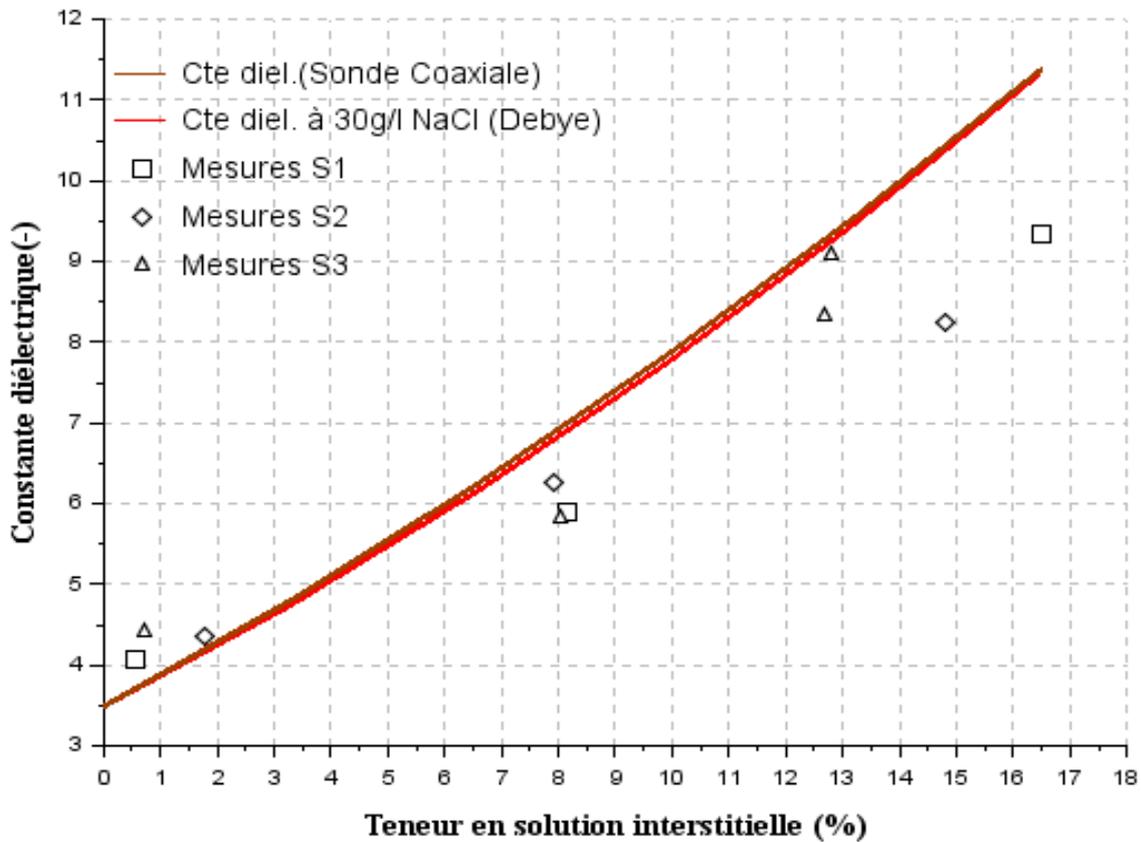


Figure V. 5-b : Variation de la constante diélectrique en fonction de la teneur en eau – Modèle de CRIM.

Tableau V. 15 : EQM de la constante diélectrique pour 30g/L de NaCl – Modèle de CRIM.

	ϵ'	Debye (30g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (30g/L NaCl)
CRIM	EQM (S1)	1,31	1,31
	EQM (S2)	1,30	1,30
	EQM (S3)	0,76	0,76

On peut donc remarquer à partir des **tableaux V.14** et **V.15** que là aussi les prédictions réalisées avec le modèle volumique avec $\alpha=1/3$ sont plus précises que celles avec le modèle de CRIM.

D'autre part, les **figures V.5-c** et **V.5-d** montrent le résultat de la simulation du facteur de pertes en fonction de la teneur en solution interstitielle pour $\alpha=1/3$ et $1/2$. Sur ces deux figures, la simulation des modèles volumiques affiche des valeurs de facteur de pertes plus élevées que celles obtenues sur les mesures de la série S1.

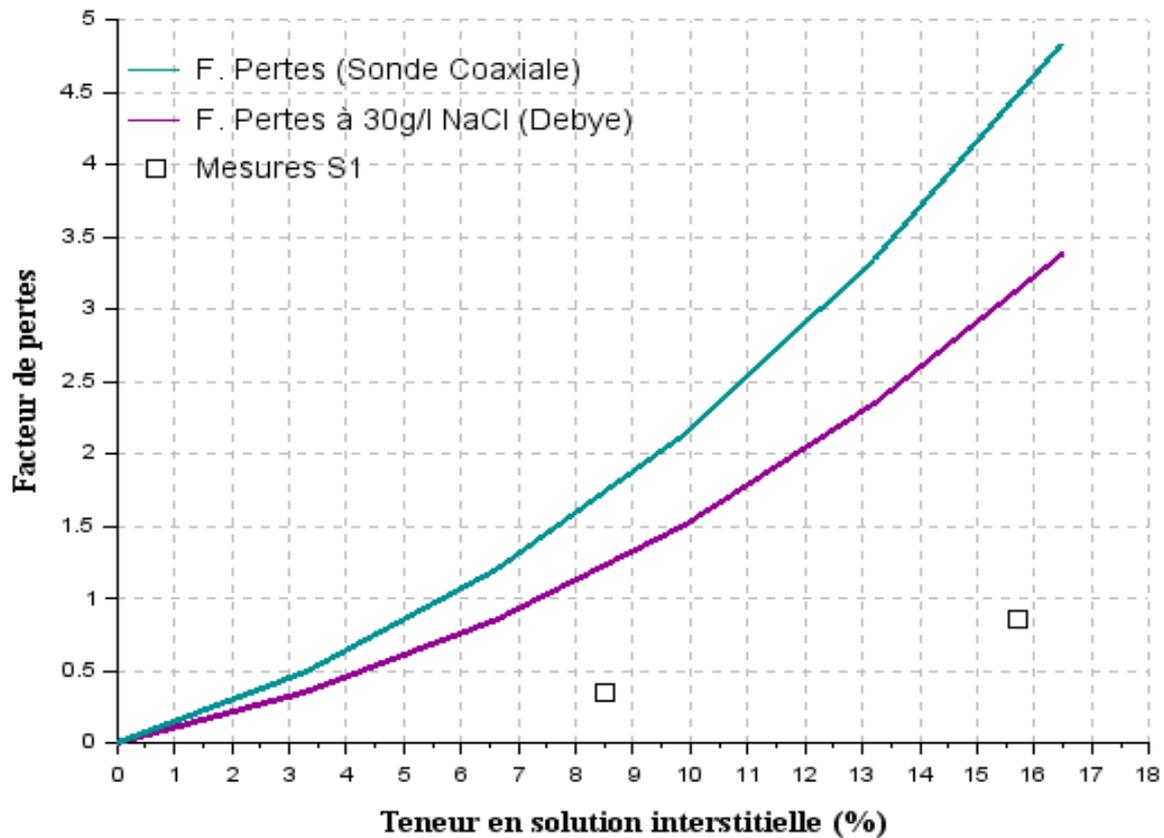


Figure V. 5-c : Variation du facteur de perte en fonction de la teneur en eau – Modèle volumique avec $\alpha=1/3$.

L'erreur quadratique moyenne entre les valeurs fournies par le modèle volumique avec $\alpha=1/3$ et les mesures de la série S1 est de 1,72 pour les valeurs calculées avec la permittivité de la solution interstitielle extraite du modèle de Debye, et est de 2,76 pour celles calculés avec la permittivité de la solution interstitielle mesurée par la sonde coaxiale (cf. **tableau V.16**).

Tableau V. 16 : EQM du facteur de pertes pour 30g/L de NaCl - Modèle volumique avec $\alpha = 1/3$.

	ϵ''	Debye (30g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (30g/L NaCl)
M.V. (1/3)	EQM (S1)	1,72	2,76

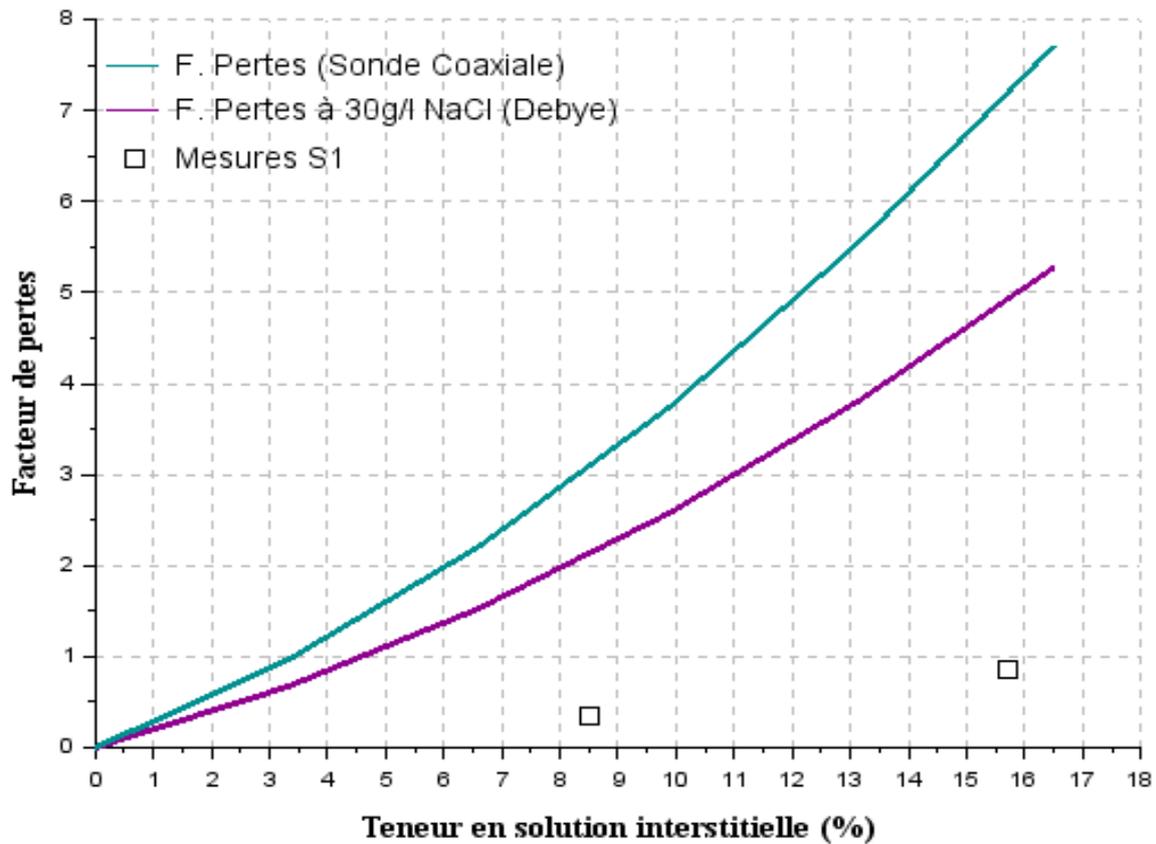


Figure V. 5-d : Variation du facteur de perte en fonction de la teneur en eau – Modèle de CRIM.

Aussi, les résultats de la **figure V.5-d**, calculés à partir du modèle de CRIM, montrent que cette erreur est respectivement de 3,15 et de 4,87 pour les valeurs calculées à partir de la permittivité de la solution interstitielle issue du modèle de Debye à 30g/L de NaCl et de la permittivité de la solution interstitielle mesurée par la sonde coaxiale (cf. **tableau V.17**).

Tableau V. 17 : EQM du facteur de pertes pour 30g/L de NaCl –Modèle de CRIM.

	ϵ''	Debye (30g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (30g/L NaCl)
CRIM	EQM (S1)	3,15	4,87

D'autre part, les **figures V.6-a** et **V.6-b** représentent les résultats du modèle de De Loor sur la constante diélectrique et le facteur de pertes en fonction de la teneur en solution interstitielle. La **figure V.6-a** montre que le modèle reproduit de façon satisfaisante les mesures des constantes diélectriques des séries S1, S2 et S3. En effet, le **tableau V.18** montre que l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs calculées à partir de la permittivité de la solution interstitielle de Debye à 30 g/L de NaCl et les mesures sur dalle est respectivement de 0,41, 0,32 et 1,08 par rapport aux séries S1, S2 et S3. Cette erreur est alors respectivement de 0,21,

0,24 et 0,95 lorsque la permittivité de la solution interstitielle est issue de la mesure de la sonde coaxiale.

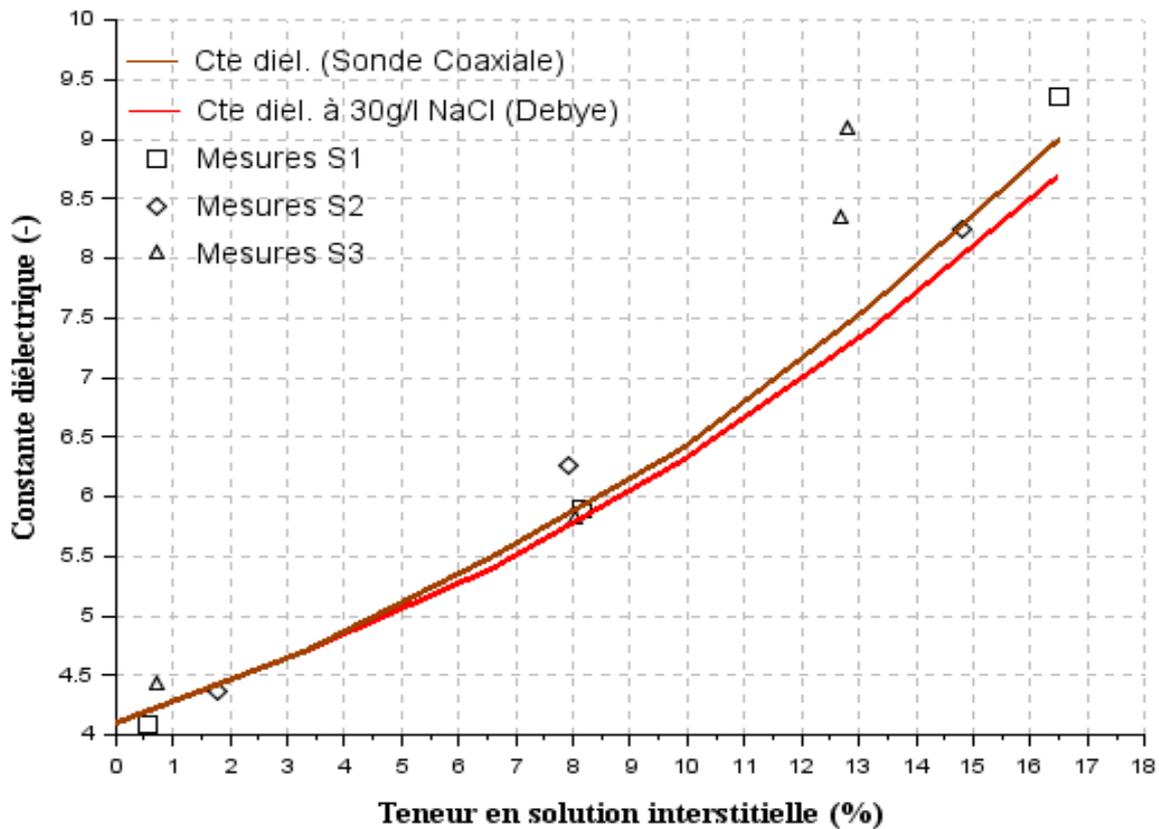


Figure V. 6-a : Variation de la constante diélectrique en fonction de la teneur en eau – Modèle de De Loor.

Tableau V. 18 : EQM de la constante diélectrique pour 30g/L de NaCl – Modèle de De Loor.

	ϵ'	Debye (30g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (30g/L NaCl)
DeLoor	EQM (S1)	0,41	0,21
	EQM (S2)	0,32	0,24
	EQM (S3)	1,08	0,95

La **figure V.6-b** montre que les valeurs du facteur de pertes calculées à partir du modèle de De Loor reproduit pratiquement les mesures de la série S1. En effet, l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs calculées par le modèle et les mesures de la série S1 est inférieur à 0,12 (voir **tableau V.19**).

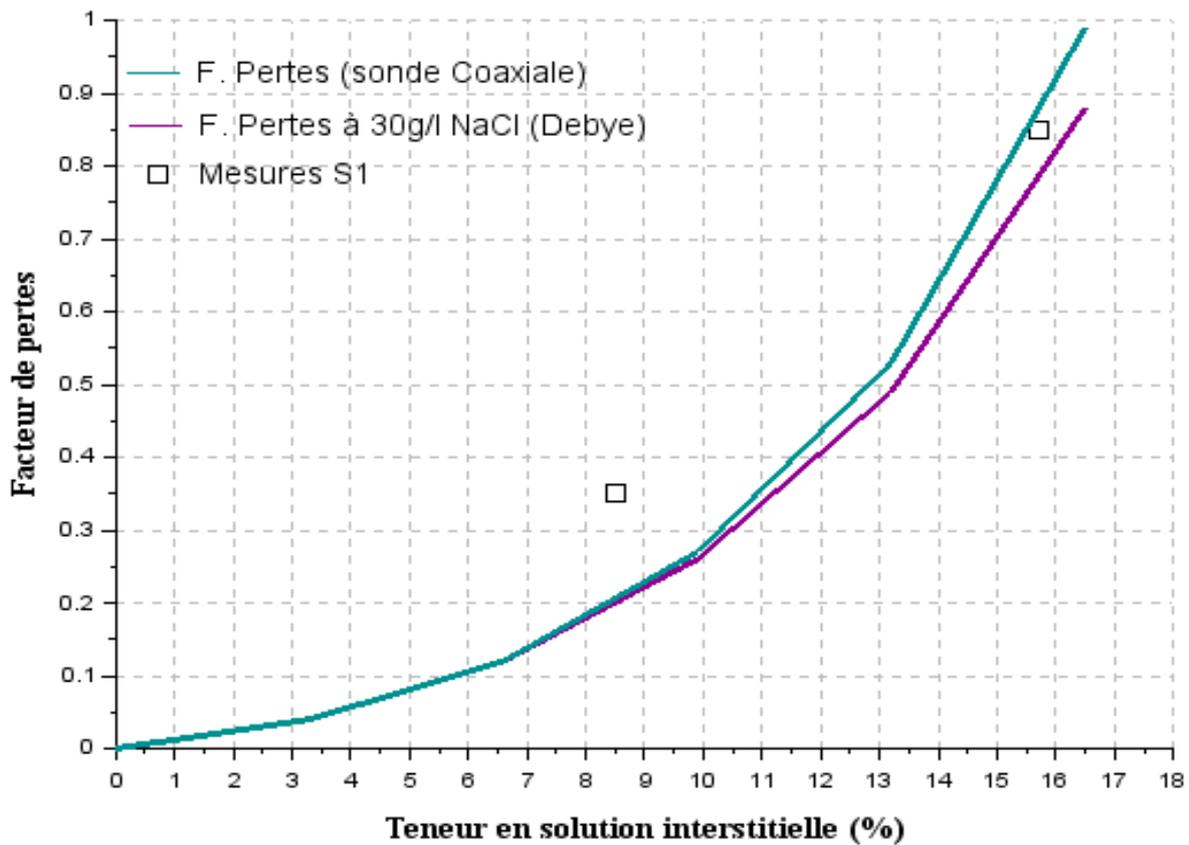


Figure V. 6-b : Variation du facteur de perte en fonction de la teneur en eau – Modèle de De Loor.

Tableau V. 19 : EQM du facteur de pertes pour 30g/L de NaCl – Modèle de De Loor.

	ϵ''	Debye (30g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (30g/L NaCl)
DeLoor	EQM (S1)	0,12	0,11

Les **figure V.7-a** et **V.7-b** représentent les valeurs calculées par le modèle de Maxwell-Garnett de la constante diélectrique et du facteur de pertes en fonction de la teneur en solution interstitielle. Les valeurs de constantes diélectrique représentées sur la **figure V.7-a** montrent que le modèle d'homogénéisation de Maxwell-Garnett n'arrive pas à reproduire les mesures de constante diélectrique obtenues sur les séries de béton S1, S2 et S3. Toutefois, en comparant le modèle d'homogénéisation de Maxwell-Garnett au modèle volumique de CRIM, on observe que les erreurs quadratiques moyennes entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées sur les séries S1 et S2 sont plus faibles sur le modèle d'homogénéisation de Maxwell-Garnett que sur le modèle volumique de CRIM (voir **tableau V.15** et **V.20**).

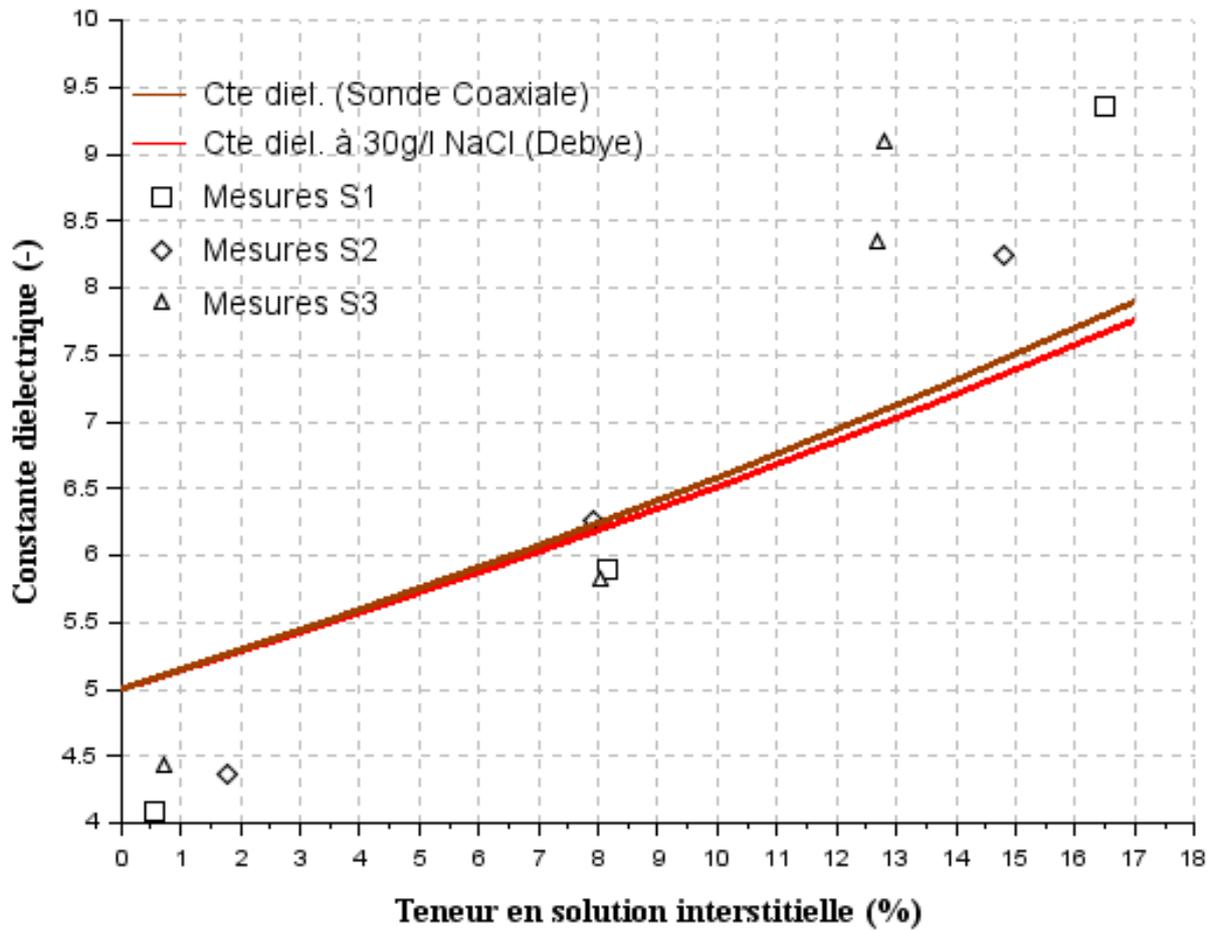


Figure V. 7-a : Variation de la constante diélectrique en fonction de la teneur en eau – Modèle de Maxwell-Garnett

Tableau V. 20 : EQM du facteur de pertes pour 30g/L de NaCl – Modèle de De Loor.

	ϵ'	Debye (30g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (30g/L NaCl)
MG	EQM (S1)	1,22	1,14
	EQM (S2)	0,73	0,73
	EQM (S3)	1,33	1,25

Par ailleurs, la **figure V.7-b** montre que les valeurs de facteur de pertes calculées par le modèle d'homogénéisation de Maxwell-Garnett restent éloignées des valeurs mesurées sur les échantillons de béton de la série S1. Cependant, l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs calculées par le modèle et mesurées sur les échantillons de béton de la série S1 montre que le modèle d'homogénéisation de Maxwell-Garnett est plus performant que les deux modèles volumiques lorsqu'il s'agit de reproduire les valeurs de facteur de pertes obtenues sur dalles (voir **tableaux V.16, V.17 et V.21**). Il faut aussi remarquer que comparé aux modèles

volumiques, le modèle de Maxwell-Garnett affiche des valeurs de facteur de pertes inférieures à 0,9.

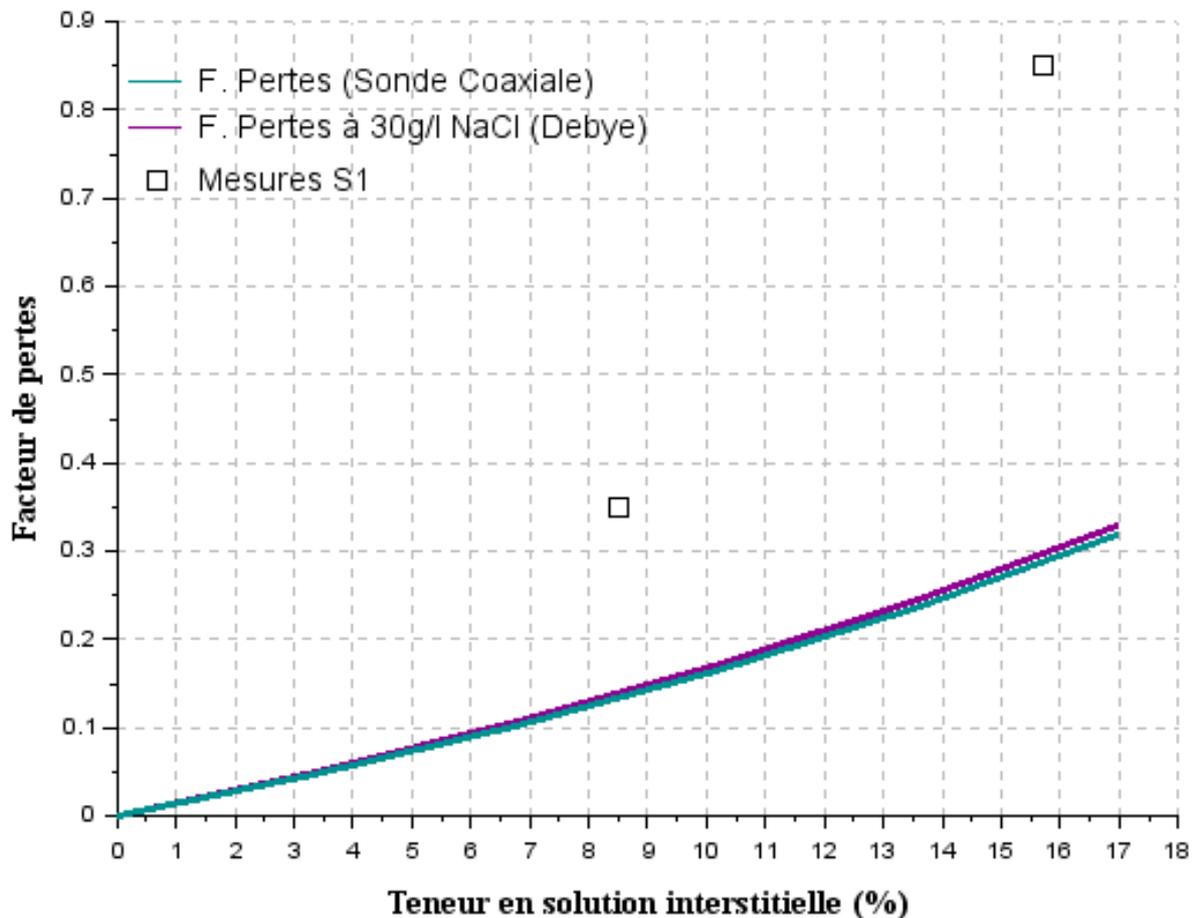


Figure V. 7-b : Variation du facteur de perte en fonction de la teneur en eau – Modèle de Maxwell-Garnett.

Tableau V. 21 : EQM du facteur de pertes pour 30g/L de NaCl – Modèle de De Loor.

	ϵ''	Debye (30g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (30g/L NaCl)
MG	EQM (S1)	0,42	0,42

En conclusion, mis à part le modèles d’homogénéisation de Maxwell-Garnett, on observe au premier regard que les modèles reproduisent de façon satisfaisante les valeurs des constantes diélectriques issues des différentes séries d’échantillons de béton. Cependant, les erreurs quadratiques moyennes montrent que seul le modèle géométrique de De Loor ainsi que le modèle volumique avec $\alpha=1/3$ affichent des valeurs de constantes diélectriques calculées proches des mesures obtenues sur les échantillons de béton. De plus, les erreurs quadratiques moyennes des facteurs de pertes montrent qu’une bonne corrélation des valeurs mesurées est obtenue sur le modèle géométrique de De Loor et le modèle d’homogénéisation de Maxwell-

Garnett. En effet, les deux modèles volumiques semblent être incapable de reproduit de façon efficace les valeurs de facteur de pertes mesurées sur la série S1.

V.5.3 Simulation pour un béton contaminé à 120 g/L de NaCl

Les figures V.8-a et V.8-b représentent les résultats de la simulation des modèles volumiques pour $\alpha=1/3$ et $\alpha=1/2$. On observe sur la figure V.8-a que les résultats obtenus par le modèle volumique avec $\alpha=1/3$ sont assez bien corrélés avec les mesures de la série S1.2. Toutefois, l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs calculées par le modèle et celles mesurées sur dalle est plus faible lorsque la permittivité de la solution interstitielle mesurée par la sonde coaxiale est utilisée, 1,07 contre 1,87 (voir tableau V.22).

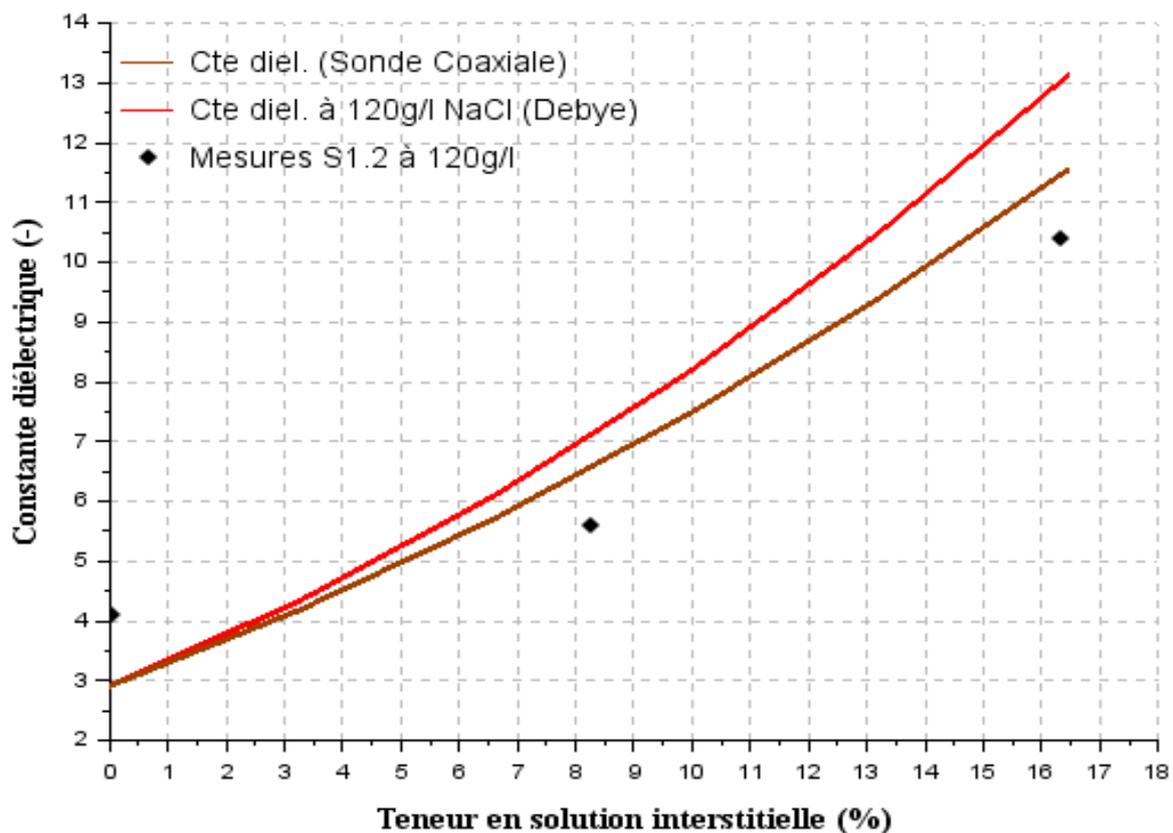


Figure V. 8-a : Variation de la constante diélectrique en fonction de la teneur en eau – Modèle volumique avec $\alpha=1/3$.

Tableau V. 22 : EQM de la constante diélectrique pour 120g/L de NaCl – Modèle volumique $\alpha =1/3$.

	ϵ'	Debye (120g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (120g/L NaCl)
M.V. (1/3)	EQM (S1.2)	1,87	1,07

De même, les résultats du modèle de CRIM (cf. **figure V.8-b** et le **tableau V.23**) montrent que les valeurs calculées à partir de la permittivité de la solution interstitielle mesurée par la sonde coaxiale semblent se rapprocher des mesures de la série S1.2.

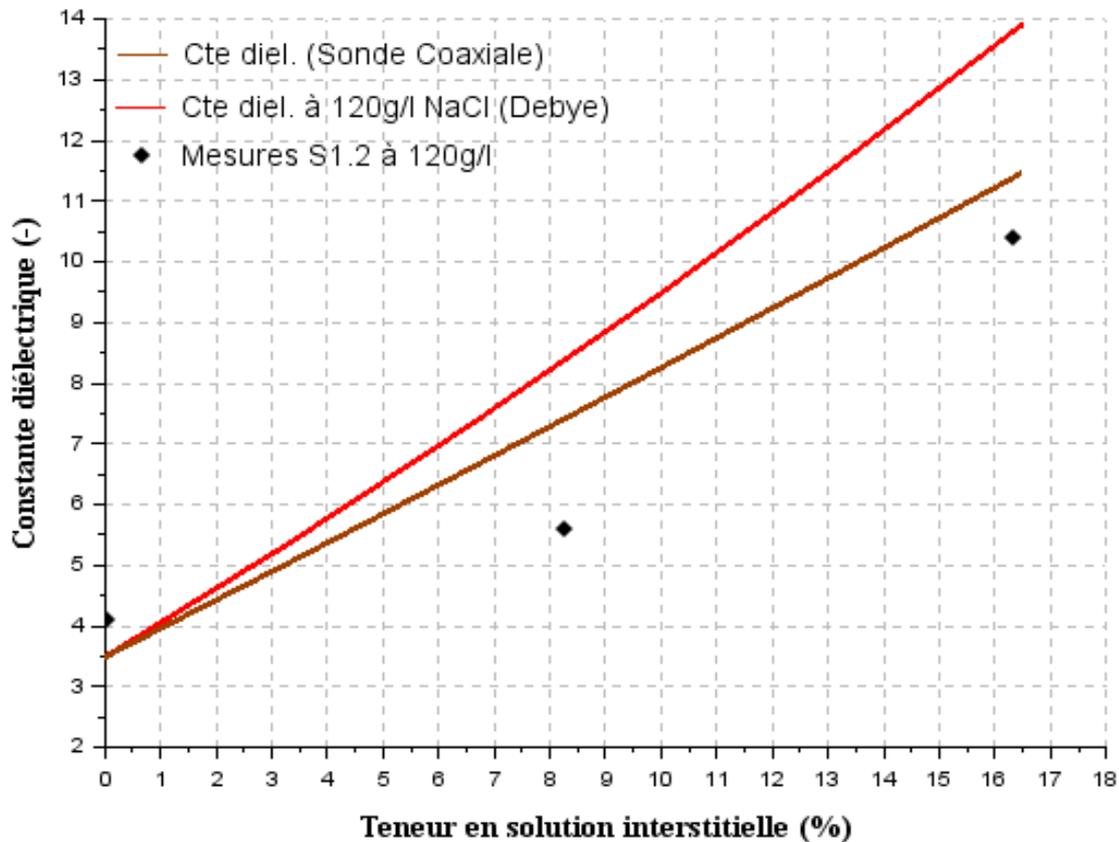


Figure V. 8-b : Variation de la constante diélectrique en fonction de la teneur en eau – Modèle de CRIM.

Tableau V. 23 : EQM de la constante diélectrique pour 120g/L de NaCl – Modèle de CRIM.

	ϵ'	Debye (120g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (120g/L NaCl)
CRIM	EQM (S1.2)	2,55	1,21

On observe donc que parmi les deux modèles volumiques, le modèle volumique avec $\alpha=1/3$ reproduit de manière efficace les mesures de la série S1.2. De plus, il semblerait que les valeurs calculées à partir de la permittivité de la solution interstitielle mesurée par la sonde coaxiale se rapprochent davantage des mesures sur dalle.

Sur les **figures V.8-c** et **V.8-d** sont représentées les résultats du facteur de pertes en fonction de la teneur en solution interstitielle pour $\alpha=1/3$ et $1/2$. Ces deux figures montrent que les résultats obtenus par les deux modèles volumiques sont éloignés des mesures de la série S1.2. L'erreur quadratique moyenne entre les résultats calculés par le modèle volumique avec $\alpha=1/3$ et les mesures sur dalle est de 5,47 lorsqu'on utilise une permittivité de la solution interstitielle extraite du modèle de Debye, et de 4,73 lorsque cette permittivité est issue de la mesure à la sonde coaxiale (voir **tableau 24**). Sur le modèle de CRIM, cette erreur est de 11,62 lorsque la permittivité de la phase liquide provient du modèle de Debye, et de 9,74 lorsque celle-ci provient d'une mesure à la sonde (voir **tableau V.25**).

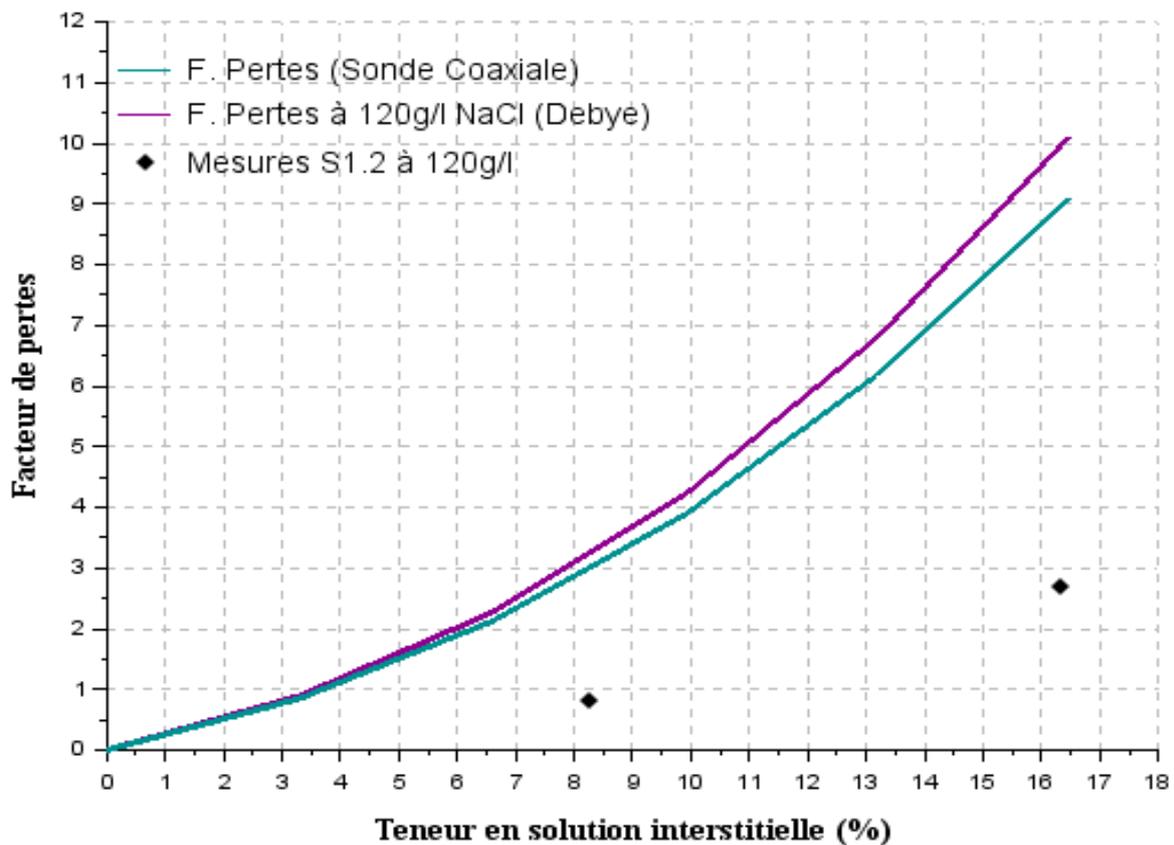


Figure V. 8-c : Variation du facteur de pertes en fonction de la teneur en eau – Modèle volumique avec $\alpha=1/3$.

Tableau V. 24 : EQM du facteur de pertes pour 120g/L de NaCl – Modèle volumique avec $\alpha=1/3$.

	ϵ''	Debye (120g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (120g/L NaCl)
M.V. (1/3)	EQM (S1.2)	5,47	4,73

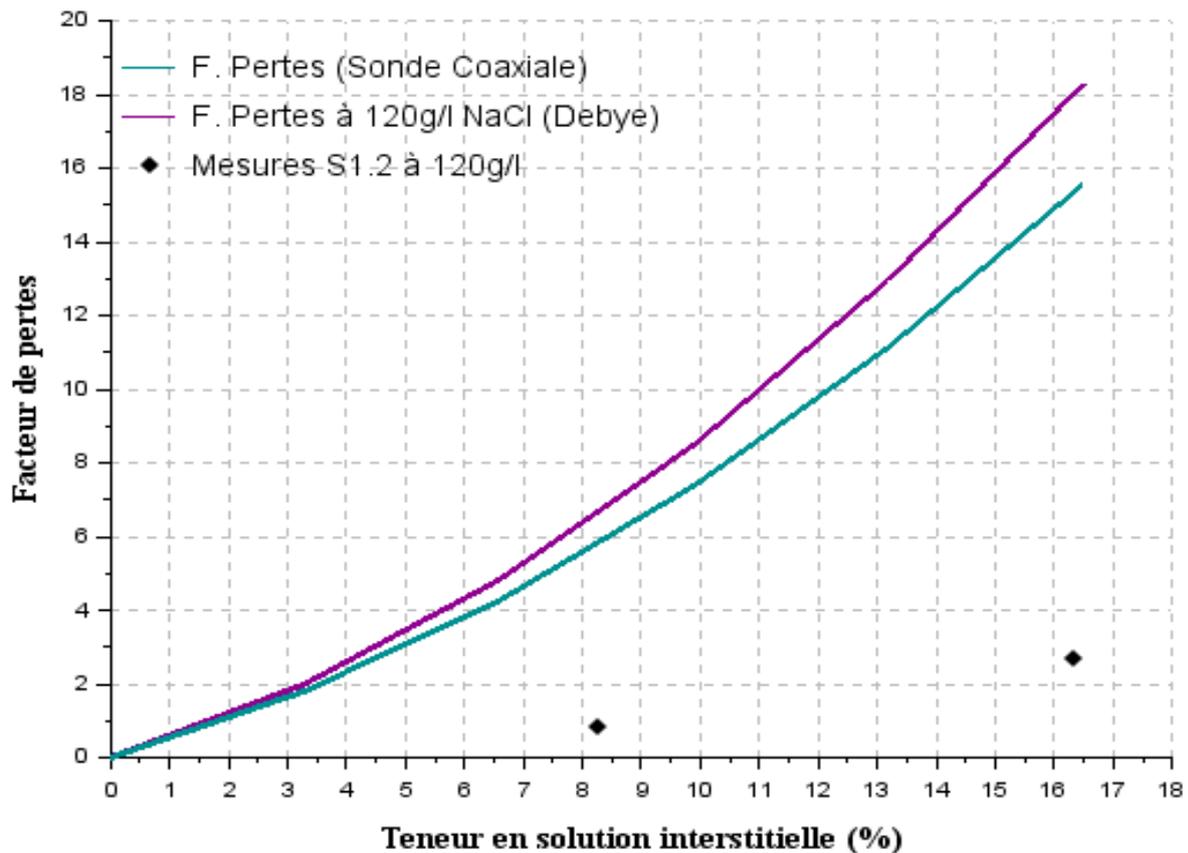


Figure V.8-d : Variation du facteur de pertes en fonction de la teneur en eau – Modèle de CRIM.

Tableau V. 25 : EQM du facteur de pertes pour 120g/L de NaCl – Modèle de CRIM.

	ϵ''	Debye (120g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (120g/L NaCl)
CRIM	EQM (S1.2)	11,62	9,74

Par conséquent, les deux modèles volumiques (modèle volumique avec $\alpha=1/3$ et modèle de CRIM) ne sont pas performants lorsqu'il s'agit de reproduire les valeurs de facteur de pertes de la série S1.2.

Ci-dessous sont représentées les **figures V.9-a** et **V.9-b**. Elles représentent respectivement les résultats calculés par le modèle de De Loor de la constante diélectrique et du facteur de pertes en fonction de la teneur en solution interstitielle pour un béton contaminé à 120g/L de NaCl. La **figure V.9-a** montre que les valeurs calculées par le modèle de De Loor imitent de manière satisfaisante le comportement diélectrique de la série S1.2. En effet, l'erreur quadratique moyenne des valeurs calculées et mesurées est de 0,51 (voir le **tableau V.26**).

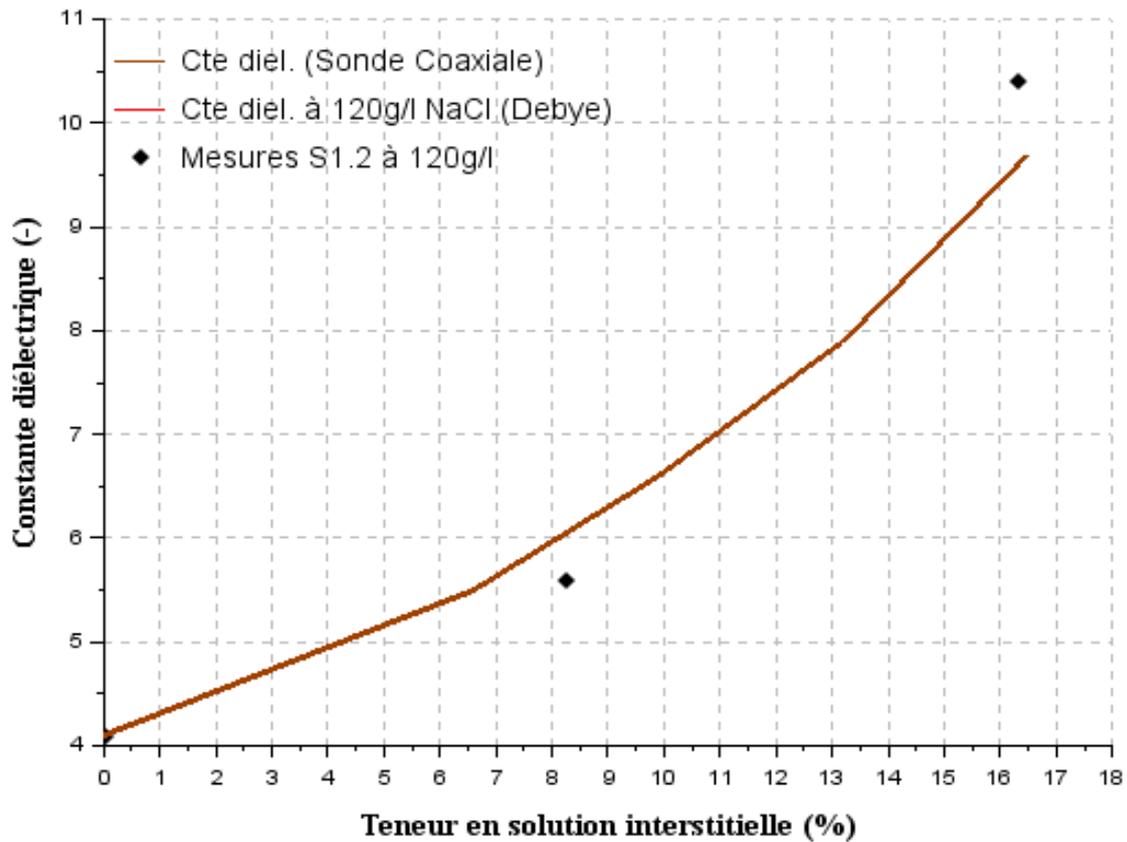


Figure V. 9-a : Variation de la constante diélectrique en fonction de la teneur en eau – Modèle de De Loor.

Tableau V. 26 : EQM pour la constante diélectrique à 120g/L de NaCl – Modèle de De Loor.

	ϵ'	Debye (120g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (120g/L NaCl)
DeLoor	EQM (S1.2)	0,51	0,51

Concernant les résultats calculés du facteur de pertes, au premier regard la **figure V.9-b** montre que les valeurs ne reproduisent pas les mesures de la série S1.2. Ainsi, l'EQM entre les valeurs calculées par le modèle et mesurées sur les dalles est de 1,57 si l'on considère le résultat à partir de la permittivité de la solution interstitielle extraite du modèle de Debye, et de 1,47 si la permittivité de la solution interstitielle est obtenue par une mesure à la sonde coaxiale (voir **tableau 27**).

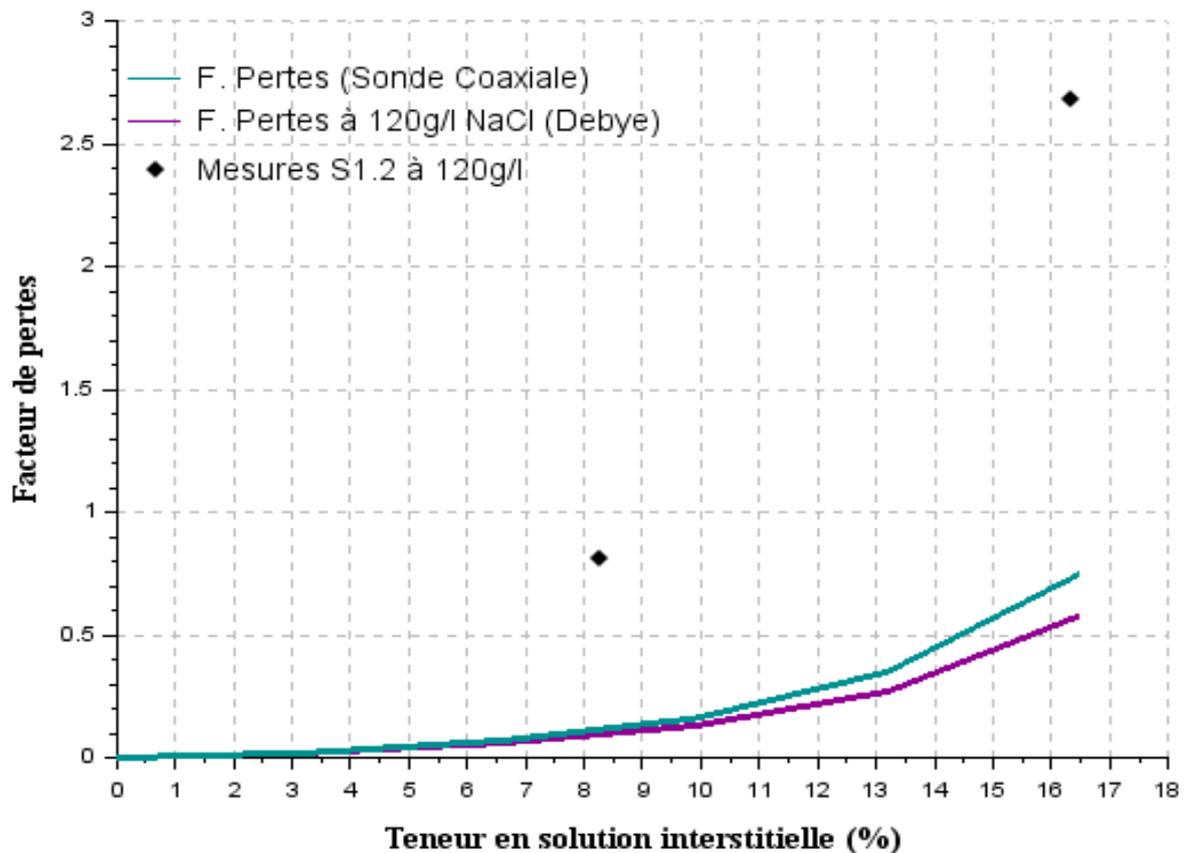


Figure V. 9-b : Variation du facteur de pertes en fonction de la teneur en eau – Modèle de De Loor.

Tableau V. 27 : EQM du facteur de pertes pour 120g/L de NaCl – Modèle de De Loor.

	ϵ''	Debye (120g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (120g/L NaCl)
DeLoor	EQM (S1.2)	1,57	1,47

Les figures V.10-a et V.10-b représentent les résultats du modèle d'homogénéisation de Maxwell-Garnett sur la constante diélectrique et le facteur de pertes en fonction de la teneur en solution interstitielle. On observe au premier regard sur la figure V.10-a que le modèle de Maxwell-Garnett affiche des valeurs de constante diélectrique calculées assez éloignées de valeurs mesurées sur la série de béton S1.2. Toutefois, l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs calculées et mesurées est de 1,61 (voir tableau V.28), une EQM plus faible que celles observées sur les deux modèles volumiques (voir tableaux V.22 et V.23).

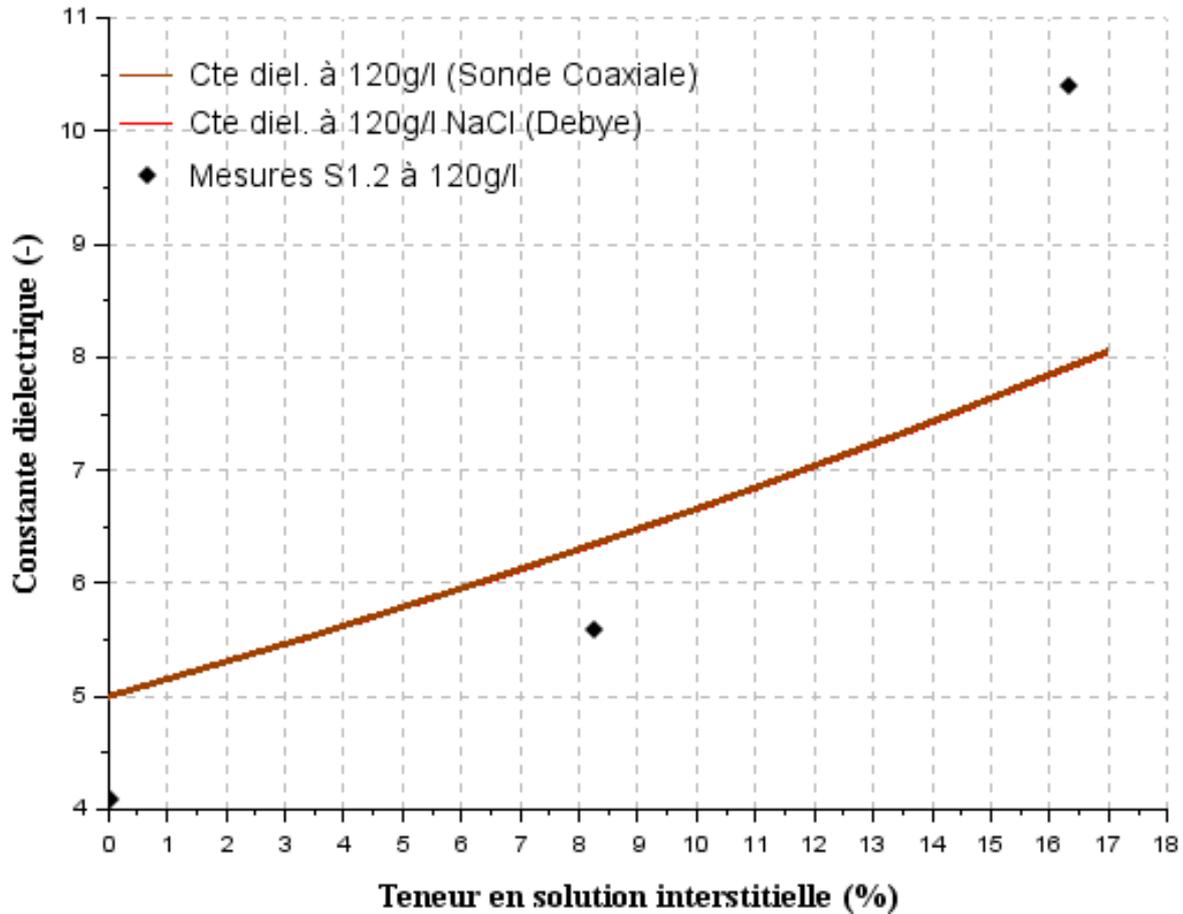


Figure V. 10-a : Variation de la constante diélectrique en fonction de la teneur en eau – Modèle de Maxwell-Garnett.

Tableau V. 28 : EQM pour la constante diélectrique à 120g/L de NaCl – Modèle de Maxwell-Garnett.

	ϵ'	Debye (120g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (120g/L NaCl)
MG	EQM (S1.2)	1,61	1,61

Concernant le facteur de pertes, la **figure V.10-b** montre que les valeurs calculées à partir du modèle d’homogénéisation de Maxwell-Garnett sont très éloignées des valeurs mesurées sur la série S1.2. Cependant, l’erreur quadratique moyenne montre que les valeurs calculées à partir du modèle d’homogénéisation de Maxwell-Garnett sont assez proche des mesures sur dalles comparé aux erreurs quadratiques moyennes des deux modèles volumiques (voir **tableaux V.24, V.25 et V.29**).

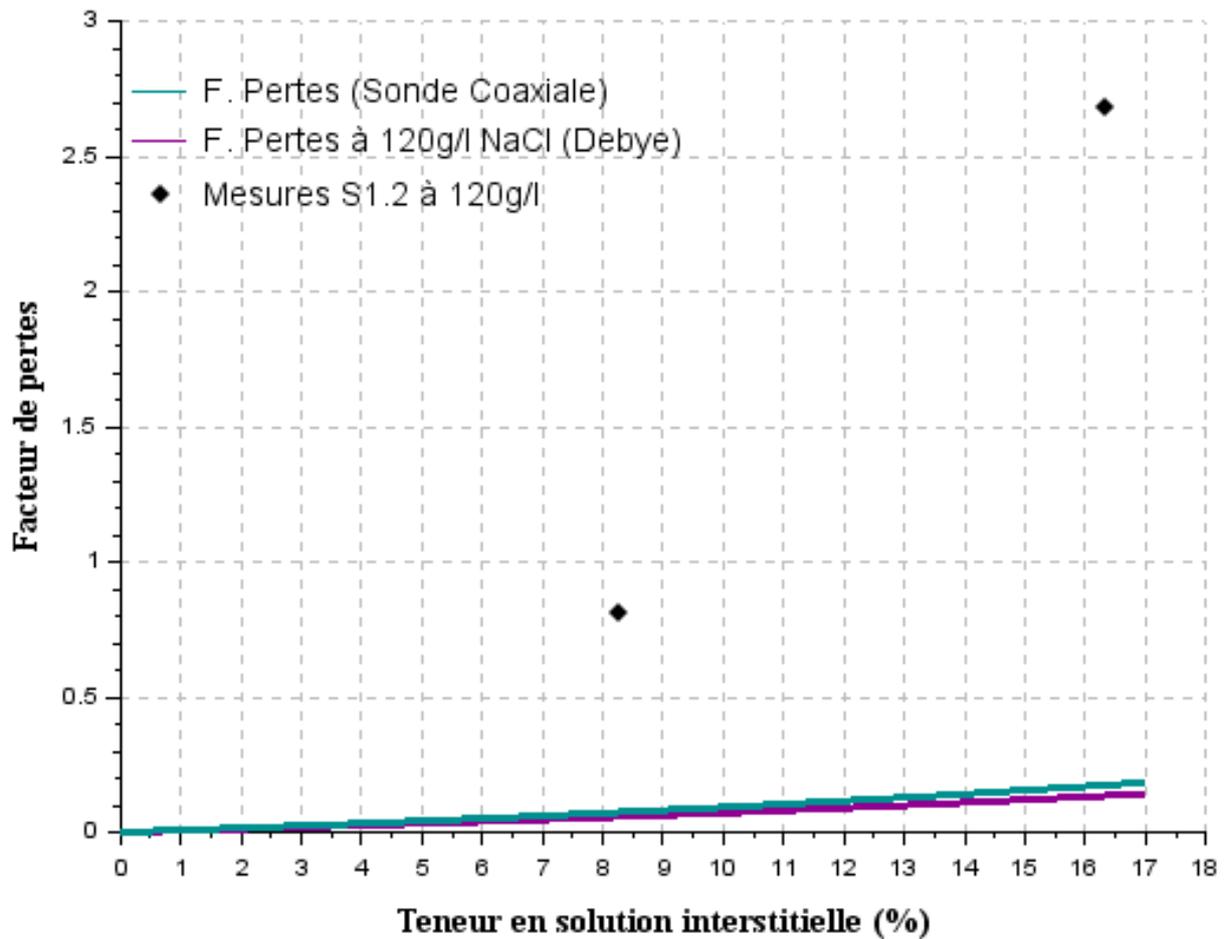


Figure V. 10-b : Variation du facteur de pertes en fonction de la teneur en eau – Modèle de Maxwell-Garnett.

Tableau V. 29 : EQM du facteur de pertes pour 120g/L de NaCl – Modèle de Maxwell-Garnett.

	ϵ''	Debye (120g/L NaCl)	Sonde Coaxiale (120g/L NaCl)
MG	EQM (S1.2)	1,86	1,86

En conclusion, les erreurs quadratiques moyennes montrent que le modèle géométrique de De Loor affiche une excellente fidélité des valeurs de constante diélectrique mesurées sur la série de béton S1.2. Cependant, bien que tous les modèles de permittivités semblent ne pas reproduire les valeurs de facteur de pertes mesurées sur la série S1.2, les erreurs quadratiques moyennes montrent que seul le modèle géométrique de De Loor fournit des valeurs calculées proches des valeurs mesurées.

V.6 Conclusion

	ϵ'	Debye (0g/L)	Debye (10g/L)	S.C. (0g/L)
M.V. (1/3)	EQM (S0)	0,69	0,69	0,76
CRIM	EQM (S0)	1,10	1,10	1,47
DeLoor	EQM (S0)	1,06	0,92	0,74
MG	EQM (S0)	1,49	1,49	1,36
	ϵ''	Debye (0g/L)	Debye (10g/L)	S.C. (0g/L)
M.V. (1/3)	EQM (S0)	0,08	0,72	1,37
CRIM	EQM (S0)	0,05	1,21	2,32
DeLoor	EQM (S0)	0,16	0,08	0,18
MG	EQM (S0)	0,18	0,08	0,07

	ϵ'	Debye (30g/L)	S.C. (30g/L)
M.V. (1/3)	EQM (S1)	0,73	0,83
	EQM (S2)	0,80	0,88
	EQM (S3)	0,83	0,75
CRIM	EQM (S1)	1,31	1,31
	EQM (S2)	1,30	1,30
	EQM (S3)	0,76	0,76
DeLoor	EQM (S1)	0,41	0,21
	EQM (S2)	0,32	0,24
	EQM (S3)	1,08	0,95
MG	EQM (S1)	1,22	1,14
	EQM (S2)	0,73	0,73
	EQM (S3)	1,33	1,25
	ϵ''	Debye (30g/L)	S.C. (30g/L)
M.V. (1/3)	EQM (S1)	1,72	2,76
CRIM	EQM (S1)	3,15	4,87
DeLoor	EQM (S1)	0,12	0,11
MG	EQM (S1)	0,42	0,42

	ϵ'	Debye (120g/L)	S.C. (120g/L)
M.V. (1/3)	EQM (S1.2)	1,87	1,07
CRIM	EQM (S1.2)	2,55	1,21
DeLoor	EQM (S1.2)	0,51	0,51
MG	EQM (S1.2)	1,61	1,61
	ϵ''	Debye (120g/L)	S.C. (120g/L)
M.V. (1/3)	EQM (S1.2)	5,47	4,73
CRIM	EQM (S1.2)	11,62	9,74
DeLoor	EQM (S1.2)	1,57	1,47
MG	EQM (S1.2)	1,86	1,86

Dans ce chapitre, différents modèles de permittivité ont été présentés. Ces modèles ont été testés pour simuler les séries S0, S1, S2, S3 et S1.2. L'efficacité des modèles a été validée en calculant l'erreur quadratique moyenne entre le résultat fourni par les modèles et les mesures de constante diélectrique calculées à partir de la vitesse des ondes radar et du facteur de pertes évalué à partir de la mesure de résistivité. Le tableau ci-dessus récapitule les erreurs quadratiques moyennes de la constante diélectrique, ϵ' , et du facteur de pertes, ϵ'' , obtenues sur les différentes simulations.

Les résultats des modèles de permittivité ont montré que le modèle géométrique de De Loor reproduit avec une assez bonne précision la plupart des mesures de constante diélectrique et du facteur de pertes des différentes séries de béton. On peut donc en conclure que la constante diélectrique calculée à partir d'une mesure de vitesse et le facteur de pertes calculé à partir d'une mesure de résistivité très basse fréquence sont bien simulés par le modèle de permittivité géométrique de De Loor.

De plus, nous avons vu que le calcul du facteur de pertes à partir d'une mesure de résistivité très basse fréquence, pour la simulation de béton sain, peut être assez bien reproduit par les modèles de permittivité géométrique de De Loor et d'homogénéisation de Maxwell-Garnett.

Par ailleurs, malgré une assez bonne prédiction des valeurs mesurées des constantes diélectriques sur les deux modèles volumiques, surtout pour le modèle volumique avec $\alpha=1/3$, les modèles volumiques ne reproduisent pas avec efficacité les mesures de facteur de pertes des bétons contaminés. On peut donc en conclure que la constante diélectrique calculée à partir d'une mesure de vitesse est bien simulée par les modèles de permittivité volumiques. Toutefois, les modèles volumiques semblent ne pas reproduire les valeurs de facteur de pertes des séries d'échantillons de béton contaminées à 30g/l de NaCl et à 120g/L de NaCl (voir tableau).

Enfin, le modèle d'homogénéisation de Maxwell-Garnett affiche une bonne prédiction des résultats mais dans la plupart des cas cela concerne uniquement les mesures de facteur de pertes.

V.7 Références

- [29] F. Tsui, S. L. Matthews. (1997). “Analytical modelling of the dielectric properties of concrete for subsurface radar applications”. *Construction and Building Materials*. Volume 11, Number 3, Pages 149 – 161;
- [30] H. Mercado, S. Lorente, X. Bourbon. (2012). “Chloride diffusion coefficient: A comparison between impedance spectroscopy and electrokinetic tests”. *Cement & Concrete Composites*. Volume 34, Pages 68 – 75;
- [31] G. Colette, P. K. J. Joesten, J. W. Jr. Lane. (2007). “Use of borehole-radar methods to monitor a steam-enhanced remediation pilot study at a quarry at the former Loring Air Force Base”. *Marine : U.S. Geological Survey Scientific investigations Report 2006 – 5191*. Page 35.

Chapitre VI

Conclusion générale

VI.1 Conclusion générale

Bien que les échanges entre les ouvrages en béton et leur environnement extérieur conduisent généralement à des détériorations irréversibles, les mécanismes qui permettent d'initier ces détériorations ne se déclenchent que lorsque le béton est suffisamment saturé en eau. Et dans la plupart des cas, ces détériorations sont fortement sollicitées par la présence des ions chlorure dans la solution interstitielle du béton. Cependant, il s'avère que l'augmentation de l'eau libre et des ions chlorure dans la porosité du béton atténue fortement la propagation des ondes EM. L'utilisation de la méthode GPR est donc judicieuse ici car elle permet une estimation de ces deux grandeurs clés, l'eau libre et les ions chlorure, par la mesure de la vitesse de propagation et de l'atténuation de l'onde EM.

Dans ce manuscrit, nous avons donc considéré dans un premier temps différents types de conditionnements et différents modes de contaminations sur plusieurs séries d'échantillons de béton S0, S1, S1.2, S2 et S3. Ces séries de béton, préparées avec la même formulation et réalisées avec un seul gâchage de béton, subissent alors une cure humide de 28 jours suivie d'un séchage de deux mois dans une étuve réglée à 80°C jusqu'à stabilisation de la masse. Cette étape est nécessaire pour la préparation des échantillons de béton à la contamination. À chaque série d'échantillons de béton est alors associé un mode de contamination donné :

- La série S0 non contaminée par les chlorures
- Une contamination homogène de la solution saline sur les séries S1 et S1.2 ;
- Une contamination par gradient de teneur en chlorure sur la série S2 ;
- Et une contamination par introduction de 30g/L de NaCl dans l'eau de gâchage pour la série S3.

Aussi, pour certains modes de contamination, contamination homogène par exemple, les échantillons subissent une homogénéisation dans l'étuve à 80°C dont la durée est égale à celle du premier séchage. Cette condition permet d'obtenir une répartition homogène de la solution saline à l'intérieur de la porosité du béton. Des mesures radar sont aussitôt effectuées lorsque les séries d'échantillons de béton atteignent les degrés de saturation suivants :

- 0%, 50% et 100% pour les séries (S0), S1, S1.2 et S3.
- 0%, 25%, 50%, 75% et 100% pour la série S2.

D'autre part, nous avons vu que l'étude de la vitesse de propagation et de l'atténuation du signal EM a nécessité d'introduire deux méthodes, de mesure de vitesse, la méthode fixed-offset et la méthode en transmission. Aussi, dans ce processus nous avons vu qu'en prenant comme valeurs de référence les mesures en transmission, il a été possible de proposer une méthodologie de traitement de mesure à partir des signaux réfléchis sur le fond de la dalle obtenus par la méthode fixed-offset. Cette nouvelle méthodologie fait donc intervenir un nouveau mode de détermination de l'écart de temps, Δt , estimé entre le deuxième pic de l'onde directe et le premier pic de l'onde réfléchie.

Par ailleurs, l'étude de la propagation des ondes EM des différentes séries d'échantillons de béton a montré que l'onde EM est à la fois sensible à la présence d'eau dans la porosité du béton et aux ions chlorures présents dans la solution interstitielle. Les analyses ont montré que la vitesse de propagation d'une onde EM est uniquement influencée par la teneur en eau, et cela quel que soit le mode de contamination du béton. Cependant, les résultats ont aussi montré que l'atténuation du signal EM est à la fois fortement influencée par la teneur en eau et par la teneur en chlorure libres. Toutefois, nous avons vu que l'atténuation de l'onde réfléchie est plus influencée que celle de l'onde directe. De plus, à partir des mesures de la série S2, nous avons vu que l'amplitude normalisée de l'onde directe semble être sensible à la présence d'un gradient de distribution de la solution interstitielle à l'intérieur de l'échantillon de béton.

En parallèle, nous avons vu que l'étude d'un modèle à deux variables permet de montrer que la vitesse de propagation et l'amplitude normalisée de l'onde directe sont assez bien corrélées aux variables de la teneur en eau et de la teneur chlorures libres. Cette étude a donc permis d'obtenir une équation de régression bilinéaire sur la vitesse propagation et sur l'amplitude normalisée de l'onde directe en fonction à la fois de la teneur en eau et de la teneur en chlorure.

Ensuite, nous avons proposé dans un deuxième temps l'utilisation des modèles de permittivité pour reproduire les mesures des différentes séries d'échantillon de béton S0, S1, S2, S3 et S1.2. Les modèles de permittivité concernés sont :

- Un modèle volumique dans deux configurations différentes ;
- Le modèle géométrique de De Loor ;
- Et le modèle d'homogénéisation de Maxwell-Garnett.

Les données d'entrée pour la permittivité de la solution interstitielle ont été soit extraites du modèle de Deby soit mesurées par la sonde coaxiale. Les valeurs de la constante diélectrique et du facteur de pertes qui ont permis de valider l'efficacité des modèles ont été

respectivement calculées à partir des mesures de vitesse des ondes radar et des mesures de la résistivité. La validation du modèle étant réalisée en calculant l'erreur quadratique moyenne entre le résultat des modèles et les mesures sur dalles.

Les résultats ont montré que le modèle géométrique de De Loor est bien corrélé avec les mesures.

Aussi, nous avons vu que le calcul du facteur de pertes à partir d'une mesure de résistivité très basse fréquence, pour la simulation de béton sain, est assez bien reproduit par la plupart des modèles de permittivité diélectrique, et cela de façon satisfaisante sur le modèle géométrique de De Loor et le modèle d'homogénéisation de Maxwell-Garnett.

Par ailleurs, concernant les valeurs mesurées de la constante diélectrique, nous avons vu que malgré une corrélation satisfaisante, du modèle volumique avec $\alpha=1/3$, avec les valeurs mesurées de la constante diélectrique, les deux modèles volumiques semblent incapables de reproduire les mesures de facteur de pertes des bétons contaminés.

Enfin, le modèle d'homogénéisation de Maxwell-Garnett affiche une bonne prédiction des résultats mais dans la plupart des cas cela concerne uniquement les mesures de facteur de pertes.

VI.2 Perspectives

Parmi les paramètres influencés par la présence des ions chlorure dans la solution interstitielle du béton, l'onde réfléchie semble être la plus sensible à la présence des ions chlorure. Une étude approfondie sur l'atténuation de l'onde réfléchie permettra donc de fournir une bonne estimation de la teneur en chlorure dans la solution interstitielle du béton. En particulier il pourrait être intéressant d'exploiter les ondes réfléchies sur les armatures.

L'amplitude de l'onde directe semble sensible à l'existence d'un gradient de distribution de la solution interstitielle, il serait intéressant d'exploiter cette sensibilité.

Par ailleurs, nous avons vu que le facteur de pertes est un paramètre difficilement mesurable, la mise en place d'une méthodologie pour l'estimation du facteur de pertes du béton à partir de la mesure d'atténuation est donc à envisager. Si cette évaluation était possible, elle permettrait d'envisager une calibration de la technique, comme pour la vitesse, à partir d'une mesure de résistivité en transmission sur des carottes prélevées sur l'ouvrage. Cette mesure de résistivité permettrait alors d'évaluer le facteur de pertes comme cela a été montré dans le

chapitre V. Le radar pourrait alors être utilisé sur site pour caractériser la contamination des bétons par les chlorures après cette calibration sur carottes.

A partir des mesures réalisées des lois ont été proposées entre l'atténuation de l'onde directe et, à la fois la teneur en solution interstitielle et la teneur en chlorures. Il serait intéressant de tester la validité de cette loi sur les corps d'épreuve soumis à des expositions aux chlorures et à l'humidité non contrôlées. La mesure de vitesse pourrait permettre d'évaluer la teneur en eau et ensuite la mesure d'atténuation permettrait d'estimer la teneur en chlorures. Les échantillons S4 avaient été prévus dans cet objectif malheureusement par manque de temps ils n'ont pas pu être exploités.

Annexes

METHOES DE DETERMINATION DE LA TENEUR EN CHLORURE TOTAUX ET DE LA TENEUR EN CHLORURES LIBRES

I Dosage en chlorure :

1. Mode opératoire

1.1. Mise en solution des chlorures « totaux »

Les étapes décrites ci-dessous doivent être réalisées dans un local dont la température est de $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$:

- Prélever par quartage 5g de produit en poudre ($<0,315\text{mm}$) soit, M_{pe} la masse déterminée à 1mg près. Introduire ce prélèvement dans un bécher de 250mL ;
- Mettre la poudre en suspension en plaçant le bécher sur une plaque d'agitation magnétique pendant 2 minutes ;
- Ajouter ensuite 100mL d'acide nitrique dilué obtenu en versant 20mL d'acide HNO_3 concentré dans 80mL d'eau déminéralisée ;
- Maintenir l'agitation pendant 30minutes ± 1 minute. Si la plaque d'agitation magnétique est chauffante, il est possible, sans incidence sur le résultat final, d'effectuer cette opération à une température d'environ 80°C ;
- Filtrer la solution, rincer soigneusement avec de l'eau déminéralisée et compléter le filtrat jusqu'à 250mL (V_{fiolle}) dans une fiole jaugée de classe A.

1.2. Mise en solution des chlorures « libres »

Les étapes décrites ci-dessous doivent être réalisées dans un local dont la température est de $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$:

- Prélever par quartage 5g de produit en poudre ($<0,315\text{mm}$) soit, M_{pe} la masse déterminée à 1mg près. Introduire ce prélèvement dans un bécher de 250mL ;
- Ajouter 200mL d'eau déminéralisée et placer le bécher sur une plaque d'agitation magnétique pendant 3minutes ;
- Filtrer la solution. Ne rincer qu'une fois le bécher en utilisant 10mL d'eau déminéralisée. Ce volume a été sciemment limité pour éviter toute extraction supplémentaire de chlorures par dissolution des chloroaluminates ;
- Ajouter 2mL d'acide nitrique concentré pour acidifier le milieu afin de stabiliser les chlorures en solution ;
- Compléter le filtrat jusqu'à 250mL dans une fiole jaugée de classe A.

1.3. Dosage des chlorures extraits

Les étapes décrites ci-dessous doivent être réalisées dans un local dont la température est de $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$:

- Etalonnage

Déterminer le titre exact de la solution de nitrate d'argent (C_{Ag}) par dosage de 5mL (V_{HCl}) d'acide chlorhydrique 0,01 N (C_{HCl}) dans 50mL d'eau déminéralisée. Soit V_t le volume de nitrate d'argent ajouté, exprimé en millilitres.

- Dosage
 - Prélever à la pipette de classe A 50mL du filtrat, soit $V_{\text{prélevé}}$.
 - Verser ce volume dans un bécher.
 - Titrer les chlorures par la solution de nitrate d'argent. Soit V_e (mL) le volume de nitrate d'argent ajouté.

II. Conversion d'unité :

A la fin du dosage en chlorures, les valeurs de teneur en chlorure sont données en pourcentage massique de gramme de chlorure par gramme de béton (%g.Cl/g.béton). Elles ont été ramenées en pourcentage massique de gramme de chlorure par gramme de ciment (%g.Cl/g.ciment) en utilisant la relation (1).

$$(\%g.Cl/g.ciment) = (\%g.Cl/g.béton) * \frac{\rho_b}{m_c} \quad (1)$$

Avec ρ_b la masse volumique du béton, en kg/m^3 et m_c la masse du ciment utilisée pour la fabrication de 1m^3 de ce béton, en kg.

Le **tableau 1** ci-dessous donne un exemple des valeurs obtenues après le passage de la teneur en chlorure par gramme de béton à la teneur en chlorure par gramme de ciment en utilisant la relation (1).

Tableau 1 : Teneur en chlorure par gramme de béton et teneur en chlorure par gramme de ciment.

	S1		S2		S3	S1.2	
	Sr=50%	Sr=100%	Sr=50%	Sr=100%	Sr=100%	Sr=50%	Sr=100%
%Cl.T/béton	0,06	0,11	0,08	0,13	0,15	0,16	0,37
%Cl.T/Cim.	0,37	0,64	0,50	0,80	0,90	1,00	2,27
%Cl.L/béton	0,04	0,08	0,05	0,09	0,09	0,13	0,32
%Cl.L/Cim.	0,26	0,50	0,30	0,55	0,53	0,77	1,93

De plus, les valeurs représentées sur le **tableau 1** sont des valeurs moyennées sur plusieurs échantillons de béton de la même série pour un degré de saturation donné (Sr=50% et Sr=100%). Ainsi, pour un degré de saturation Sr=100%, l'écart relatif de la teneur en chlorures libres par rapport à la teneur en chlorures totaux est de 0,22 sur la série S1, de 0,31 sur la série S2, de 0,41 sur la série S3 et de 0,15 sur la série S1.2. Par conséquent, pour les

mêmes proportions, la teneur en chlorures libres sur la série S3 est plus faible que celles des autres séries.

DETERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET DE LA POROSITE ACCESSIBLE A L'EAU

I. Objectif

Détermination de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau de béton durci.

II. Domaine d'application

La méthode décrite par le présent mode opératoire s'applique aux corps d'épreuve de béton durci de granulats courants naturels ou artificiels. Elle ne s'applique pas aux bétons de granulats légers.

L'essai s'applique à des corps d'épreuves moulés, sciés, carottés ou à des blocs de béton.

III. Principe de l'essai

Détermination de la masse d'un corps d'épreuve et de son volume par pesée hydrostatique.

IV. Lexique

Masse volumique apparente sèche ρ_a : rapport de la masse sèche d'un corps d'épreuve de béton à son volume apparent, exprimé en grammes par centimètre cube ou kilogrammes par mètre cube.

Volume apparent : somme des volumes de matière solide, des pores ouverts et des pores fermés dans un corps poreux.

Pores ouverts : pores qui sont pénétrés par l'eau dans l'essai décrit.

Pores fermés : pores qui ne sont pas pénétrés par le liquide d'immersion dans l'essai décrit.

Porosité accessible à l'eau ε : rapport du volume total des pores ouverts dans un corps poreux à son volume apparent. Elle s'exprime en pourcentage du volume apparent.

Porosité fermée : rapport du volume total des pores fermés dans un corps poreux à son volume apparent. Elle s'exprime en pourcentage du volume apparent.

Porosité totale : rapport du volume des pores ouverts et des pores fermés au volume apparent du produit, exprimé en pourcentage. C'est la somme de la porosité ouverte et de la porosité fermée.

V. Equipements nécessaires

- **Etuve** pouvant être contrôlée à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

- **Balance** hydrostatique d'une précision de $\pm 0,01$ g. (Sartorius LP6200S)

Vérifier et régler si nécessaire le niveau de la balance avant le début des pesées. La mise à niveau de la balance permet le rattrapage des éventuelles inégalités de la surface de travail où repose la balance. Ce positionnement horizontal précis permet d'obtenir des résultats de pesée reproductibles à tout moment. Visser ou dévisser les pieds de réglage avant et arrière jusqu'à ce que la bulle de mise à niveau soit centrée. La balance doit être allumée une demi-heure avant la pesée.

- **Liquide d'imbibition** : eau du robinet

- **Dessiccateur**

Le dessiccateur utilisé pour la saturation sous vide doit être propre et sec en début d'essai. Ses rodages (couvercle et dispositif de remplissage) doivent être graissés sans excès avec une graisse à vide disponible dans le meuble sous paillasse. A la fin de l'essai, le dessiccateur doit être soigneusement nettoyé et séché.

- **Appareillage à vide**

Le groupe de pompage est constitué d'une pompe à vide primaire, d'un piège à eau et d'une rampe permettant la connexion simultanée de quatre dessiccateurs. Pompe Beaudoin : elle permet d'atteindre un vide de 10^{-2} mbar en 8 min dans une enceinte de 23 litres. Il convient de procéder à une vidange d'huile une fois par an.

Mode d'emploi :

Vérifier que le piège à eau est vide et sec. Il est en verre et extrêmement fragile. Au besoin, graisser les rodages.

Remplir le vase de Dewar d'azote liquide. Le pichet à azote liquide ne doit jamais contenir d'eau.

- Placer le piège à eau dans le vase de Dewar.
- Connecter tous les tuyaux.
- Vérifier que tous les robinets sont bien fermés.
- Mettre la pompe en marche : déverrouiller le bouton rouge d'arrêt puis enclencher le bouton de démarrage noir.
- Ouvrir successivement les robinets depuis la pompe vers le dessiccateur dans lequel on souhaite créer la dépression.
- Au moment de l'arrêt, fermer successivement les robinets du dessiccateur vers la pompe.

- Arrêter la pompe (presser sur le bouton rouge).
- Faire une entrée d'air sur la pompe : ouvrir puis refermer un robinet non connecté de la rampe en verre.

Démonter le piège à eau afin de le vider et de le sécher.

- **Récipient** de volume suffisant pour permettre l'immersion totale du corps d'épreuve. Ce récipient est placé sous la balance lors de la pesée hydrostatique.

VI. Recommandations préalables

Dimensions des corps d'épreuve recommandées : au minimum trois fois le diamètre du plus gros granulats. Il est souhaitable de procéder à la mesure sur trois échantillons pour caractériser un béton. La durée de l'essai est de 24 heures. Afin de réaliser l'ensemble des opérations dans de bonnes conditions, il est conseillé de commencer l'essai le matin entre 10 et 11 heures. Un cahier de planning placé à côté du dispositif de pompage permet de réserver les dessiccateurs.

VII. Conduite d'essai

- Imbibition du corps d'épreuve

Placer le corps d'épreuve dans un dessiccateur et maintenir le vide pendant quatre heures. En pratique, pendant ces quatre heures, pomper trois fois une demi-heure. Après la dernière opération de pompage, une fois les quatre heures écoulées, introduire progressivement l'eau d'immersion de façon qu'après 15 minutes, le corps d'épreuve soit recouvert d'environ 20 mm d'eau. Pendant le remplissage, être très attentif à ce qu'aucune entrée d'air ne se produise. Régler le débit d'eau en modifiant l'ouverture du robinet placé sous le réservoir d'eau. Pendant 20 heures, maintenir une pression réduite dans le dessiccateur. Le piège à eau a une contenance limitée. Il convient donc de procéder à une série de pompages d'une durée de 20 minutes. Pratiquement, on procède à trois pompages en deux heures.

- Détermination de la masse du corps d'épreuve immergé

Placer la balance sur la tablette de pesées hydrostatiques. Accrocher une tige et un panier de pesée hydrostatique. Tige et panier doivent être choisis de façon à ce que le corps d'épreuve soit totalement immergé et ne soit pas en contact avec le fond du récipient. Tarer la balance. Peser le corps d'épreuve à 0,01 g près. On obtient ainsi la masse M_{eau} du corps d'épreuve immergé.

Après l'essai, retirer immédiatement la tige et le panier de pesée de l'eau : ils rouillent.

- Détermination de la masse du corps d'épreuve imbibé pesé dans l'air

Extraire le corps d'épreuve de l'eau, retirer le dispositif de pesée hydrostatique, tarer la balance. Essuyer rapidement et soigneusement le corps d'épreuve à l'aide d'un linge humide de façon à le débarrasser des gouttelettes et du film superficiel d'eau sans toutefois retirer l'eau des pores. Peser immédiatement le corps d'épreuve dans l'air à 0,01 g près. On obtient ainsi la masse M_{air} du corps d'épreuve imbibé. Essuyer la balance et la replacer sur la table de pesées.

- Détermination de la masse du corps d'épreuve sec

Sécher le corps d'épreuve à $105 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante, c'est à dire jusqu'à ce que deux pesées successives, avant et après un séjour de 24 h à l'étuve, ne diffèrent pas de plus de 0,05%. Avant chaque pesée, placer l'éprouvette dans un dessiccateur jusqu'à ce qu'elle atteigne la température ambiante : une à quatre heures selon la taille de l'éprouvette. Les pesées doivent être effectuées à 0,05 g près. La masse ainsi déterminée est la masse de l'éprouvette sèche M_{sec} .

VIII. Expressions des résultats

- La masse volumique apparente, ρ_d , exprimée en grammes par centimètre cube, est donnée par l'équation :

$$\rho_d = M_{sec} / (M_{air} - M_{eau}) * \rho_{eau\theta} \quad (2)$$

- La porosité accessible à l'eau, ε , exprimée en pourcentage, est donnée par l'équation :

$$\varepsilon = (M_{air} - M_{sec}) / (M_{air} - M_{eau}) * 100 \quad (3)$$

La porosité doit être donnée à 0,1% près.

