HAL
open science

Localisation automatique des aciers et caractérisation de la teneur en eau du béton armé par radar double-offset à grand rendement

Kahina Agred

To cite this version:

Kahina Agred. Localisation automatique des aciers et caractérisation de la teneur en eau du béton armé par radar double-offset à grand rendement. Architecture, aménagement de l'espace. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2017. Français. NNT : 2017TOU30194 . tel-01989150

HAL Id: tel-01989150

https://theses.hal.science/tel-01989150

Submitted on 22 Jan 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 :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présentée et soutenue par :
Kahina AGRED
le mardi 10 octobre 2017

Titre :

Localisation automatique des aciers et caractérisation de la teneur en eau du béton armé par radar double-offset à grand rendement

---

École doctorale et discipline ou spécialité :
ED MEGEP : Génie civil

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

Directeur/trice(s) de Thèse :

M. Jean-Paul BALAYSSAC
M. Gilles KLYSZ

Jury :

M. Jean-Paul BALAYSSAC, Prof. Université de Toulouse 3 Paul Sabatier	Directeur de thèse
M. Gilles KLYSZ, MCF. Université de Toulouse 3 Paul Sabatier	Codirecteur de thèse
M. Bogdan PIWAKOWSKI, Prof. École Centrale de Lille	Rapporteur
M. Zoubir Mehdi SBARTAÏ, MCF. Université de Bordeaux	Rapporteur
Mme Myriam CARCASSES, Prof. IUT "A" Paul Sabatier	Examinatrice
M. Frédéric TAILLADE, Chercheur Expert EDF - R&D, PRISME	Examinateur
M. Alexis DUTHOIT, Directeur Innovation ETANDEX	Invité
M. Erik VIMOND, Directeur Méthode ETANDEX	Invité

RÉSUMÉ

Les budgets destinés à l'entretien et à la réparation du patrimoine bâti étant très élevés, il est primordial de mettre en place des techniques fiables de suivi et de diagnostic des ouvrages pour réduire ces dépenses.

Il existe de nombreuses techniques de contrôle non destructif (CND) employant différentes technologies à des coûts plus ou moins abordables. Elles permettent la détermination des propriétés du matériau renseignant sur l'état de l'ouvrage, et la détection d'inclusions ou de défauts dans le béton. Ces techniques sont connues pour leur rapidité de mise en œuvre et leur grand rendement sur site, mais aussi par leur caractère non intrusif qui permet de limiter le nombre de prélèvements. Cela les rend pertinentes pour la surveillance et l'inspection du patrimoine bâti, puisqu'elles peuvent fournir des informations liées à l'état d'un ouvrage sans l'endommager.

Dans un ouvrage en béton armé, la couche d'enrobage des armatures est la plus sujette à de multiples agressions. C'est dans cette couche qu'ont lieu la majorité des réactions chimiques qui causent la dégradation de l'ouvrage, puisqu'avec la présence d'eau cet enrobage est considéré comme la zone de pénétration, de transfert et de fixation des agents agressifs présents dans l'environnement de l'ouvrage, favorisant par exemple la corrosion des armatures. La teneur en eau du béton est considérée comme un facteur très important dans le diagnostic des structures en béton armé, puisqu'elle conditionne le développement de la plupart des pathologies liées à la dégradation des structures affectant ainsi la durabilité du béton. La localisation avec précision des aciers de renforcement est également un élément primordial pour le diagnostic, mais également pour vérifier la conformité des dispositions constructives par rapport aux plans d'exécution.

Dans ces travaux de recherche, nous utilisons la technologie radar pour la caractérisation géométrique et physique des éléments en béton armé, cela par le développement d'un algorithme automatique, rapide et sans prérequis. Les objectifs de cette étude sont : de localiser en surface et en profondeur les aciers du premier lit d'armatures, et de déterminer la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le béton d'enrobage pour estimer sa teneur en eau.

Mots clés : CND, radar, béton, localisation des armatures, vitesse de propagation des ondes électromagnétiques, teneur en eau.

ABSTRACT

Since budgets for the maintenance and repair of built heritage structures are very high, it is essential to implement reliable techniques for monitoring and diagnosis of structures to reduce these costs.

There are many non-destructive testing (NDT) methods employing different technologies which are more or less expensive. The NDT methods allow the determination of the properties of the material giving also information about the condition of the structure, and the detection of inclusions or defects in the concrete. These techniques are known for their fast implementation and their high performance in-situ, but also by their non-intrusive nature, which makes it possible to limit the number of samples for destructive assessment. This makes them relevant for the monitoring and inspection of built heritage, since they can provide information related to the condition of a structure without any damage.

In a reinforced concrete structure, the concrete cover is the most prone to multiple aggressions. The majority of the chemical reactions which cause the degradation of the structure occur in this layer, since with the presence of water this coating is considered as the penetration, transfer and fixing zone of aggressive agents present in the environment of the structure, thus enhancing for example the corrosion of the reinforcements. The water content of concrete is considered as a very important factor in the diagnosis of reinforced concrete structures, since it conditions the development of most pathologies related to structural degradation, thus affecting the durability of concrete. The precise location of the reinforcement in the construction is also an essential element for the diagnosis, but also to check the conformity of the constructive dispositions with the execution plans.

In this research, we use GPR technology for the geometrical and physical characterization of reinforced concrete elements, through the development of an automatic algorithm, fast and without pre-requisites. The objectives of this study are to locate the rebars of the first reinforcing layer in the plane and depth and to determine the propagation velocity of the electromagnetic waves in the coating layer to estimate the water content of concrete.

Keywords: NDT, GPR, concrete, reinforcement localization, electromagnetic wave propagation velocity, water content.

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été effectué au sein du Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC), Université Paul Sabatier-INSA, Toulouse. Il s'inscrit dans le cadre du projet éco-industries ATALANTE piloté par l'entreprise ETANDEX. Ce projet est financé par la BPI France (Banque publique d'investissement France), l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), la DGCIS (Direction générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services) et le CGDD (Commissariat général du Développement durable), pour soutenir le développement de projets collaboratifs de recherche et développement à fort potentiel économique, visant à apporter des réponses à des enjeux environnementaux ciblés.

Dans un premier temps, je souhaite remercier mon directeur de thèse, M. Jean-Paul Balayssac et mon codirecteur, M. Gilles Klysz, pour ces trois années passées sous leur direction, durant lesquelles ils ont su me conseiller et m'orienter dans mes recherches. Merci à vous deux pour votre disponibilité, votre bonne humeur et pour m'avoir rassurée dans les moments de doute. Je souligne que j'ai pris beaucoup de plaisir à travailler avec vous, veuillez trouver ici toute ma reconnaissance.

Je tiens à remercier M. Bogdan Piwakowski et M. Zoubir Mehdi Sbartaï d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse ainsi que pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Je remercie également, Mme Myriam Carcasses, M. Frédéric Taillade d'avoir accepté d'examiner mon travail et de m'avoir fait part de leurs remarques constructives.

Merci aux autres membres du jury d'avoir accepté de juger ce travail : M. Alexis Duthoit, M. Erik Vimond.

Je tiens à remercier tous les chercheurs du LMDC, en particulier Sylvain Garcia, Souad Bouregaya, Dalel Medjelekh, Quan Nguyen, Syed Asad Ali Gillani, Mohamed Mosa … mais aussi le personnel du LMDC Fatima Assabi, Fabienne Lacoste, Ghislaine Dupouey, Sylvain Dos Santos, Yann Bouaskeur, René Boujou, Frédéric Leclerc …

Que tous ceux ou celles qui ont, de près ou de loin, participé à la réussite de cette thèse soient aussi remerciés.

J'adresse mes remerciements à mes très chers parents, Slimane et Ouiza, pour leur soutien et pour tous les moyens qu'ils ont mis en œuvre pour que je puisse aller toujours plus loin dans mes études. Je leur dédie ce manuscrit en gage de ma reconnaissance et ma gratitude. À ma sœur Mélissa et mes frères Karim, Amine et Ghiles je dis merci.

À mon mari Yacine GAOUA et ma belle famille, merci…

Kahina AGRED-GAOUA

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières 7

Liste des figures 11

Liste des tableaux 16

Introduction générale 18

i. Problématique du contrôle non destructif en génie civil 18

ii. Cadre d'étude 19

iii. Objectifs et plan de la thèse 20

CHAPITRE 1 : PRINCIPES ET APPLICATIONS DES TECHNIQUES DE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF (CND) EN GENIE CIVIL 24

1.1 Introduction 24

1.2 Nécessité et intérÊt de l'auscultation par les techniques de contrÔle non destructif (CND) en génie civil 25

1.3 Présentation des techniques de CND utilisées en génie civil 26

1.3.1 L'inspection visuelle 26

1.3.2 Les méthodes électromagnétiques 29

1.3.3 Les méthodes basées sur la propagation d'ondes mécaniques 32

1.3.4 Les méthodes thermiques 35

1.3.5 Les méthodes radiographiques 37

1.3.6 Les méthodes électriques 37

1.4 Avantages et inconvénients des techniques CND utilisées pour la localisation des armatures 40

1.4.1 Le pachomètre 40
1.4.2 La thermographie infrarouge 41
1.4.3 La radiographie 42
1.4.4 Le radar 43
1.5 Conclusion 46
1.6 Références 47
CHAPITRE 2 : TECHNIQUE RADAR ET NOTIONS DE PROPAGATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES 54
2.1 Historique sur la technologie radar 54
2.2 PropriÉTÉs ÉLECTROMAGNÉtiques du bÉton 56
2.2.1 Permittivité effective 56
2.2.2 Perméabilité magnétique 58
2.2.3 Phénomène de polarisation 59
2.2.4 Relaxation diélectrique 61
2.3 AttÉnuation des ondes ÉLECTROMAGNÉtiques 61
2.4 Vitesse de propagation des ondes ÉLECTROMAGNÉtiques 63
2.5 RÉflexion et transmission des ondes ÉLECTROMAGNÉtiques (Annan 2009) 64
2.6 Rayonnement d'ondes ÉLECTROMAGNÉtiques par une antenne radar couplÉe au matÉriau 66
2.6.1 Rayonnement et orientation d'antennes radar 66
2.6.2 Couplage antenne – milieu diélectrique 68
2.7 Application de la technologie radar 70
2.7.1 Principe de l'auscultation radar en génie civil 70
2.7.2 Exemple de profils radar : radargrammes 72
2.7.3 Application de la technique radar pour la détection des armatures dans le béton armé 75
2.8 Conclusion 83

2.9 Références 84

CHAPITRE 3 : ALGORITHME DE TRAITEMENT DES SIGNAUX RADAR PERMETTANT DE LOCALISER LES ACIERS DU PREMEIR LIT D'UNE STRUCTURE EN BETON ARME. MISE AU POINT ET VALIDATION EXPÉRIMENTALE 88

3.1 Introduction 88

3.2 Fondement de l'algorithme 89

3.3 Localisation des armatures dans le plan 91

3.3.1 Recherche des sommets d'hyperboles correspondant aux aciers (simples et multiples) 91

3.4 Localisation des armatures en profondeur et DÉtermination de la vitesse de propagation des ondes EM dans le bÉton d'enrobage 94

3.4.1 Évaluation du temps zéro – instant d'émission des ondes électromagnétiques . 94

3.4.2 Recherche de la profondeur des aciers et détermination de la vitesse réelle 97

3.5 Identification automatique de la transition bÉton / air sur le b-scan 102

3.6 Validation éxpÉrimentale de l'algorithme 104

3.6.1 Description de la dalle test 104

3.6.2 Dispositif expérimental 106

3.6.3 Procédure de mesures 107

3.6.4 Étude paramétrique sur l'influence de la taille de la fenêtre temporelle et du nombre de positions E/R sur les écarts de profondeur des aciers 109

3.6.5 Résultats obtenus pour la dalle test 111

3.7 Conclusion 118

CHAPITRE 4 : METHODOLOGIE DE DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU A PARTIR DE LA MESURE DE VITESSE ET MISE EN APPLICATION DE L'ALGORITHME 122

4.1 Introduction 122

4.2 Détermination de la teneur en eau a partir de la mesure de vitesse de propagation des ondes électromagnétiques 123

4.2.1 Plan expérimental 123

4.2.2 Dispositifs et méthodologie de calibration de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques pour l'estimation de la teneur en eau du béton 126

4.2.3 Résultats de la calibration 132

4.3 Mise en application de l'algorithme sur une maquette d'échelle 1/1 135

4.3.1 Présentation de la dalle maquette 135

4.3.2 Paramètres d'acquisitions et disposition des profils de mesures sur la maquette 136

4.3.3 Cartographie des aciers 137

4.3.4 Cartographie des vitesses 145

4.3.5 Cartographie des teneurs en eau 146

4.4 Conclusion 149

4.5 Références 150

Conclusion générale et perspectives 152

i. Conclusions 152

ii. Perspectives 154

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Configurations usuelles des antennes radar, à gauche (a) mode bistatique : à droite (b) le mode monostatique 30
Figure 1.2: antennes radar usuelles dans le cas de la configuration en mode bistatique, respectivement de la gauche à la droite : (a) antennes couplées à l'air, (b) antennes couplées au matériau, (c) antennes de forage 30
Figure 1.3: Cas de dispositions des capteurs dans la mesure aux ultrasons, respectivement transmission directe (a), la disposition semi-directe en diagonale (b) et la technique indirecte (c) (Naik T. R. et al. 2004) 32
Figure 1.4: (a) Principe de fonctionnement des capteurs sans contact, (b) dispositif de mesure par ondes de surface automatisé et sans contact (Liu et al. 2014) 35
Figure 1.5: Exemple d'une auscultation d'un élément en béton par la thermographie passive (Cannard et al. 2011) 36
Figure 1.6: Principe de mesure de la résistivité électrique en géophysique, par dispositif quadripolaire (Lataste 2002) 38
Figure 1.7: Principe de mesure de la résistivité électrique, configuration Wenner 39
Figure 1.8: Principe de mesure de potentiel de corrosion avec utilisation d'une électrode de référence (RILEM TC 154-EMC (2003)) 40
Figure 1.9: Exemple d'un profil de mesure (B-scan) sur une dalle en béton armé 45
Figure 2.1: Types de polarisation diélectrique (Sbartaï 2005) 60
Figure 2.2: Représentation graphique du terme d'atténuation par absorption d'une onde électromagnétique (Annan 2009) 62
Figure 2.3: Représentation d'une onde EM transverse électrique incidente, réfléchie et transmise au niveau de l'interface de deux milieux diélectriques (Annan 2009) 66
Figure 2.4: Antenne dipolaire ouverte utilisée pour les mesures : Position des dipôles dans la boite de blindage 67

Figure 2.5: Représentation 3D et sections verticales (TE) et (TM) du diagramme de rayonnement d'un dipôle court en espace libre, respectivement en (a) et (b), Exemple du mode (TE) et (TM) du diagramme de rayonnement d'un dipôle dans un matériau (sol) typique (c) (Annan 2003) 67
Figure 2.6:Configuration TE et TM d'une antenne bistatique 68
Figure 2.7: Les différentes zones de rayonnement d'une antenne 69
Figure 2.8: Diagramme de rayonnement dans le plan H d'un dipôle court placé sur un milieu diélectrique de constante diélectrique égale à 4 et 12 (correspondants respectivement à un béton saturé et saturé) (Millard et al. 2002) 70
Figure 2.9: Exemple d'une coupe-temps obtenue pour un profil effectué sur une dalle en béton contenant quatre armatures 72
Figure 2.10: Exemple de A-scan 73
Figure 2.11: Exemple d'une juxtaposition des A-scan (a) formant un radargramme en niveau de gris (B-scan) (b) 74
Figure 2.12 : Multiples B-scan parallèles formant un C-scan 74
Figure 2.13:Image tomographique après traitement (Soldovieri et al. 2006) 76
Figure 2.14: Orientation de l'antenne 0 (champ E horizontal) et de l'antenne 1 (champ E vertical) (Hugenschmidt et al. 2010) 77
Figure 2.15:Données radar brutes (a), résultat de l'approche en 2D (b) (Hugenschmidt et al. 2010) 78
Figure 2.16:Résultat après la construction d'un cube de données 3D (0 – 4 ns) avec l'approche en 2D (Hugenschmidt et al. 2010) 78
Figure 2.17: Données radar brutes respectivement lorsque le champ E est horizontal (a) et vertical (b), résultat de l'approche en 3D (c) (Hugenschmidt et al. 2010) 79
Figure 2.18: Résultat après traitement 3D et fusion de données, (0.5 - 3.5 ns) (Hugenschmidt et al. 2010) 80
Figure 2.19 : Résultat de l'approche « Inverse Scattering »et fusion de données, champ E horizontal et vertical (Hugenschmidt et al. 2010) 81
Figure 2.20: Résultat après traitement diffusion inverse et fusion de données, (0.0 - 0.5 m) (Hugenschmidt et al. 2010) 81
Figure 3.1 : Exemple de coupe-temps caractéristique d'un élément en béton armé 89
Figure 3.2 : Signal moyen résultant des acquisitions dans le béton en haut 92

Figure 3.3: Représentation de la partie matériau après soustraction de l'onde directe..... 92
Figure 3.4: Temps d'arrivée des amplitudes maximales 93
Figure 3.5 :Repérage des sommets des hyperboles correspondant aux positions des aciers en surface 93
Figure 3.6: Représentation schématique du dispositif de mesure de laboratoire 94
Figure 3.7: Procédure de mesure au radar double récepteur sur un exemple de dalle en béton armé avec quatre aciers 95
Figure 3.8: B-scans résultants d'une acquisition sur l'exemple de dalle en béton avec quatre aciers, à gauche le récepteur 1 et à droite le récepteur 2 95
Figure 3.9: Signaux enregistrés par les deux récepteurs dans l'air en fonction du temps 96
Figure 3.10: Régression linéaire de la droite 'distances émetteur-récepteurs en fonction du temps d'arrivée des pics négatifs des signaux enregistrés dans l'air' 97
Figure 3.11: Représentation des trajets linéaires émetteur-point-récepteur parcourus par l'onde électromagnétique dans le béton 98
Figure 3.12: Représentation de la zone comprenant les 'm' radargrammes autour d'un acier correspondant aux différentes positions E-R dans le B-scan du récepteur 1 99
Figure 3.13: Fenêtrage temporel des signaux du récepteur 1 et du récepteur 2 pour une position donnée « m ». Cas d'un point réflecteur 100
Figure 3.14: Fenêtrage temporel des signaux du récepteur 1 et du récepteur 2 pour une position donnée « m ». Cas d'un point non réflecteur 101
Figure 3.15: Résultats des sommations des fenêtres temporelles dans le cas d'un point réflecteur correspondant à un acier (a) et un point non réflecteur (b) 101
Figure 3.16 : Ensemble des A-scans respectivement enregistrés dans l'air et dans le béton . 102
Figure 3.17: Exemple de B-scan représentant un profil de mesures effectué sur une dalle en béton comportant quatre armatures 103
Figure 3.18: Disposition et profondeurs des armatures dans la dalle test en béton armé 105
Figure 3.19: Représentation du radar SIR® 30 106
Figure 3.20 : Représentation du dispositif radar double récepteur, (a) vue de dessus, (b) vue de dessous, (c) représentation de l'intérieur du dispositif montrant l'emplacement des antennes 107
Figure 3.21: Principe de mesure..... 108

Figure 3.22 :Influence de la taille de la fenêtre temporelle (FT) et du nombre de positions E-R (m) prises en compte sur les écarts de profondeur des aciers simples 111
Figure 3.23 : Dénommination des profils de mesures longitudinaux, transversaux et sens de mesures 112
Figure 3.24 : Comparaison des profondeurs calculées et réelles des aciers transversaux..... 113
Figure 3.25: Comparaison des profondeurs calculées et réelles des aciers longitudinaux..... 114
Figure 3.26 : Localisation des armatures longitudinales et transversales à la surface de la dalle test 115
Figure 3.27: Localisation des armatures longitudinales et transversales en profondeur de la dalle test..... 116
Figure 3.28 : Vitesses de propagation des ondes électromagnétiques dans le béton à une profondeur moyenne de 3,4 cm (vitesse dans la couche d'enrobage des armatures transversales) 117
Figure 3.29 : Vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le béton à une profondeur moyenne de 4,8 cm (vitesse dans la couche d'enrobage des armatures longitudinales) 117
Figure 4.1 : Représentations schématique et photographique d'un corps d'épreuve D2 ou D3 123
Figure 4.2: Coulage des corps d'épreuves D2 et D3 125
Figure 4.3: Mise à saturation en eau du corps d'épreuve D2..... 126
Figure 4.4: Représentation du radar SIR® 30, de gauche à droite, vue de face et vue d'arrière 126
Figure 4.5 : Dispositif de mesure utilisé sur les corps d'épreuves..... 127
Figure 4.6: Antenne émettrice et réceptrice utilisées pour les mesures en transmission sur carottes 127
Figure 4.7: Conditionnement des corps d'épreuves, respectivement à l'état saturé (à gauche) et sec (à droite) 128
Figure 4.8 : Carottage sous eau du corps d'épreuve D3 128
Figure 4.9 : Panneaux en bois comme support pour la carotte à gauche, à droite la mesure en transmission avec un émetteur (E) et un récepteur (R) sur une carotte en béton 129
Figure 4.10 : Disposition des deux panneaux pour les mesures au radar en transmission..... 130

Figure 4.11: Temps d'arrivée du premier pic dans le signal enregistré dans l'air (en haut) et dans le béton (en bas) 131
Figure 4.12 : Résultats des mesures effectuées sur les carottes et les corps d'épreuves – Vitesse de propagation des ondes électromagnétiques en fonction du degré de saturation ... 133
Figure 4.13: Loi reliant vitesse et teneur en eau volumique, estimation de la teneur en eau à partir de la vitesse mesurée sur site 134
Figure 4.14: Disposition et profondeurs du ferraillage de la maquette en béton armé avant coulage 136
Figure 4.15: Emplacement des profils de mesures longitudinaux et transversaux sur la maquette D1 137
Figure 4.16 : Positions des aciers dans le plan - résultats du 1er profil longitudinal 138
Figure 4.17 Profondeurs des aciers - résultats du 1er profil longitudinal 139
Figure 4.18 : Cartographie des armatures transversales 140
Figure 4.19: Cartographie des armatures longitudinales 140
Figure 4.20: Cartographie des aciers du premier lit d'armatures de la dalle D1 141
Figure 4.21: Cartographie des profondeurs des armatures transversales de la dalle D1 142
Figure 4.22 Cartographie des profondeurs des armatures longitudinales de la dalle D1 142
Figure 4.23: Cartographie des profondeurs des armatures de la dalle D1 143
Figure 4.24: Emplacement et dénomination des aciers sortants de la dalle – Dispositions des profils de mesures au radar et au Ferroscan 143
Figure 4.25 : Comparaison des profondeurs des aciers déterminées par l'algorithme sur des mesures radar et par le ferroscan 144
Figure 4.26: Cartographie de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques (cm/ns) de la dalle D1 146
Figure 4.27: Cartographie des teneurs en eau en (%) du béton de la dalle 148

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : check-list pour une inspection visuelle d'éléments de construction et ouvrages en béton, béton armé et béton précontraint (PI-BAT 1991) 27
Tableau 1.2: Constante diélectrique relative de matériaux utilisés en génie civil (Annan 2009) 31
Tableau 3.1: Paramètres d'acquisitions 109
Tableau 3.2 :Erreur relative moyenne (%) sur les profondeurs des aciers simples en fonction du cas du nombre de positions « m » et de la taille de la fenêtre temporelle « FT » 110
Tableau 3.3 : Résultats pour les profils de mesures longitudinaux 113
Tableau 3.4 : Résultats pour les profils de mesures transversaux 114
Tableau 4.1 : Caractéristiques normatives et techniques du béton 124
Tableau 4.2: Résultat des mesures sur les carottes et sur les corps d'épreuves en fonction du degré de saturation (%) 132
Tableau 4.3 : Détermination de la teneur en eau réelle 134
Tableau 4.4 : Paramètres de configuration du radar 136
Tableau 4.5 : Résultats de l'algorithme sur le 1er profil longitudinal 138
Tableau 4.6 : Profondeurs des aciers – réelles et calculées 145

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

I. PROBLÉMATIQUE DU CONTRÔLE NON DESTRUCTIF EN GÉNIE CIVIL

L'innovation, les travaux de recherche et le développement du contrôle non destructif (CND) observés ces dernières décennies en Génie Civil, s'inscrivent dans une réponse à la problématique du vieillissement et de la conservation du patrimoine bâti. Du fait du vieillissement du patrimoine bâti, les budgets consacrés à leur maintenance ne cessent d'augmenter, pour atteindre des sommes exorbitantes. Le niveau très élevé de ces coûts explique notamment l'innovation et le développement en matière d'outils de CND ces dernières années. En effet, une pratique appropriée et intelligente du CND permettrait de réduire les dépenses attribuées aux travaux de réparation. La caractérisation des dégradations du béton par des outils de CND performants contribuerait à la diminution directe des coûts de réparation de l'ouvrage.

L'intérêt à l'égard des techniques de CND ne cesse de s'accroître, car elles ont pour vocation d'apporter une aide dans le diagnostic et le contrôle des constructions en permettant la caractérisation physique du matériau, et/ou la caractérisation géométrique de la structure sans porter atteinte à son intégrité. Elles permettent donc d'estimer ou de déterminer certaines propriétés du matériau en place, de détecter des pathologies ou des modifications internes du matériau non perçues pendant l'inspection visuelle et de reconstruire la géométrie de la structure. La popularité des techniques de CND est suscitée par les gestionnaires d'ouvrages, en favorisant la maintenance des constructions existantes et la prévention des dégradations par rapport à la reconstruction.

La majorité des ouvrages d'art en France sont âgés d'une quarantaine voire d'une cinquantaine d'années. Ces structures se détériorent sous l'effet du vieillissement naturel ou accidentel des matériaux de construction. Les altérations que subissent ces matériaux peuvent influencer de façon dangereuse la sécurité et la stabilité de la structure. La durée de vie d'une

construction en béton armé ou en béton précontraint est réduite par divers phénomènes physico-chimiques, citons par exemple : la pénétration d'agents agressifs qui peuvent déclencher et développer le processus de corrosion des armatures, les cycles de gel-dégel et les réactions chimiques internes comme la réaction alcali-granulats qui provoquent un gonflement et une fissuration du béton.

Dans ces circonstances, le diagnostic et le suivi des structures du patrimoine bâti représentent une phase indispensable qui présente des intérêts liés à des enjeux pratiques, économiques et culturels. Le point de vue pratique du diagnostic des ouvrages consiste à informer les gestionnaires d'ouvrages sur la présence éventuelle de dégradations et de désordres dans la structure, à déterminer leurs origines, et à définir leur niveau de progression le plus précisément possible.

Il s'avère que la teneur en eau du béton est un facteur très important dans le diagnostic des structures en béton armé, car elle favorise le développement de la plupart des pathologies liées à la dégradation des structures affectant ainsi la durabilité du béton. Il est donc primordial d'estimer ce paramètre lors du diagnostic des structures en béton.

II. CADRE D'ÉTUDE

Les travaux de cette thèse ont été réalisés dans le cadre du projet éco-industries ATALANTE, qui vise à mettre au point un robot de diagnostic des bétons des ouvrages de bâtiment ou de Génie Civil.

Le projet ATALANTE est soutenu par la BPI France (Banque publique d'investissement France), l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), la DGCIS (Direction générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services) et le CGDD (Commissariat général du Développement durable), pour soutenir le développement de projets collaboratifs de recherche et développement à fort potentiel économique, visant à apporter des réponses à des enjeux environnementaux ciblés.

Le projet ATALANTE regroupe trois partenaires. ETANDEX, le porteur de projet, qui est une entreprise spécialisée dans la réhabilitation et rénovation de surface, le LMDC

(Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Université Paul Sabatier-INSA, Toulouse), et la société ECA spécialisée dans la fabrication de systèmes robotisés.

Le projet éco-industries ATALANTE vise à concevoir un robot automatisé et autonome destiné au diagnostic et au contrôle non destructif du béton des structures de génie civil. Dans ce projet, le LMDC intervient dans le développement des outils d'évaluation non destructive des ouvrages qui seront intégrés dans le robot, pour le diagnostic de la corrosion des armatures et du béton d'enrobage.

III. OBJECTIFS ET PLAN DE LA THÈSE

L'objectif de cette thèse porte sur l'application de la technologie radar et l'amélioration de la précision de la caractérisation physique et géométrique du béton des ouvrages de génie civil. Afin d'atteindre cet objectif, nous proposons une démarche qui consiste à analyser les signaux radar pour extraire, de manière rapide et automatique, des informations géométriques (position des armatures dans le plan et en profondeur) et une information physique du béton (teneur en eau).

L'originalité dans ce travail se manifeste d'abord dans l'utilisation d'un système radar double-offset permettant de lever le verrou lié à la méconnaissance du temps d'émission des impulsions électromagnétiques. L'autre aspect innovant de ce travail réside dans la facilité et la rapidité de la mise en œuvre et enfin dans l'automatisation du traitement, dans un contexte de robotisation, permettant une analyse des résultats quasiment en temps réel.

Le mémoire de thèse est structuré en quatre chapitres. Dans le premier, nous soulignons le besoin et l'intérêt d'utiliser des techniques de contrôle non destructif (CND) dans le domaine du Génie Civil, par la suite nous présentons les principales techniques de CND appliquées en Génie Civil ainsi que leur principe de fonctionnement et leur cas d'application. Enfin, nous faisons ressortir les points forts et les points faibles des méthodes de CND usuelles pour localiser les armatures dans le béton, en termes de facilité et rapidité de mise en œuvre et de traitement, de coût et de pertinence.

Nous rapportons dans le deuxième chapitre l'historique de la technologie radar et son utilisation en génie civil, ainsi que les notions essentielles sur les propriétés électromagnétiques du béton et la propagation des ondes radar dans un milieu à faibles pertes.

Le troisième chapitre comporte deux parties. La première porte sur la mise au point de l'algorithme développé fonctionnant sans prérequis et totalement automatique, qui permet de localiser en surface et en profondeur les armatures du premier lit d'éléments en béton armé, ainsi que la vitesse de propagation des ondes EM dans le béton d'enrobage de chaque acier. La seconde partie de ce chapitre est consacrée à la validation expérimentale de l'algorithme sur une dalle test en béton armé.

Le quatrième et dernier chapitre est également structuré en deux parties. D'abord, nous présentons la procédure entreprise pour la caractérisation physique du béton par des mesures radar in situ. Cette procédure consiste à relier la mesure des vitesses de propagation des ondes électromagnétiques dans le béton à la détermination de la teneur en eau de ce matériau. Le chapitre se termine avec la mise en application de l'algorithme automatique développé sur une maquette de dalle en béton armé à échelle réelle.

Le mémoire est clôturé par un chapitre de conclusions et perspectives.

Chapitre ***1***

Principes et applications des techniques de contrôle non destructif en génie civil

CHAPITRE 1 : PRINCIPES ET APPLICATIONS DES TECHNIQUES DE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF (CND) EN GÉNIE CIVIL

1.1 INTRODUCTION

Afin de réduire les budgets liés à l'entretien des structures de Génie Civil, la mise en place d'outils et de techniques de suivi et de diagnostic des structures fiables est primordiale. Il s'avère que les techniques de contrôle non destructif (CND) sont adaptées à cette problématique.

De nos jours, il existe une multitude de techniques de contrôle non destructif utilisées dans le domaine du génie civil, elles s'étendent de la simple inspection visuelle à des méthodes utilisant les technologies les plus avancées. Les techniques de CND sont utilisées pour la reconnaissance géométrique des structures et éléments du génie civil, et la caractérisation du matériau de construction.

Dans ce chapitre, nous prendrons connaissance de la nécessité et de l'intérêt de l'utilisation des techniques de CND dans l'auscultation et l'investigation des structures en génie civil, par la suite nous présentons des techniques de CND usuelles en génie civil en décrivant leur mode de fonctionnement, suivi d'un listing d'avantages et limites de techniques de CND appliquées à la localisation des armatures du béton armé. Et enfin, nous rappellerons le principe de fonctionnement de la technique radar utilisée dans le cadre de notre travail.

1.2 NÉCESSITÉ ET INTÉRÊT DE L'AUSCULTATION PAR LES TECHNIQUES DE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF (CND) EN GÉNIE CIVIL

Le patrimoine bâti occupe une place importante dans la société, puisqu'il fait partie de la culture et de l'identité collective d'une nation, mais aussi parce qu'il intervient dans l'économie d'un pays. Le financement de la restauration et l'entretien de ces ouvrages nécessitent un budget très important. Aux USA, les chiffres publiés par l'American Society of Civil Engineers dans son récent rapport sur les infrastructures précisent que 11 % des ponts américains sont estimés déficients, soit plus de 66 000 ouvrages qui couvrent environ un tiers de la surface totale des tabliers. L'investissement nécessaire est évalué à 76 milliards de dollars. De son côté l'administration fédérale des autoroutes (FHWA) a identifié plus de 150 000 ponts comme structurellement déficients ou obsolètes. En France, les moyens nécessaires à la remise en état du réseau national (routes, équipements et ouvrages) sont estimés à plus de 2000 M€ et que les moyens alloués par l'Etat pour le renforcement des ouvrages d'art du réseau national sont d'environ 100 M€/an. Concernant les ouvrages de production d'énergie, l'allongement sur le délai prévu, d'environ 100 jours, de l'arrêt pour maintenance du réacteur 1 de la centrale nucléaire de Flamanville en 2009-2010 a conduit à un coût total de 22 M€ (non comptées les pertes d'exploitation, de l'ordre de 1 M€ par jour d'arrêt) (Agence France Presse, 09/02/2010). La réfection partielle d'une coque d'aéroréfrigérant est de l'ordre de 3 à 10 M€ et sa reconstruction à neuf est estimée dans une fourchette de 40 à 60 M€. Il est donc essentiel de mettre en place un suivi continuel et régulier des structures afin d'une part d'avoir des informations sur l'état de l'ouvrage pour les sauvegarder au mieux, et d'autre part de maitriser les pathologies des ouvrages afin de bien gérer les budgets d'entretien.

En ce sens, des essais destructifs peuvent encore être pratiqués sur des carottes prélevées sur ouvrage, car ce sont des méthodes directes, qui permettent donc d'obtenir des résultats directement exploitables, mais le prélèvement de carottes peut être interdit sur certaines constructions, notamment les structures déjà dégradées et fragiles, mais aussi les ouvrages sensibles (centrales nucléaires) ou les constructions inscrites au patrimoine national. Les essais destructifs présentent aussi un inconvénient par rapport aux informations recueillies par le biais de prélèvements, car les caractéristiques déterminées restent locales et peuvent ne pas correspondre à l'état global du matériau constituant la construction.

Les techniques de CND sont connues pour leur rapidité de mise en œuvre et leur grand rendement, mais le critère le plus important est leur caractère non destructif, ce qui les rend pertinentes pour la surveillance et l'inspection des ouvrages d'art et du patrimoine bâti, puisqu'elles peuvent fournir des informations sur l'état d'un ouvrage sans l'endommager, sans aucun prélèvement de matériau.

En outre, l'évaluation se fait sur l'ensemble de l'ouvrage et permet ainsi la détermination des propriétés du matériau représentant l'état de l'ouvrage et la détection d'inclusions ou de défauts dans le béton. Enfin, la majorité des techniques de CND ont un coût abordable et une mise en œuvre rapide sur site.

1.3 PRÉSENTATION DES TECHNIQUES DE CND UTILISÉES EN GÉNIE CIVIL

L'utilisation de techniques de CND est très répandue en génie civil pour l'auscultation des constructions, l'évaluation et la caractérisation du béton c'est pour cela qu'elles font l'objet de différentes recherches et plusieurs dépôts de brevets. Vu la diversité des méthodes de CND, les utilisateurs expriment de nombreuses exigences et attentes en matière de pratique, précision et de coût. De ce fait, on trouve plusieurs documents de classification des techniques CND apportant de nombreuses informations sur les applications et principes de fonctionnement (PI-BAT 1991, IAEA 2002, Malhotra et Carino 2004).

En plus de l'inspection visuelle, les techniques de contrôle et d'évaluation non destructifs sont classées dans cinq catégories principales en se basant sur le type de technologie utilisée (techniques électromagnétique, acoustique, thermique, électrique et radiographique). Nous présenterons dans les paragraphes qui suivent le principe de fonctionnement et les principales applications de la plupart des techniques dans chaque catégorie.

1.3.1 L'inspection visuelle

En règle générale l'inspection visuelle constitue la première étape dans l'évaluation et le diagnostic d'une structure en béton. Cette étape peut fournir des informations importantes qui permettent d'identifier les causes des détériorations observées sur la structure investiguée. Pour extraire le maximum d'informations de l'inspection visuelle, il est nécessaire d'avoir des connaissances solides en matériaux de construction (béton …) et en méthodes de construction.

Il existe néanmoins des documents techniques pour guider l'opérateur peu expérimenté dans l'inspection visuelle (ACI 201.1R-08, ACI 207.3R-94, ACI 224.1R-07), ces documents fournissent des informations pour faciliter la reconnaissance et la classification de divers dommages, ainsi que des guides pour l'identification des causes prévisibles de dégradation.

Pour effectuer une inspection visuelle dans de bonnes conditions, il faut que l'opérateur commence par l'élaboration d'un plan d'inspection qu'il devra suivre afin de maximiser la qualité des données relevées. Ci-dessous les étapes et activités clés d'un plan d'investigation :

- Inspecter globalement la structure afin de se familiariser avec l'ouvrage ;
- Recueillir des documents de base et des renseignements sur la conception, la construction, les conditions ambiantes et le fonctionnement de la structure;
- Elaborer un plan d'inspection ;
- Mettre en place une grille de contrôle sur la structure pour servir de base à l'enregistrement des observations;
- Inspecter visuellement l'ouvrage;
- Effectuer les tests complémentaires nécessaires. (Davis 1998)

Le Tableau 1.1 représente une check-list pour une inspection visuelle d'éléments de construction et ouvrages en béton, béton armé et béton précontraint.

Tableau 1.1 : check-list pour une inspection visuelle d'éléments de construction et ouvrages en béton, béton armé et béton précontraint (PI-BAT 1991)

Caractéristiques	**Moyens auxiliaires**	**Résultats, Documentation**	**Contrôles, Compléments**
Coloration, par ex. par rouille	Appréciation visuelle, ciseau, massette	Formes, couleurs, situations, dimensions, particularités (par ex. attaches)	Rechercher les endroits « creux » (martèlement, évent. piquage)
Eclats, délitages	Appréciation visuelle, ciseau, massette	Emprises, profondeurs, situations, corrosion des armatures	Rechercher les endroits « creux » (martèlement)
Zones humides	Appréciation visuelle, ciseau	Situations, quantités d'eau résurgente éventuellement piquage de la zone d'arrivée de l'eau	Martèlement pour détecter les zones de désagrégation (gel), évent. analyse de l'eau (chlorures), prise en considération des conditions météo

Coulures, efflorescences	Appréciation visuelle, ciseau	Formes, couleurs, positions, dimensions, particularités	Rechercher les endroits sonnant « creux » (martèlement), évent. Piquage
Altérations	Appréciation visuelle, ciseau	Formes, couleurs, situations, particularités (liant, granulat)	Direction principale du vent
Structures superficielles alvéoles ségrégations	Appréciation visuelle	Formes, dimensions, situations, particularités (par ex. joints de travail)	Absorption de l'eau
Fissures : - Type et disposition - Largeur - Variation de longueur - Lèvres de la fissure	Appréciation visuelle, loupe Loupe graduée chablon à fissures Témoins, extensomètre Appréciation visuelle, ciseau, loupe	Types, situations, longueurs Largeur des fissures (positions déterminées) Variation dans le temps Colorations, humidité, corrosion de l'armature	Rechercher les endroits « creux » (martèlement), évent. piquer relever les phénomènes connexes (par ex. coulures). Date, météo Date, météo, trafic (influence) Martèlement, cavité
Absorption d'eau de la surface	Humidification, appréciation visuelle	Situations, comparaisons	Structure de la surface
Oints arêtes, liaisons	Appréciation visuelle	Particularités	Dégradations, corrosion, dépôt de saleté
Déformations	Appréciation visuelle	Situations, directions	Fissures, types et orientations
Carbonatation	Piquage, mesure du pH par la méthode avec indicateur sur une surface fraîchement cassée et propre	Coloration (profondeur à partir de laquelle le pH > 9)	

Malgré les capacités de cette technique à fournir immédiatement des informations sur l'état global et l'aspect visuel d'un ouvrage, comme la présence de fissures, l'érosion du béton, la corrosion avancée des armatures, etc., et son faible coût puisqu'elle ne nécessite pas l'utilisation d'appareils d'investigation onéreux, elle reste limitée. D'une part on ne peut pas se contenter des informations, certes intéressantes, obtenues par inspection visuelle, puisqu'elles représentent uniquement l'état global et extérieur de l'ouvrage, ce qui rend

l'évaluation des dégradations internes difficile, voire impossible. D'autre part, elle nécessite d'être réalisée par une personne expérimentée puisque l'expertise et la bonne interprétation des données dépendront de ses connaissances et de son expérience.

Pour les raisons citées précédemment, il est indispensable et plus intéressant d'associer, lors d'une opération de diagnostic d'ouvrage, l'inspection visuelle à d'autres techniques d'évaluation et de contrôle non destructifs, afin d'augmenter la fiabilité du diagnostic.

1.3.2 Les méthodes électromagnétiques

1.3.2.1 Le pachomètre

Le Pachomètre est utilisé pour la détection, la localisation et la détermination de la profondeur des armatures dans le béton et la maçonnerie. Il peut aussi être utilisé pour déterminer le diamètre des aciers de renforcement lorsque l'épaisseur de l'enrobage est connue. L'appareil applique un champ magnétique de basse fréquence à la surface du matériau, la présence d'acier perturbe le champ magnétique ce qui induit des courants de Foucault et ainsi une variation de tension aux bornes de la bobine d'induction qui est détectée et affichée par le dispositif. Le signal reçu diminue avec l'augmentation de la couche d'enrobage et il augmente lorsque le diamètre de l'acier est important (IAEA 2002).

1.3.2.2 Le radar

Un système radar est composé d'antennes émettrice et réceptrice dont le nombre peut varier suivant la configuration de mesures, d'une unité de commande, d'un dispositif de stockage et d'affichage des données. Ce dispositif peut émettre des impulsions électromagnétiques qui se propagent en s'atténuant dans les milieux, réceptionner et enregistrer les réflexions produites par les obstacles qu'elles rencontrent. L'enregistrement se fait pendant un intervalle de temps prédéfini par l'opérateur ce qui permet de constituer un radargramme représentant l'amplitude du signal reçu en fonction du temps. Pour convertir ce temps en profondeur, il est nécessaire de connaitre la vitesse de propagation des ondes EM dans le matériau investigué (ASTM D6432 – 11).

Il existe deux modes de configuration des antennes radar :

- La configuration bistatique (Figure 1.1.a): c'est la configuration la plus courante. Deux antennes distinctes sont utilisées, l'une pour l'émission des ondes EM et l'autre pour la réception.
- La configuration monostatique (Figure 1.1.b) : utilisation d'une seule antenne qui aura pour fonction l'émission et la réception d'ondes EM, cette configuration étant toutefois de moins en moins utilisée.

Suivant l'application souhaitée, les antennes du radar sont de différentes natures :

- Antennes couplées à l'air (Figure 1.2.a) : celles-ci se trouvent à une certaine distance (élévation) de la surface du matériau à ausculter comme le sol ou la chaussée. Elles sont utilisées dans le cas d'investigation à très grand rendement.
- Antennes couplées au sol ou au matériau (Figure 1.2.b) : les antennes sont en contact direct avec la surface du matériau ausculté.
- Antennes de forage (Figure 1.2.c) : celles-ci sont de forme cylindrique adaptées pour être insérées dans un puit de forage.

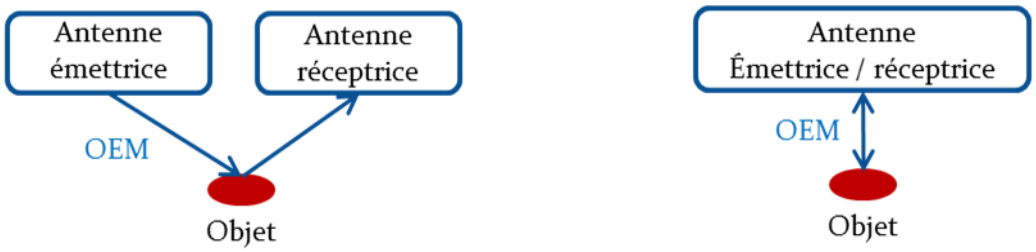


Figure 1.1 : Configurations usuelles des antennes radar, à gauche (a) mode bistatique : à droite (b) le mode monostatique

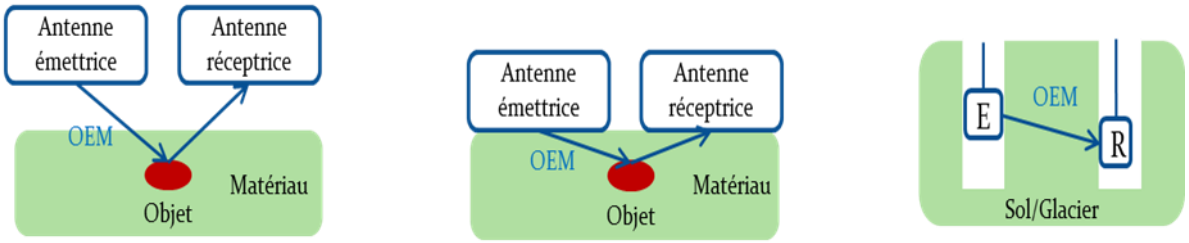


Figure 1.2: antennes radar usuelles dans le cas de la configuration en mode bistatique, respectivement de la gauche à la droite : (a) antennes couplées à l'air, (b) antennes couplées au matériau, (c) antennes de forage

L'exploitation des données radar est fondée sur l'étude des réflexions des ondes EM sur les différentes interfaces présentes dans le matériau ausculté. En génie civil ces interfaces sont

généralement de type air/béton, béton/armature et béton/air. Elles présentent des contrastes de propriétés électromagnétiques qu'un système radar peut détecter, ce qui permet d'obtenir des indications sur la structure (position, nature et épaisseurs des couches) ou sur les hétérogénéités présentes (cavités, conduites, armatures ...).

La vitesse de propagation des ondes EM dans le matériau ainsi que l'amplitude des signaux reçus dépendent de la constante diélectrique relative du matériau (Soutsos et al. 2001), cette propriété électromagnétique est elle-même affectée par la teneur en eau et en chlorures du matériau. Dans le Tableau 1.2 nous avons les valeurs de constante diélectrique relative de quelques matériaux utilisés en génie civil.

Tableau 1.2: Constante diélectrique relative de matériaux utilisés en génie civil (Annan 2009)

Matériau	**Constante diélectrique relative du matériau ε_r**
Argile sèche	2 - 20
Argile humide	15 - 40
Béton sec	4 - 14
Béton humide	10 - 20
Sable sec	3 - 6
Sable humide	10 - 30
Granite sec	5 - 8
Granite concassé et humide	5 - 15

Le radar fait l'objet de nombreuses études et applications, ainsi il existe plusieurs manuels et ouvrages dans lesquels sont mis en évidence le principe de fonctionnement du radar (Daniels 2004) ainsi que les avantages et les limites de cette technique d'auscultation (Davis 1998, IAEA 2002, Clemeña 2004).

L'application de systèmes radars en génie civil vise essentiellement à détecter des cavités (Pipan et al. 2000), la délamination dans les tabliers de ponts (Morey 1998, Huston et al. 2002), la localisation de canalisations (Cariou et al. 1997), à mesurer la profondeur d'armatures (Shaw et al. 2004, Hugenschmidt 2002, Agred et al. 2016), l'épaisseur des dalles et des éléments en béton, l'épaisseur de la couche de roulement des chaussées (Huston et al. 2002) et à la détermination de la teneur en eau et en chlorures dans le béton et mortier (Filali et al. 2006, Balayssac et al. 2007).

1.3.2.3 La technique capacitive

Cette technique permet d'obtenir une information sur l'état d'humidité de la couche d'enrobage du béton des structures. Elle se base sur la mesure de la fréquence de résonance d'un circuit oscillant entre les deux électrodes posées à la surface du béton à ausculter. Cette fréquence mesurée varie en fonction de la nature diélectrique du béton principalement liée à sa teneur en eau, à la nature de ses granulats et de son rapport E/C. La profondeur de béton ausculté dépend de la taille des électrodes, la profondeur de pénétration est de 2 à 3 mm en utilisant les petites électrodes de dimensions (5x5x70 mm), avec les électrodes intermédiaires (4x10x70 mm) la profondeur peut atteindre 2 à 3 cm et enfin avec les grandes électrodes (2x40x70 mm) la profondeur est de l'ordre de 7 à 8 cm (SENSO 2009).

1.3.3 Les méthodes basées sur la propagation d'ondes mécaniques

1.3.3.1 Les méthodes ultrasonores (ASTM C597)

Le principe de l'auscultation aux ultrasons se base sur la propagation d'ondes mécaniques dans le matériau. Un dispositif de mesure est composé d'un générateur relié à deux transducteurs piézoélectriques couplés à la surface du matériau ausculté par un gel afin d'assurer le bon contact entre le capteur et le matériau. Ces capteurs permettent de convertir une impulsion électrique en une onde acoustique et inversement. Un transducteur est utilisé comme émetteur et l'autre comme récepteur. Le dispositif est aussi muni d'un oscilloscope pour l'acquisition et la numérisation des signaux reçus. Il existe trois dispositions pratiques de mesure, la technique en transmission directe (a), la disposition semi-directe en diagonale (b) et la technique indirecte dite aussi de surface (c).

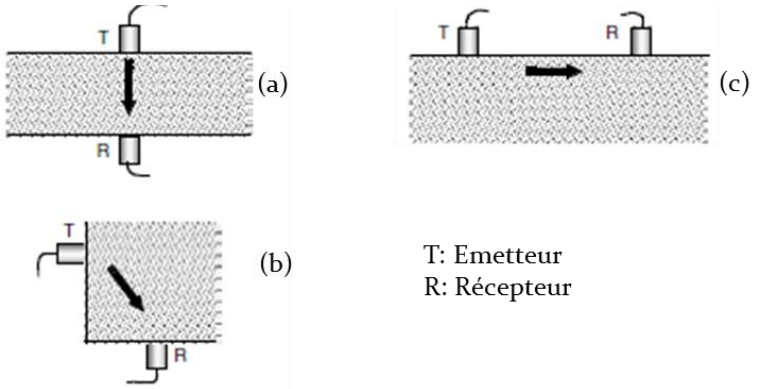


Figure 1.3: Cas de dispositions des capteurs dans la mesure aux ultrasons, respectivement transmission directe (a), la disposition semi-directe en diagonale (b) et la technique indirecte (c) (Naik T. R. et al. 2004)

Les ondes longitudinales « ondes P » nommées aussi ondes de compression, et les ondes transversales « ondes S » nommées ondes de cisaillement, sont des ondes mécaniques qui se propagent dans le matériau. Il existe aussi des ondes mécaniques qui peuvent se propager à la surface libre du matériau les « ondes de Rayleigh ».

La vitesse des ondes mécaniques (vitesse de propagation: des ondes P 'v_P', des ondes S 'v_S' et de surface 'v_R') dépend des propriétés mécaniques du matériau (coefficient de Poisson 'ν', module d'Young 'E'et densité 'ρ').

$$v_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \qquad \text{(eq. 1.1)}$$

$$v_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \qquad \text{(eq. 1.2)}$$

$$v_R \approx \frac{0{,}87 + 1{,}12\nu}{1+\nu} v_S \qquad \text{(eq. 1.3)}$$

La technique des ultrasons permet, avec la mesure de la vitesse, d'évaluer la qualité du béton. Cette technique permet aussi la détection des fissures, des nids-d'abeilles et des vides dans le béton (IAEA 2002).

1.3.3.2 L'impact-écho

Le principe de la méthode impact-écho est fondé sur l'analyse fréquentielle de la réponse générée par une onde de choc qui se propage dans le matériau, cette onde de choc étant produite à la surface du matériau par le biais d'une bille métallique. L'onde se propage dans le béton ou la maçonnerie et se réfléchit sur les défauts internes et les surfaces externes. Cette méthode est utilisée pour détecter les défauts dans le matériau et les épaisseurs des éléments en béton ou en maçonnerie (Sansalone et Carino 1986), mais aussi pour l'évaluation des propriétés mécaniques d'un béton endommagé par un incendie (Krzemień et Hager 2015).

1.3.3.3 Les ondes de surface (Onde de Rayleigh)

C'est en 1950 que les ondes de surface ont été utilisées pour déterminer l'épaisseur et la rigidité élastique (qui est fonction du module d'Young) des chaussées en béton et des couches sous-jacentes (Davis 1998). Les ondes de surface (Ondes de Rayleigh) permettent d'obtenir des informations sur les caractéristiques mécaniques du matériau en profondeur. Les avantages de l'utilisation de la méthode des ondes de surface se trouvent dans le fait que les

mesures ne nécessitent un accès qu'à une seule face de l'ouvrage à ausculter, et que les ondes de surface sont les plus sensibles aux modifications des propriétés mécaniques du béton (SENSO 2009).

L'inconvénient des ondes de Rayleigh est qu'elles s'atténuent fortement en profondeur. L'amplitude de cette onde diminue exponentiellement en fonction de la profondeur du matériau (Ould Naffa 2004).

L'exploitation des résultats dans cette technique est basée sur l'analyse de l'atténuation et les vitesses de propagation (vitesse de phase et vitesse apparente) des ondes de surface. Ces paramètres sont suivis en fonction de la longueur d'onde (λ) et de la fréquence, ce qui constitue un des avantages des ondes de surface, car elles permettent d'envisager une estimation de la variation des propriétés du matériau avec la profondeur. La profondeur d'investigation avec les ondes de surface est approximativement égale à la moitié de la longueur d'onde (Abraham 2012).

Il existe de nombreux dispositifs utilisant les ondes de Rayleigh appliqués pour l'auscultation du béton. À la base, cette méthode présentait certaines difficultés pour l'auscultation de grandes surfaces, liées en particulier au temps nécessaire pour faire les mesures qui est considérablement long, la nécessité d'appliquer un gel couplant qui peut laisser des traces sur le matériau et même altérer le béton.

Afin d'éviter ces difficultés, les dispositifs ont été améliorés en utilisant des transducteurs sans contact montés sur un support mobile permettant d'effectuer des mesures automatiquement, le positionnement et la mobilité des capteurs étant contrôlés par un ordinateur (Liu et al. 2014).

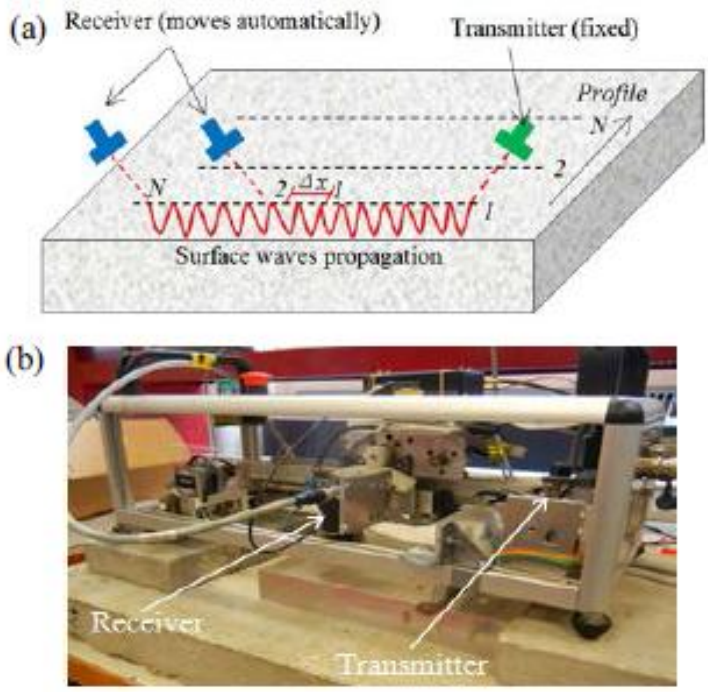


Figure 1.4: (a) Principe de fonctionnement des capteurs sans contact, (b) dispositif de mesure par ondes de surface automatisé et sans contact (Liu et al. 2014)

1.3.4 Les méthodes thermiques

Le principe des techniques d'investigation par thermographie infrarouge se base sur la mesure de gradient de température provoqué par les défauts ou anomalies (vides, nids d'abeille ou infiltration de d'eau) présents dans le matériau. Les variations du flux de chaleur engendrent des différences localisées de la température de surface, de ce fait, en mesurant les températures à la surface du matériau on peut déterminer la présence des anomalies et défauts sous-jacents et les localiser sur la surface investiguée.

Les techniques d'investigation par thermographie infrarouge mesurent seulement la température de la surface du matériau qui est influencée par trois facteurs :

- la configuration de la subsurface du béton (présence de vides, fissures, nid d'abeilles …),
- les conditions à la surface du béton (état de la surface et sa couleur, irrégularité, propreté …),
- l'environnement entourant la surface investiguée (conditions climatiques : vent, température ambiante, couverture nuageuse…), (Weil 2004).

Les techniques d'auscultation par thermographie infrarouge sont classées dans deux catégories : les méthodes passives sont celles qui ne nécessitent pas de source de chaleur artificielle, on mesure par exemple les gradients de température induits par les sollicitations naturelles comme le soleil. Les méthodes actives sont celles dans lesquelles sont utilisées les sources thermiques artificielles pour la mesure de variations de température.

1.3.4.1 La thermographie infrarouge passive

Lorsque la surface du béton est exposée au soleil ou aux variations de la température ambiante, les contrastes de températures relevés via des caméras thermiques peuvent indiquer la présence d'anomalies sous la surface du matériau (Figure 1.5). La variation de température dans l'environnement de la surface à ausculter engendre une diffusion de la chaleur à l'intérieur du béton. Les défauts et anomalies présents dans le matériau changent les propriétés thermiques qui modifient le transfert de chaleur (Breysse 2012).

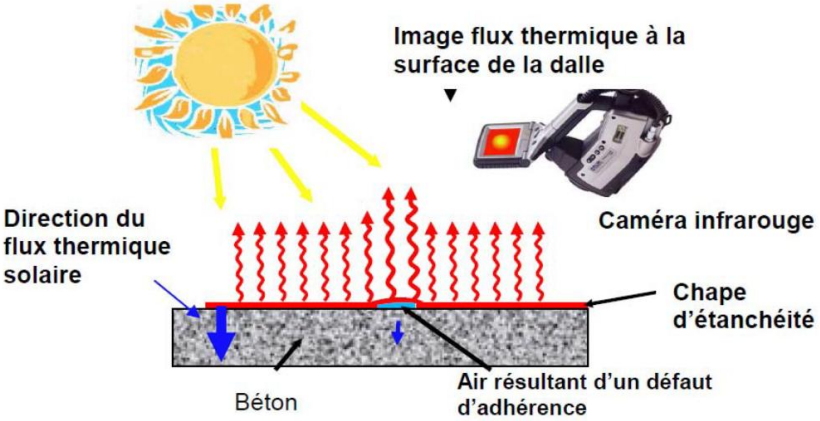


Figure 1.5: Exemple d'une auscultation d'un élément en béton par la thermographie passive (Cannard et al. 2011)

1.3.4.2 La thermographie infrarouge active

Cette catégorie se distingue de la précédente par son recours à une source thermique artificielle. La source thermique utilisée est contrôlée pour faire ressortir les gradients de température entre les parties du béton en bon état et celles présentant des défauts ou anomalies. Les différentes techniques de cette catégorie (thermographie pulsée, thermographie modulée, thermographie de phase pulsée, la vibro-thermographie stimulée par ultrasons et enfin le chauffage interne et détection externe par thermographie infrarouge) sont principalement utilisées en laboratoire puisque les dispositifs de chauffage sont difficiles à

mettre en œuvre in situ, mais certaines sont pertinentes pour déterminer la profondeur d'un défaut (Larget 2011).

1.3.5 Les méthodes radiographiques

Les méthodes radiographiques pour l'inspection du matériau de construction (béton, béton armé, béton précontraint, métaux …) comprennent la radiographie par rayons X, la gammagraphie et la radioscopie aux rayons X. Ces méthodes utilisent des matériaux radioactifs (Iridium 192 et Cobalt 60) et impliquent des rayonnements dangereux. L'image radiographique est prise sur un élément afin d'obtenir une image représentant l'intérieur de l'élément.

Ces techniques sont fiables pour voir à travers un élément en béton, elles peuvent détecter les défauts internes comme les vides dans les gaines de câbles de post-tension, et localiser les aciers des armatures du béton.

Le principe de fonctionnement de ces techniques est basé sur l'émission de rayonnement (X ou gamma) par une source (Iridium 192 ou Cobalt 60) qui traversent le matériau ausculté. Le degré de radiation traversant le matériau est relevé par un film sensible aux rayonnements qui est placé sur la face opposée de la source de radiation.

Du fait de l'utilisation de radiations dangereuses pour la santé, il est nécessaire de prendre certaines précautions de sécurité, comme boucler un périmètre de sécurité autour de la structure ou de l'élément à radier, et il faut que la mesure soit réalisée par une personne qualifiée. Les normes en vigueur doivent être suivies et respectées NF A 09-202 « Principes généraux de l'examen radiographique, à l'aide de rayons X et gamma, des matériaux béton, béton armé et béton précontraint ».

1.3.6 Les méthodes électriques

1.3.6.1 La résistivité électrique

La mesure de la résistivité électrique est employée en génie civil en complément d'autres techniques d'auscultation, notamment pour la localisation des zones à haut risque de corrosion (Morris et al. 2004), ou encore pour la description de variations de porosité ou de microfissurations (Lataste et al. 2003), mais aussi pour la mesure de gradients de teneur en eau (Nguyen 2016).

Dans le béton, les mécanismes de conduction ionique (électrolytique) constituent le principal mode de transport du courant, par conséquent le degré de saturation de la porosité influe sur la valeur de la résistivité électrique du béton.

Durant les études menées sur des roches sédimentaires saturées, Archie établit en 1942 une loi empirique (eq. 1.4) reliant la résistivité de la roche consolidée et non consolidée saturée, ρt (Ohm.m), la résistivité du fluide de saturation ρw (Ohm.m), la porosité Ø et la fraction des pores contenant le fluide S (Archie, 1942). Les paramètres a, m et n sont des constantes dépendantes du matériau considéré telles que : $0.5 \leq a \leq 2.5$, $1.3 \leq m \leq 2.5$, $n \approx 2$.

$$\rho_t = a\emptyset^{-m}.\rho_w S^{-n} \qquad \text{(eq. 1.4)}$$

La technique de mesure de la résistivité la plus utilisée est celle à quatre pointes (Figure 1.6) en configuration *Wenner* caractérisée par un espacement (a) constant entre les quatre électrodes (Figure 1.7).

Le principe consiste à injecter un courant électrique (I) par une électrode d'extrémité, le récupérer par la seconde pointe d'extrémité et à mesurer une différence de potentiel (V) entre les deux électrodes internes.

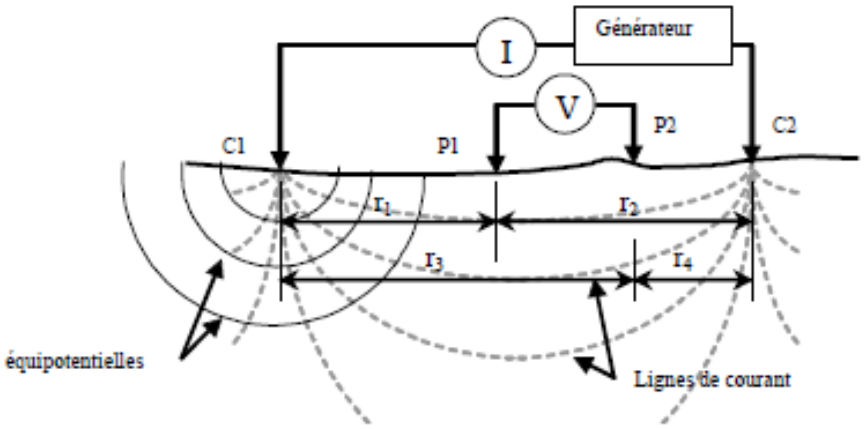


Figure 1.6: Principe de mesure de la résistivité électrique en géophysique, par dispositif quadripolaire (Lataste 2002)

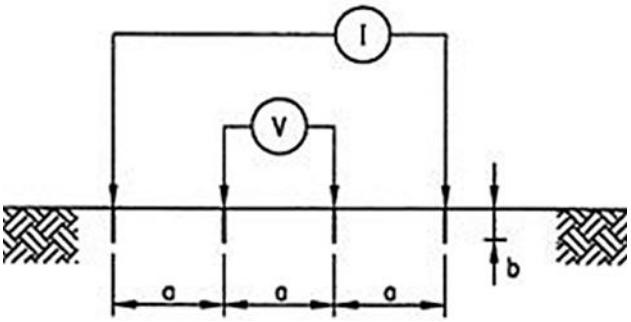


Figure 1.7: Principe de mesure de la résistivité électrique, configuration Wenner

La porosité du béton est conditionnée par de nombreux paramètres comme le rapport eau/ciment (E/C), la nature du ciment utilisé et l'âge du béton. Ces paramètres influent sur la résistivité électrique du béton par le biais de la porosité (Lataste 2002).

L'exploitation des mesures de la résistivité électrique se présente sous forme de carte des iso-valeurs. Cette carte permet la localisation des zones à forte probabilité de corrosion (zones moins résistives) et de réduire ainsi le nombre de prélèvements sur quelques zones, pour mesurer en laboratoire la valeur réelle d'un paramètre étudié ou simplement pour calibrer les mesures de résistivité électrique sur site.

1.3.6.2 La mesure de potentiel de corrosion

Cette méthode est utilisée pour l'estimation du potentiel de corrosion électrique de l'acier de renforcement dans le béton in situ et en laboratoire, afin de déterminer l'activité de corrosion de l'acier d'armature. Le principe de mesure consiste à mesurer la différence de potentiel entre l'armature et une électrode de référence (Cu/CuSO4) placée sur le béton (Figure 1.8). L'humidification de la surface de béton est nécessaire pour assurer la conductivité électrique.

Le potentiel électrique mesuré est affecté par le gradient d'humidité, la température et l'épaisseur de la couche d'enrobage. L'exploitation des mesures se fait sous forme de carte de potentiel électrique, dont les valeurs sont comparées à des valeurs de référence proposées par des normes (ASTM C-876-91) ou des recommandations (RILEM TC 154-EMC 2003) afin d'estimer la probabilité de corrosion et avoir enfin une estimation du degré de corrosion éventuel des aciers de renforcement.

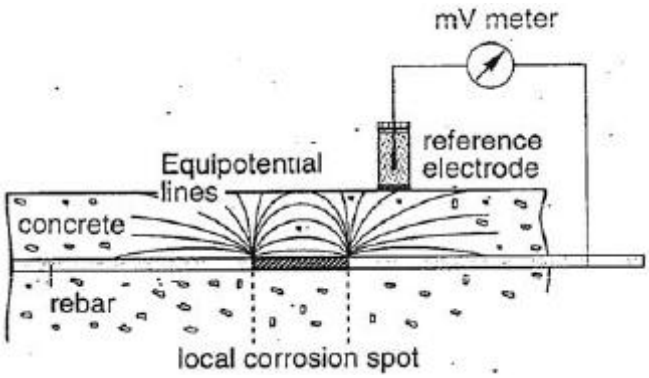


Figure 1.8: Principe de mesure de potentiel de corrosion avec utilisation d'une électrode de référence (RILEM TC 154-EMC (2003))

1.4 Avantages et inconvénients des techniques CND utilisées pour la localisation des armatures

Dans cette partie nous citerons les avantages et les limites des principales techniques présentées dans les paragraphes précédents, notamment celles qui permettent de localiser les aciers de renforcement dans le béton. Les techniques sont : le pachomètre, la thermographie infrarouge, la radiographie et enfin le radar.

1.4.1 Le pachomètre

Cet appareil de détection, localisation et détermination de la profondeur des armatures dans le béton possède les avantages que nous citons ci-dessous :

- l'appareil est léger et portable ;
- il est de faible coût (IFSTTAR B2-1 2015);
- il est simple à manipuler;
- la détection est rapide et les résultats sont obtenus en temps réel (IFSTTAR B2-1 2015);
- il peut aussi être utilisé pour déterminer le diamètre des aciers de renforcement lorsque l'épaisseur de l'enrobage est connue (IAEA 2002).

Le pachomètre présente aussi des inconvénients :

- la profondeur de détection des armatures est limitée à 70 ou 80 mm suivant le type de dispositif (IFSTTAR B2-1 2015);

- l'exactitude de l'épaisseur d'enrobage estimée est affectée par le diamètre de l'acier et l'espacement entre aciers;
- le second lit d'armatures n'est pas détectable avec le pachomètre ;
- l'interprétation des mesures est difficile lorsque les armatures sont groupées (ferraillage dense) (Vic roads 2010) ;
- la détermination des diamètres des armatures est difficile et nécessite la connaissance de l'épaisseur d'enrobage exacte (IAEA 2002);
- la surface auscultée doit être sans relief prononcé et la plus plane possible (IFSTTAR B2-1 2015).

1.4.2 La thermographie infrarouge

Par cette technique, une image thermique de l'élément investigué est obtenue après chauffage naturel ou artificiel. Cette image est analysée et en se focalisant sur les gradients de température elle permet de repérer les défauts et anomalies dans le matériau. En plus des défauts et anomalies présents dans le matériau, les différentes inclusions peuvent être distinguées comme les aciers de renforcement présents dans le béton.

La thermographie infrarouge appliquée dans le bâtiment a les avantages suivants :

- c'est une technique à grand rendement, les mesures sont effectuées rapidement sur de grandes surfaces ;
- les mesures sont réalisées sans contact avec la surface.

Par contre elle présente plusieurs limites :

- dans le cas de la thermographie infrarouge active le dispositif de mesure est lourd, car une source de chaleur artificielle est appliquée et le dispositif de radiation est volumineux ;
- sensible aux conditions climatiques (vent, taux d'humidité, nuages, pluie …) ;
- ne nécessite pas un opérateur expert pour la mise en œuvre, mais l'interprétation des résultats requiert des connaissances et la maitrise des comportements thermiques des matériaux ;
- difficultés dans la détermination des profondeurs ;
- détection d'anomalies, de défauts et d'inclusions avec de fortes profondeurs ;

1.4.3 La radiographie

Cette technique permet d'avoir une image interne de l'élément investigué et de distinguer ainsi toute inclusion présente dans celui-ci, c'est d'ailleurs le principal avantage de la radiographie.

La position des objets dans le plan XY peut être fournie à 1 cm près. La position en profondeur nécessite au moins deux expositions, sauf si l'on connaît précisément la taille et l'orientation de l'objet dans le matériau. D'une manière courante une précision de 1 cm sur le positionnement est réalisable. Le diamètre des armatures passives est donné à un diamètre près dans la gamme. (IFSTTAR B5-1 2015)

Par contre elle présente plusieurs inconvénients :

- nécessité d'avoir accès à deux faces de la structure puisque les mesures se font en transmission ;
- profondeur d'investigation limitée : la pénétration des rayons dans le béton est limitée à 30 cm en employant l'Iridium 192, à 60 cm dans lors de l'utilisation du Cobalt 60, mais avec un accélérateur de particules la profondeur de pénétration atteint 120 cm (IFSTTAR B5-1 2015);
- surface investiguée réduite à cause des tailles limitées des films sensibles aux rayonnements (30x40 cm en radiographie, 35x43 cm en radiographie numérique) (IFSTTAR B5-1 2015);
- aucune information sur la profondeur des aciers;
- utilisation de radiations dangereuses pour la santé nécessite de boucler un périmètre de sécurité autour de la structure ou de l'élément à radier ;
- investigation par opérateur qualifié et formé à l'utilisation de la technique radiographique ;
- interprétation des résultats faite par un expert qui maîtrise les techniques radiographiques et doit avoir des connaissances sur les matériaux de construction ;
- technique couteuse, complexe et exigeante concernant la mise en œuvre et la règlementation.

1.4.4 Le radar

Cette technique est utilisée pour détecter et localiser des vides et divers objets enfouis dans le sol ou dans les matériaux de construction. Son fonctionnement est fondé sur l'émission d'impulsions électromagnétiques qui se propagent dans le matériau, et la réception des réflexions dues à la présence d'hétérogénéités ou d'interfaces de différentes propriétés électromagnétiques.

Parmi les avantages que présente le radar on peut lister :

- simplicité et rapidité d'utilisation ;
- technique à grand rendement, permet l'investigation de l'intégralité d'un ouvrage ;
- accès à une seule surface pour les mesures ;
- système de mesure portable, peu encombrant et léger;
- sensible à l'humidité du béton qui représente un paramètre essentiel dans la pathologie et durabilité du béton (SENSO 2009);
- capacité des impulsions EM à pénétrer à travers les différentes interfaces ;
- peu sensible aux variations des conditions environnementales ;
- implantation et déroulement de l'investigation dispensée de règles de sécurité élevée, nécessitant rarement l'arrêt ou la restriction de la circulation dans le site.

Comme toute technique de CND, le radar présente quelques limites listées ci-dessous :

- la surface investiguée doit être plane et dépourvue d'aspérités importantes (dimensions des aspérités doivent être inférieures à 1 cm) ;
- la profondeur investiguée est influencée par l'âge du béton, tel qu'un béton trop jeune ou trop humide peut fortement limiter la profondeur d'auscultation (de l'ordre de 20 cm) (IFSTTAR C1-1 2015);
- il est difficile d'individualiser les armatures très proches (aciers multiples) (IFSTTAR C1-1 2015);
- il est nécessaire de faire une calibration ou d'utiliser des techniques de CND complémentaires afin d'estimer la vitesse de propagation des ondes EM dans le béton, car la vitesse est indispensable pour la détermination des profondeurs d'armatures ;
- la localisation des armatures en profondeur est d'une précision centimétrique (IFSTTAR C1-1 2015);

- elle requiert un opérateur expérimenté pour effectuer les mesures et interpréter les résultats.

Compte tenu des avantages que présente la technique radar, elle s'avère très pertinente pour la localisation des armatures dans les structures. Elle présente néanmoins des inconvénients qui se répercutent sur la qualité des résultats de localisation des aciers de renforcement, notamment la méconnaissance de paramètres essentiels pour la détermination des profondeurs des aciers, comme la vitesse réelle de propagation des ondes EM dans le béton, et le temps zéro (t_0) qui correspond au moment d'émission des impulsions EM.

Actuellement, la vitesse de propagation des ondes EM dans le béton est choisie en se référant à l'état global du matériau, en tenant compte de sa porosité, son âge et son humidité. Celle-ci est comprise entre 8 et 15 cm/ns correspondant, respectivement, à un béton saturé et sec (Millard et al. 2002). Mais la vitesse peut aussi être déterminée en utilisant des traitements sur des logiciels fondés sur la migration de données (RADAN), ou encore par application d'autres techniques de CND complémentaires.

Il est bien entendu plus intéressant d'utiliser une vitesse du matériau déterminée par traitement, que de choisir sa valeur instinctivement en se basant par exemple sur le retour d'expérience sur chantier. Les logiciels de traitement de signaux radar permettent de déterminer la vitesse du matériau par migration de données, cela consiste en la recherche de modèle d'hyperbole prédéfini qui épouse la forme de l'hyperbole réelle, cette dernière correspondant à la trace caractéristique d'un point réflecteur dans le radargramme. Ces modèles d'hyperboles sont des fonctions mathématiques, ils ne tiennent pas compte de la profondeur de l'acier ni de son diamètre. Sachant qu'une hyperbole peut avoir la même forme pour un acier profond de diamètre important, que pour un acier peu profond de faible diamètre.

Dans le cas d'un profil de mesures (B-scan) contenant plusieurs barres d'acier (Figure 1.9), lors du traitement par logiciel, la recherche de la forme d'hyperbole se fait généralement sur une seule hyperbole pour déterminer la vitesse de propagation des ondes EM dans le béton. Cette vitesse correspond en réalité à une vitesse locale estimée au droit de l'acier, qui correspond à l'hyperbole choisie dans le B-scan lors du traitement. Or le béton étant hétérogène, la vitesse de propagation des ondes EM dans ce matériau varie d'une zone à une

autre, donc l'utilisation de cette vitesse estimée localement sur un seul acier, pour tout le profil de mesure, engendre des erreurs et imprécisions sur la localisation des aciers en profondeur.

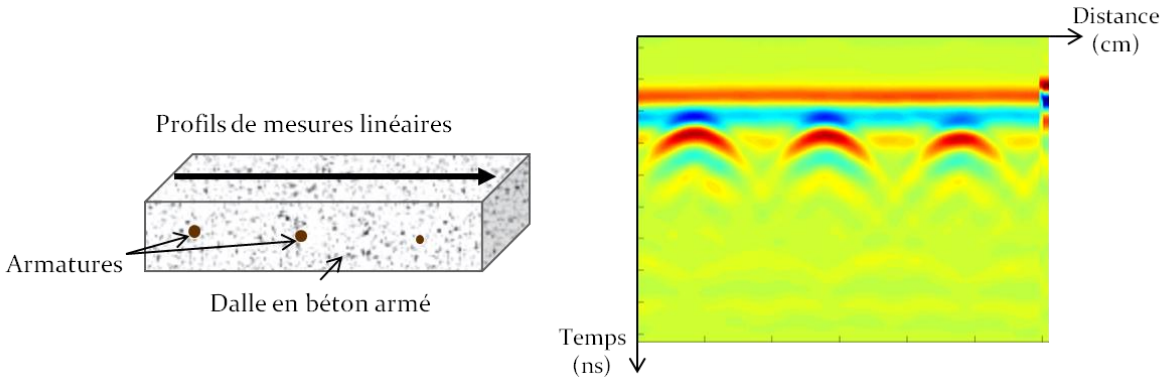


Figure 1.9: Exemple d'un profil de mesure (B-scan) sur une dalle en béton armé

Les données fournies par une mesure radar correspondent à des coupes temps représentants l'amplitude des signaux en fonction du temps d'arrivée des impulsions EM au récepteur. Un des points faibles des systèmes radar est la méconnaissance du moment d'émission des impulsions EM par le radar. La possession de ce paramètre, nommé le temps zéro (t_0), est fondamentale pour positionner les signaux par rapport à leur moment d'émission. Des études ont été menées afin d'établir une méthode pour la détermination de t_0, sa valeur étant communément choisie comme le temps d'arrivée du premier pic de la première onde reçue appelée onde directe (Yelf et Yelf 2004).

Afin de remédier aux limites que présente la technique radar, notamment le manque de précision dans la détermination des profondeurs des armatures lié, d'une part à la vitesse des propagations des ondes EM dans le matériau, et d'autre part à la méconnaissance du temps zéro, nous utiliserons un dispositif de mesure doté d'un émetteur et deux récepteurs. L'utilisation de ce dispositif permet de déterminer précisément le temps zéro. Un algorithme sera développé pour déterminer la profondeur de chaque acier d'armature et la vitesse moyenne de propagation des ondes EM dans la couche d'enrobage autour de chaque acier. Cet algorithme fonctionnera automatiquement et ne nécessitera pas l'introduction de paramètres physiques liés à l'état du matériau.

1.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons mis en évidence différents points comme le besoin et l'intérêt d'utiliser des techniques de contrôle non destructif (CND) dans le domaine du Génie Civil, la présentation des principales techniques de CND ainsi que leur principe de fonctionnement et leur champ d'application. Ensuite, nous avons listé les avantages et inconvénients de techniques de CND appliquées pour la localisation des armatures du béton armé, ce qui nous a permis de faire un comparatif entre techniques en termes de coût, précision, facilité de mise en œuvre et de traitement, rapidité d'investigation et de traitement, niveau de précautions nécessaire… Une fois que nous avons mis au clair les points forts et les points faibles de ces méthodes, nous avons pu justifier notre choix de l'utilisation de la technique radar et ce que nous envisageons pour l'améliorer.

1.6 RÉFÉRENCES

(Abraham 2012) Abraham O., Piwakowski B., Villain G., Durand O. Non-contact, automated surface wave measurements for the mechanical characterization of concrete. Construction and Building Materials 37 (2012) 904–915.

(ACI 201.1R-08) American Concrete Institute Committee 201, 201.1R-08: Guide for Conducting a Visual Inspection of Concrete in Service, Categories: Durability, 2008.

(ACI 207.3R-94) American Concrete Institute Committee 207, 207.3R-94: Practices for Evaluation of Concrete in Existing Massive Structures for Service Conditions (Reapproved 2008), Categories: Mass Concrete, 1994.

(ACI 224.1R-07) American Concrete Institute Committee 224, 224.1R-07: Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures, Categories: Cracking, 2007.

(Agred et al. 2016) Agred K., Klysz G., Balayssac J.P., 3D localization of the reinforcement in reinforced concrete slab by using GPR, in NDT and diagnosis of problems, Concrete Solutions, Edited by Grantham Michael G. Papayianni Ioanna Sideris Kosmas, Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742 CRC Press, Pages 173–180

(Annan 2009) A.P. Annan, Chapter 1 - Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar, In Ground Penetrating Radar Theory and Applications, edited by Harry M. Jol,, Elsevier, Amsterdam, 2009, Pages 3-40

(ASTM D6432 – 11) Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation, Book of Standards Volume: 04.09

(Balayssac 2007) Balayssac J.-P., Kringkaï V., Sbartaï M., Klysz G., Laurens S., Arliguie G., “Contribution au développement du radar pour la caractérisation non destructive du béton”, 25e rencontre de l’AUGC, 23-25 mai 2007, Bordeaux.

(Breysse 2012) Breysse D. Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques. Springer, RILEM 2012, 374p.

(Cannard et al. 2011) Cannard H., Benchet R., Gerbaud F., Grivaud S., Macor L., Contrôle par thermographie infrarouge des doubles soudures avec canal central des géomembranes plastomères, présenté au colloque Rencontres Géosynthétiques 2011, p 229-238.

(Cariou 1997) Cariou J., Chevassu G., Cote P., Dérobert X., Le Moal J.Y., "Application du radar géologique en génie civil", Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées 211, Sept-Oct 1997 - RÉF. 4135, p. 117 - 131.

(Clemeña 2004) Gerardo G. Clemeña, Short-Pulse Radar Method, in CRC Handbook on Non-Destructive Testing of Concrete, Malhotra and Carino Editors, CRC Press, 2004, chapter 13.

(Daniels 2004) Daniels D.J., Ground Penetrating Radar, 2nd edition, The Institution of Electrical Engineers, 2004

(Davis 1998) Davis A.G. Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. ACI 228.2R-98, 1998

(Filali 2006) Filali B., Rhazi J. E., Ballivy G., "Mesure des propriétés diélectriques du béton par une large sonde coaxiale à terminaison ouverte", Presses scientifiques du CNRC, Can. J. Phys. 84, 2006, p. 365 - 379.

(Hugenschmidt 2002) Hugenschmidt J., Concrete bridge inspection with a mobile GPR system, Construction and Building Materials 16, 2002, p. 147 – 154.

(Huston 2002) Huston D., Fuhr P., Maser K. and Weedon W., "Nondestructive Testing of Reinforced Concrete Bridges Using Radar Imaging Techniques", The New England Transportation Consortium Report, 94–92, 2002, p. 182p.

(IAEA 2002) Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria, 2002

(Ifsttar B2-1 2015) Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux, Cahier interactif : méthodes d'auscultation du matériau en place, béton armé (durabilité), mesure de la profondeur d'enrobage et du diamètre des aciers, fiche B2-1, octobre 2015.

(Ifsttar B5-1 2015) Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux, Cahier interactif : méthodes d'auscultation du matériau en place, câbles, gammagraphie – radiographie - radioscopie, fiche B5-1, octobre 2015.

(Ifsttar C1-1 2015) Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux, Cahier interactif : méthodes d'auscultation de la structure, reconnaissance de la géométrie, technique radar pour localisation d'armatures, fiche C1-1, octobre 2015.

(Krzemień et Hager 2015) Krzemień, K., Hager, I., Post-fire assessment of mechanical properties of concrete with the use of the impact-echo method. Construction and Building Materials 96, 155–163, 2015

(Larget 2011) Larget M. Contribution à l'évaluation de la dégradation du béton : Thermographie infrarouge et couplage de techniques. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 2011, 225 p.

(Lataste 2002) J.F. Lataste, Evaluation non destructive de l'état d'endommagement des ouvrages en béton arme par mesure de résistivité électrique, Thèse Université Bordeaux I, n° d'ordre 2609, spécialité Mécanique, 2002.

(Lataste et al. 2003) J.F. Lataste, C. Sirieix, D. Breysse, M. Frappa, Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering, NDT & E International, Volume 36, Issue 6, September 2003, Pages 383-394.

(Liu et al. 2014) Q. Liu, B. Piwakowski, Z. Lafhaj and K. Agred, "Automated non-contact NDT by ultrasonic surface waves," 2014 IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing, Chengdu, 2014, pp. 79-83

(Malhotra et Carino 2004) Malhotra V.M., Carino N.J., Handbook on Nondestructive Testing in Concrete, 2nd éd., 2004, CRC Press, Boca Raton, FL

(Maurey 2015) Maurey H., Les collectivités territoriales et le financement des lieux de culte, Rapport d'information N° 345 (2014-2015), fait au nom de la délégation aux collectivités territoriales, déposé au Sénat le 17 mars 2015,

(Millard et al. 2002) S.G Millard, A Shaari, J.H Bungey, Field pattern characteristics of GPR antennas, NDT & E International, Volume 35, Issue 7, October 2002, Pages 473-482

(Morey 1998) Morey R., “Ground Penetrating radar for Evaluating Subsurface Conditions for Transportation Facilities”, Synthesis of Highway Practice 255, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board. National Academy Press, 1998.

(Morris et al. 2004) W. Morris, A. Vico, M. Vázquez, Chloride induced corrosion of reinforcing steel evaluated by concrete resistivity measurements, Electrochimica Acta, Volume 49, Issue 25, 1 October 2004, Pages 4447-4453.

(Naik T. R. et al. 2004) Naik T.R., Malhotra V.M., Popovics J.S., The Ultrasonic Pulse Velocity Method, in CRC Handbook on Non-Destructive Testing of Concrete, Malhotra and Carino Editors, CRC Press, 2004, chapter 8.

(Nguyen 2016) A. Q. Nguyen, Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique, Thèse à Université Toulouse III Paul Sabatier, spécialité Génie Civil, 2016.

(Ould Naffa 2004) Ould-Naffa S., Evaluation de la dégradation du béton par ondes ultrasonores, Thèse de doctorat Électronique, Valenciennes 2004, 193 p.

(PI-BAT 1991) Techniques d’auscultation des ouvrages de génie civil, Programme d’Impulsions PI-BAT – Entretien et rénovation des constructions, Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne. 724.453 f, juillet 1991

(Pipan 2000) Pipan, M., Baradello L., Forte E. and Prizzon A.,“GPR study of bedding planes, fractures and cavities in limestone”, Proceedings, Eight International Conference on Ground-Penetrating Radar, May 23–26, 2000, Gold Coast, Queensland, Australia. Proceedings of SPIE – The International Society of Optical Engineering, Bellingham, Washington, p. 682 - 687.

(RILEM TC 154-EMC (2003)): Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion Recommendations. Half-cell potential measurements - potential mapping to locate corroding reinforcement in concrete structures. Materials and Structures, Vol. 36, August-September 2003, pp 461-471.

(Sansalone et Carino 1986) M. Sansalone, N. Carino, Impact-echo: a method for flaw detection in concrete using transient stress waves, NBSIR 86–3452, Gaithersburg, MD: National Bureau of Standards, 1986

(Sbartaï 2005) Sbartaï Z. M. Caractérisation physique des bétons par radar – Approche neuromimétique de l'inversion. Thèse de doctorat, Université de Toulouse III – Paul Sabatier, 2005, 244 p.

(SENSO 2009) SENSO Projet ANR, Stratégie d'Evaluation Non destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton, rapport final, septembre 2009

(Shaw 2005) Shaw M.R., Millard S.G., Molyneaux T.C.K., Taylor M.J., Bungey J.H., "Location of steel reinforcement in concrete using ground penetrating radar and neural networks", NDT&E International 38, 2005, p. 203 - 212.

(Soutsos et al. 2001), Soutsos, M.N., Bungey, J.H., Millard, S.G., Shaw, M.R., Patterson, A.. Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing. NDT & E International 34, 2001, 419–425

(Vic roads 2010) Technical note 61: Non-destructive testing (NDT) of concrete in structures, december 2010.

(Weil 2004) Weil G.J., Infrared Thermographic Techniques, in CRC Handbook on Non-Destructive Testing of Concrete, Malhotra and Carino Editors, CRC Press, 2004, chapter 15.

(Yelf and Yelf 2004) Yelf R. and Yelf D. Where is true time zero? Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, vol. 1, June 2004. p. 279–82.

Chapitre ***2***

Technique radar et notions de propagation des ondes électromagnétiques

CHAPITRE 2 : TECHNIQUE RADAR ET NOTIONS DE PROPAGATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

2.1 HISTORIQUE SUR LA TECHNOLOGIE RADAR

Le mot radar est un nom de code officiellement adopté par la marine nationale des États-Unis en 1940, il représente l'acronyme de l'expression : RAdio Detection And Ranging, signifiant détection et estimation de la distance par ondes radioélectriques, ou simplement radiorepérage.

Le radar est une application de la théorie de l'électromagnétisme. Il émet une onde électromagnétique (EM) à une fréquence donnée qui se propage dans le milieu et se réfléchit sur les interfaces de différentes propriétés EM.

C'est dans le domaine des télécommunications et radionavigation qu'est utilisée pour la première fois la radioélectricité, mais déjà au début du XXe siècle des innovateurs pensèrent à la possibilité d'utiliser les ondes électromagnétiques pour détecter des objets métalliques (Darricau 2012). La technique a vraiment connu une grande innovation entre 1930 et 1945, car pendant cette période elle a été reprise et utilisée à des fins militaires, notamment de défense, dans plusieurs pays comme l'Italie, la France, le Royaume-Uni, les USA, la Russie, etc. Depuis, l'utilisation des ondes EM n'a cessé d'être développée, améliorée et se retrouve de nos jours dans plusieurs domaines civils : ingénierie, gestion de l'environnement, géologie, etc.

Dans les années 1950, le système radar a commencé à être utilisé pour l'auscultation non destructive des matériaux en géophysique afin de reconstituer des structures du sous-sol à partir des réflexions générées par la présence de contrastes diélectriques. Par la suite, le développement des radars s'est poursuivi et l'invention de radar de type GPR (Ground Penetrating Radar) a vu le jour. Ce dernier a été très utilisé en géophysique, notamment pour la mesure d'épaisseurs des glaciers (Arcone 2009), en archéologie comme la détection de

cavités souterraines et d'objets enfouis (Daniels 2004). L'inconvénient des ondes radar lors des explorations géophysiques est qu'elles sont rapidement atténuées dans les sols à forte conductivité, ce qui limite la profondeur investiguée. Afin de remédier à ce problème, des antennes à basse fréquence ont été utilisées, car elles permettent des investigations à de grandes profondeurs. Cependant, cette solution n'est pas adaptée lorsqu'il s'agit de la localisation d'objets enfouis, car la résolution de l'appareil est limitée lors de l'utilisation de basse fréquence, puisque la longueur d'onde est souvent plus grande que les dimensions de l'objet à détecter, rendant ainsi l'interprétation et le traitement des données compliqués.

La première étude utilisant le GPR en génie civil a été faite en 1974 dans le but d'inspecter les chaussées (détection de cavités) dans les aérodromes (Clemena 2004). En raison des faibles épaisseurs des éléments et structures en génie civil comparées aux grandeurs des éléments en géophysique, il a fallu développer des antennes hautes fréquences. Grâce au développement de ces antennes la résolution du radar a été améliorée, le traitement et l'interprétation des résultats simplifiés.

Les applications du radar en génie civil peuvent être classées en deux groupes principaux :

- La caractérisation géométrique. Nous retrouvons dans cette catégorie : la détection des armatures, des gaines de précontrainte, des canalisations, des fissures, des vides, des délaminations, etc. L'estimation des épaisseurs des dalles en béton, de la profondeur des armatures, de la couche de roulement, etc.
- La caractérisation physique. Dans celle-ci nous retrouvons : l'estimation des paramètres physiques du béton comme la teneur en eau et en chlorures.

Il existe trois types principaux de radars :

- Le radar impulsionnel : il émet un signal temporel caractérisé par un spectre de fréquence centrale *fc* adapté au type d'investigation, de largeur de bande approximativement égale à *fc*. Les signaux reçus sont enregistrés en fonction du temps.
- Le radar à saut de fréquence : il est composé d'un analyseur de réseaux qui génère une succession d'ondes monochromatiques de différentes fréquences sur une plage donnée (la bande de fréquence pouvant varier de 10MHz à 20GHz). À chaque fréquence, une onde est émise de l'antenne émettrice vers le milieu. L'analyseur enregistre la réponse

du milieu via l'antenne réceptrice. Le cycle se répète jusqu'à ce que toute la bande de fréquences ait été balayée, avec un pas donné (défini par le nombre de points de fréquence et la largeur de bande). Pour chaque cycle effectué, une transformée de Fourier inverse permet de reconstituer le signal dans le domaine temporel. On obtient ainsi un scan équivalent au signal temporel obtenu avec les radars impulsionnels. Plus la bande de fréquence est large, et plus la résolution temporelle est fine.

- Le radar à onde continue modulée en fréquence (FM-CW, Frequency Modulated-Continuous Wave) a pour spécificité 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.

Des trois types de radars cités ci-dessus, le radar impulsionnel est le plus fréquemment utilisé en génie civil en raison de sa simplicité d'utilisation et de sa robustesse.

2.2 PROPRIÉTÉS ÉLECTROMAGNÉTIQUES DU BÉTON

Le comportement d'une onde électromagnétique dans un matériau est gouverné par les propriétés électromagnétiques de celui-ci correspondantes à :

- la conductivité électrique : σ;
- la permittivité diélectrique : ε;
- la perméabilité magnétique : μ.

2.2.1 Permittivité effective

La conductivité électrique (σ) ainsi que la permittivité diélectrique (ε) sont des grandeurs complexes. Les conventions adoptées ci-dessous montrent que les propriétés électromagnétiques dépendent de la fréquence d'excitation:

$$\sigma(\omega) = \sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega) \qquad \text{(eq. 2.5)}$$

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) \qquad \text{(eq. 2.6)}$$

$i^2 = -1$;

ω : pulsation de l'onde ($\omega = 2\pi f$).

La densité de courant totale s'écrit :

$$\vec{J} = \vec{J_c} + \vec{J_d} = \sigma\vec{E} + i\omega\varepsilon\vec{E} \qquad \text{(eq. 2.7)}$$

$$\vec{J} = (\sigma' + i\sigma'')\vec{E} + i\omega(\varepsilon' - i\varepsilon'')\vec{E} \qquad \text{(eq. 2.8)}$$

$$\vec{J} = ((\sigma' + \omega\varepsilon'') + i(\sigma'' + \omega\varepsilon'))\vec{E} \qquad \text{(eq. 2.9)}$$

$\vec{J_c}$: densité de courant de conduction (A/m²);

$\vec{J_d}$: densité de courant de déplacement (A/m²) ;

$\vec{E}$: champ électrique (V/m).

La partie réelle de la permittivité diélectrique (ε'), traduit l'aptitude du béton à la polarisation électrique résultant de l'existence de dipôles permanents. La partie imaginaire de la permittivité diélectrique (ε''), représente les pertes diélectriques générées lors du mouvement des dipôles sous l'effet du champ électrique. L'alignement du moment dipolaire dans la direction du champ électrique, nommé phénomène de relaxation diélectrique, génère en effet des frottements traduits par un dégagement de chaleur.

La partie réelle de la conductivité (σ'), quant à elle, exprime la composante résistive de la conductivité du béton, alors que la partie imaginaire (σ'') traduit la composante capacitive de la conductivité, soit la capacité de polarisation des charges mobiles (espèces ioniques de la solution interstitielle dans le cas du béton).

La permittivité diélectrique ainsi que la conductivité électrique ont été définies d'un point de vue théorique, de manière à séparer les phénomènes électriques élémentaires. Cependant, dans la gamme des fréquences radar, les ondes sont influencées par ces deux propriétés, et il est impossible de distinguer leurs effets respectifs sur une mesure radar. C'est pour cela qu'on définit en pratique une permittivité effective (ε_e), ou une conductivité effective (σ_e).

$$\varepsilon_e = \varepsilon_e' - i\varepsilon_e'' = \left(\varepsilon' + \frac{\sigma''}{\omega}\right) - i\left(\varepsilon'' + \frac{\sigma'}{\omega}\right) \qquad \text{(eq.2.10)}$$

$$\sigma_e = \sigma_e' + i\sigma_e'' = (\sigma' + \omega\varepsilon'') + i(\omega\varepsilon' + \sigma'') \qquad \text{(eq. 2.11)}$$

Avec :

$$\vec{J} = \sigma_e \vec{E} = i\omega\varepsilon_e \vec{E} \qquad \text{(eq. 2.12)}$$

Le matériau peut donc être considéré, comme un diélectrique ayant une permittivité effective complexe (eq.2.10) avec la conductivité du matériau qui est prise en compte par la partie imaginaire de la permittivité, ou comme un conducteur de conductivité effective complexe (eq. 2.11) dont la partie imaginaire traduit le comportement diélectrique du matériau. (Hamrouche 2011)

La conductivité effective complexe (eq. 2.11) est utilisée pour la description des milieux conducteurs. Tandis que la permittivité effective complexe (eq.2.10) est utilisée lorsque le milieu est un diélectrique à faibles pertes.

Étant donné que les matériaux utilisés en génie civil sont des diélectriques à faibles pertes, nous considèrerons dans ce qui suit la relation de la permittivité effective complexe (eq.2.10).

Généralement la permittivité des matériaux est rapportée à celle du vide ($\varepsilon_0 = 8{,}854.10^{-12}\ F/m$) ce qui permet de définir une permittivité relative notée (ε_r).

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_0} = \frac{(\varepsilon_e' - i\varepsilon_e'')}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r' - i\varepsilon_r'' \qquad \text{(eq. 2.13)}$$

La partie réelle (ε_r') est généralement défini comme étant la constante diélectrique du matériau, et elle représente la capacité totale du matériau au stockage d'énergie électrique engendrée par différents effets de polarisation. Quant à la partie imaginaire (ε_r''), elle est appelée facteur de perte.

2.2.2 Perméabilité magnétique

La perméabilité magnétique d'un matériau traduit son aptitude à être magnétisé sous l'effet d'un champ magnétique externe. Pour un matériau quelconque, sa perméabilité magnétique (μ) est exprimée par le produit de la perméabilité du vide ($\mu_0 = 4\pi.10^{-7}\ Henry/métre$), prise comme référence, et de sa perméabilité relative (μ_r).

Le béton à une faible interaction avec le champ magnétique, il est donc classé parmi les matériaux non magnétiques et sa perméabilité magnétique est égale à celle du vide ($\mu = \mu_0 = 4\pi.10{-}7\ Henry/métre$ et sa perméabilité relative $\mu r{=}1$.

2.2.3 Phénomène de polarisation

Comme vu dans les paragraphes précédents, la permittivité du milieu est fonction de sa polarisation diélectrique, il est donc important de comprendre les mécanismes de polarisation lors de l'application d'un champ électrique externe, afin de mieux appréhender les variations des propriétés électromagnétiques du matériau engendrées lors des mesures au radar.

La polarisation diélectrique est un phénomène physique produit dans un matériau diélectrique lorsqu'il est soumis à un champ électrique E. Ce phénomène correspond au déplacement des charges positives et négatives conduisant à un stockage d'énergie dans le matériau. Il existe quatre types de polarisation correspondant à différentes fréquences d'excitation (Figure 2.1).

- La polarisation électronique : elle se produit dans les atomes. Sous l'action d'un champ E le nuage d'électrons se déplace par rapport au noyau positif. La polarisation se produit rapidement durant un bref moment (de l'ordre de 10^{-15} s). Ce type de polarisation est surtout présent dans la gamme des ultra-violets entre 10^{14} et 10^{16} Hz.
- La polarisation ionique : elle se produit avec les anions et les cations. Elle correspond aux déplacements des anions et cations en solution. Le temps requis pour ce déplacement est de l'ordre de 10^{-12} à 10^{-13} s, pour une fréquence dans la gamme des infrarouges.

  Les polarisations électronique et ionique ont beaucoup de choses en commun. Dans les deux cas, il s'agit de déplacement de charges (et non pas de rotation) dans la direction du champ électrique.
- La polarisation dipolaire, communément appelée polarisation d'orientation : elle est spécifique aux diélectriques polaires, les dipôles s'orientent suivant la direction du champ électrique appliqué. En l'absence de champ, les dipôles sont orientés aléatoirement, de telle façon que la polarisation globale est pratiquement nulle. La polarisation d'orientation est influencée par l'agitation thermique des molécules, la température a donc un effet sur ce type de polarisation. Ce mécanisme de polarisation se produit dans la gamme de fréquences entre 10^{8} - 10^{11} Hz qui comprend les fréquences radar.

  La polarisation d'orientation peut exister seulement dans les gaz, les liquides et les matières amorphes visqueuses. Dans les matières solides, les dipôles sont « figés » et ne peuvent être orientés.

- La polarisation interfaciale ou effet Maxwell-Wagner : Elle résulte des déplacements de charges dans l'ensemble du matériau. Elle est due à l'accumulation des charges aux interfaces entre deux milieux homogènes et elle a lieu à basse fréquence, en dessous de 10^6 Hz. Les fréquences de relaxation de ce mécanisme s'étendent sur une large gamme de fréquences parce qu'il existe beaucoup de porteurs de charges ayant les tailles différentes, chaque type de charge ayant sa propre fréquence de relaxation.

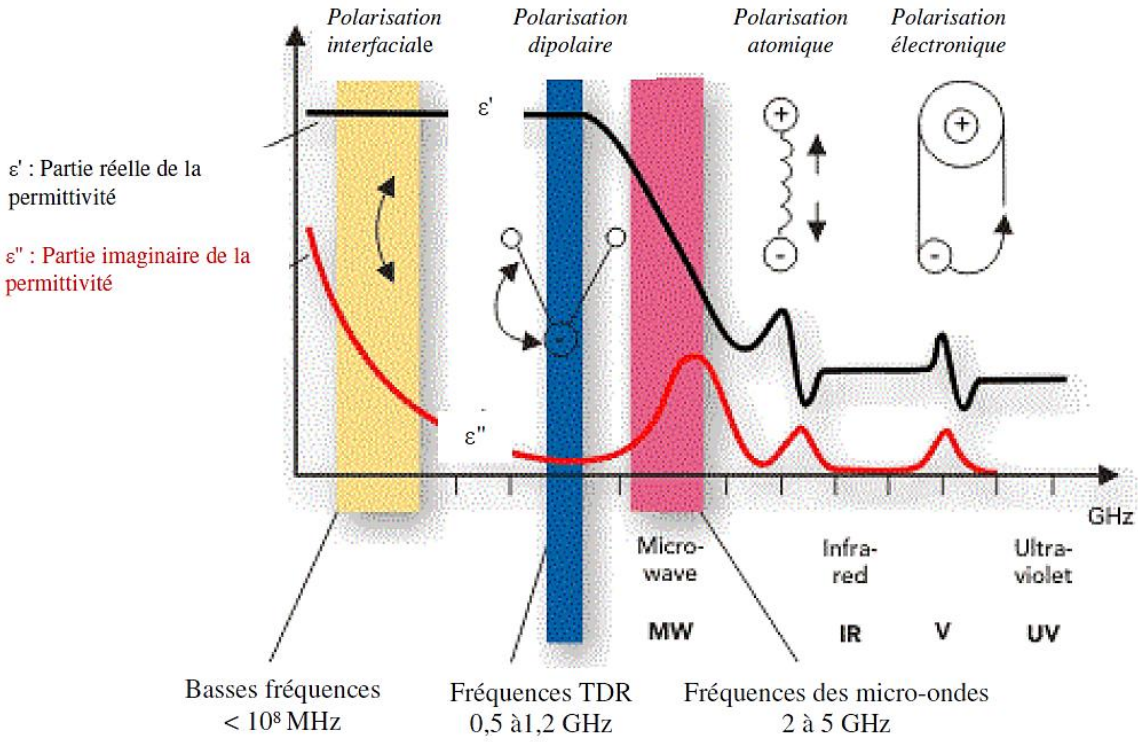


Figure 2.1: Types de polarisation diélectrique (Sbartaï 2005)

La Figure 2.1 représente la variation des parties réelle et imaginaire de la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence. Les diélectriques contiennent différents porteurs de charges qui peuvent être déplacés par un champ électrique, comme les ions et les électrons.

Dans la gamme de fréquence du radar, on observe deux mécanismes principaux de polarisation : polarisation d'orientation ou dipolaire, liée au dipôle permanent que constitue la molécule d'eau interstitielle du béton, et la polarisation interfaciale qui est liée au degré de saturation en eau du béton et à la concentration ionique de la solution interstitielle.

L'effet de la teneur en eau sur la permittivité effective du béton est clairement observable aux fréquences du radar. L'augmentation de la teneur en eau dans le béton fait augmenter son

aptitude à la polarisation, et par conséquent, fait augmenter la constante diélectrique ε_r'. Mais cette augmentation s'accompagne également de l'accroissement des mécanismes de relaxation diélectrique et de conduction ionique qui se traduit par une hausse du facteur de perte ε_r''.

2.2.4 Relaxation diélectrique

Lors de l'application d'un champ électromagnétique sur un matériau, les dipôles s'alignent suivant la direction du champ électrique, lorsque celui-ci est brusquement supprimé le matériau a besoin d'un temps dit de relaxation, noté (τ), afin de revenir à son état initial.

À basse fréquence, le mouvement imposé aux molécules polarisées est lent et celles-ci ont le temps de se synchroniser avec le champ électrique. Cependant, lorsque la fréquence d'excitation augmente jusqu'à une fréquence critique, les pertes diélectriques passent par un maximum. Cette fréquence critique appelée fréquence de résonance ou fréquence de relaxation est égale à $(2\pi/\tau)$. Dans une plage située autour de la fréquence de résonance, il existe un déphasage entre le champ et les dipôles. Cette plage est dite plage de relaxation et le déphasage appelé angle de polarité (δ). C'est dans cette plage de fréquence que le matériau consomme l'énergie du champ électrique et la dissipe en chaleur.

En général, la fréquence de relaxation dépend de l'état physique du matériau et de la présence d'autres matériaux. Plus la matière est condensée, structurée ou liée, plus la fréquence de relaxation est basse.

2.3 ATTÉNUATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Différents phénomènes réduisent l'amplitude de l'onde radar lors de sa propagation.

- Atténuation géométrique : elle résulte de la divergence du front d'onde modifié en fonction du couplage de l'antenne avec le matériau ausculté ;
- Atténuation par absorption : elle est essentiellement liée au facteur de perte (ε'') et elle augmente avec la fréquence de l'onde;
- Atténuation par multidiffusion : elle est causée par la présence d'inclusions de dimensions comparables à la longueur d'onde qui peuvent diffracter l'énergie dans toutes les directions, engendrant ainsi des pertes par diffusion.

Une onde électromagnétique peut toujours être reconstituée en superposant plusieurs ondes planes progressives monochromatiques (OPPM) de différentes fréquences (considérée comme solution des équations de Maxwell), et lors d'une propagation suivant l'axe *x* l'OPPM est telle que :

$$\underline{\vec{E}}(x,t) = \underline{\vec{E}}_0 e^{i\omega t} e^{-\gamma x} \quad \Leftrightarrow \quad \underline{\vec{E}}(x,t) = \underline{\vec{E}}_0 e^{-\alpha x} e^{i(\omega t - \beta x)} \qquad \text{(eq. 2.14)}$$

$i^2=-1$;

ω : pulsation de l'onde $(\omega = 2\pi f)$;

γ : constante de propagation complexe ;

α : coefficient d'atténuation ;

β : constante de propagation.

Dans l'équation précédente $e^{-\alpha x}$ représente le terme d'atténuation par absorption (Figure 2.2) et $e^{i(\omega t-\beta x)}$ le terme de propagation.

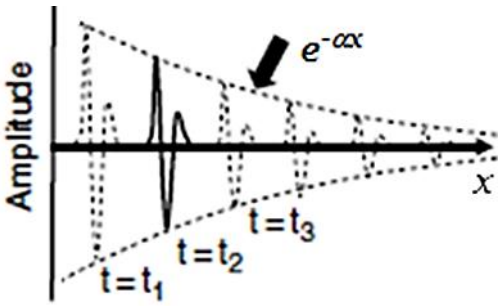


Figure 2.2: Représentation graphique du terme d'atténuation par absorption d'une onde électromagnétique (Annan 2009)

Dans un milieu à faible perte (milieu faiblement conducteur) où $\varepsilon_r''/\varepsilon_r' \ll 1$ comme le béton on peut écrire:

$$\alpha = \frac{\omega \varepsilon_r''}{2c}\sqrt{\frac{1}{\varepsilon_r'}} \quad \Leftrightarrow \alpha = \frac{\sigma_e'}{2}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_e'}} \qquad \text{(eq. 2.15)}$$

Où $(\mu_0 = 4\pi.10^{-7}\ Henry/métre)$ est la perméabilité magnétique du vide et $(c = 1\mu 0\varepsilon 0 \approx 3.108\ m/s$ la vitesse de propagation des OEM dans le vide.

Selon la relation précédente, dans le cas de l'approximation d'onde plane, le facteur de perte définit l'atténuation α des ondes EM.

La profondeur auscultée varie de quelques cm à plusieurs mètres et elle dépend de trois facteurs **(**Cariou et al. 1997).:

- la conductivité *(σ)* du matériau, qui est la principale cause de l'absorption de l'onde électromagnétique;
- la fréquence *(f)* de l'onde électromagnétique utilisée, car plus la fréquence émise est basse, plus la profondeur d'investigation est importante ;
- la dynamique du radar: c'est le rapport entre la puissance du signal émis et la puissance du plus petit signal détecté.

Dans un milieu diélectrique, l'inverse du coefficient d'atténuation α donne la profondeur de pénétration P_P qui s'écrit:

$$P_P = \frac{1}{\alpha} = \frac{2}{\sigma'_e}\sqrt{\frac{\varepsilon'_e}{\mu_0}} \qquad \text{(eq. 2.16)}$$

2.4 VITESSE DE PROPAGATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

La vitesse de propagation (v) d'une onde correspond à la vitesse de propagation du signal.

La vitesse d'une onde plane progressive monochromatique (OPPM), notée (v), est la vitesse à laquelle la phase de l'onde se propage dans l'espace, notée (v_φ). Cette vitesse est exprimée :

$$v = v_\varphi = \frac{\omega}{\beta} \qquad \text{(eq. 2.17)}$$

Dans le cas du béton qui est un diélectrique non magnétique $(\mu = \mu_0 \ puisque \ \mu_r = 1)$ de faible conductivité, nous pouvons écrire que :

$$\beta \approx \omega\sqrt{\mu_0 \varepsilon'_e} \quad ou \quad \beta \approx \omega\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon'_r} \qquad \text{(eq. 2.18)}$$

$$v = v_\varphi \approx \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'_r}} \qquad \text{(eq. 2.19)}$$

Cette relation montre que dans le cas d'un diélectrique à faibles pertes comme le béton, la vitesse de propagation d'OPPM dépend principalement de la constante diélectrique du milieu.

2.5 RÉFLEXION ET TRANSMISSION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES (ANNAN 2009)

La méthode radar dépend de la détection des signaux réfléchis ou dispersés. Les coefficients de réflexion (et de transmission) de Fresnel quantifient la façon dont les amplitudes des champs électromagnétiques varient selon une interface entre deux matériaux.

Les antennes que nous utilisons dans nos mesures sont couplées au matériau. Dans ces mesures nous mesurons le champ électrique polarisé perpendiculairement au plan d'incidence. Une partie de l'énergie du signal incident est réfléchie, tandis que l'énergie restante se propage dans le matériau jusqu'à ce qu'elle soit réfléchie par une autre interface, sinon jusqu'à ce qu'elle soit totalement atténuée. La Figure 2.3 représente la réflexion et la transmission d'une onde plane entre deux milieux ayant des propriétés électromagnétiques différentes.

L'énergie réfléchie est traduite par un coefficient dit de réflexion de l'interface. Par contre la partie d'énergie réfractée ou transmise est traduite par le coefficient de transmission.

Dans le cas d'une onde plane qui se propage dans deux milieux sans pertes, les coefficients de réflexion *(R_{TE})* et de transmission *(T_{TE})* s'écrivent respectivement:

$$R_{TE} = \frac{Y_1 \cos\theta_1 - Y_2 \cos\theta_2}{Y_1 \cos\theta_1 + Y_2 \cos\theta_2} \qquad \text{(eq. 2.20)}$$

$$T_{TE} = 1 + R_{TE} \qquad \text{(eq. 2.21)}$$

Avec (Y_i) qui représente l'admittance d'un milieu *i* défini comme l'inverse de l'impédance électromagnétique (*Zi*).

$$Y_i = \frac{1}{Z_i} = \sqrt{\frac{\varepsilon_i}{\mu_i}} = c\sqrt{\varepsilon_{ri}} \qquad \text{(eq. 2.22)}$$

ε_i : la permittivité diélectrique du milieu *i* ;

μ_i : la perméabilité électromagnétique du milieu *i* ;

c : la vitesse de propagation des ondes EM dans le vide ;

ε_{ri} : la permittivité relative du milieu *i*.

Dans le cas de milieux à faibles pertes le coefficient de réflexion s'écrit :

$$R_{TE} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r1}}\cos\theta_1 - \sqrt{\varepsilon_{r2}}\cos\theta_2}{\sqrt{\varepsilon_{r1}}\cos\theta_1 + \sqrt{\varepsilon_{r2}}\cos\theta_2} \qquad \text{(eq. 2.23)}$$

Lorsque l'onde EM est incidente verticalement sur l'interface $(\theta_1 = \theta_2 = 0)$, comme en génie civil dans le cas de l'auscultation au radar avec une antenne couplée à l'air, le coefficient de réflexion peut être simplifié et devient:

$$R_{TE,\perp} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\varepsilon_{r2}}} \qquad \text{(eq. 2.24)}$$

Par contre, dans le cas des mesures radar avec une antenne couplée au matériau, la simplification du coefficient de réflexion engendre des erreurs, car l'angle d'incidence n'est pas nul et sa valeur dépend de la profondeur du réflecteur.

Les écritures précédentes du coefficient de réflexion sur une interface montrent que celui-ci dépend de la constante diélectrique des deux milieux. La réflexion est de plus en plus élevée que le contraste diélectrique entre les deux milieux est important, et de ce fait la détection de l'interface est plus facile. (Sbartaï 2005)

Le coefficient de réflexion peut être négatif si le milieu 2 a une permittivité relative plus élevée que le milieu 1 $(\varepsilon_{r1} < \varepsilon_{r2})$, comme c'est le cas pour les armatures métalliques dans le béton dont la permittivité diélectrique est proche de l'infini. Dans le cas d'une interface air / béton, le coefficient de réflexion est d'environ 50%, ce qui signifie que les ondes radar sont capables de pénétrer au-delà de ces interfaces et de détecter des caractéristiques plus profondes dans le matériau. (Van Der Wielen 2014)

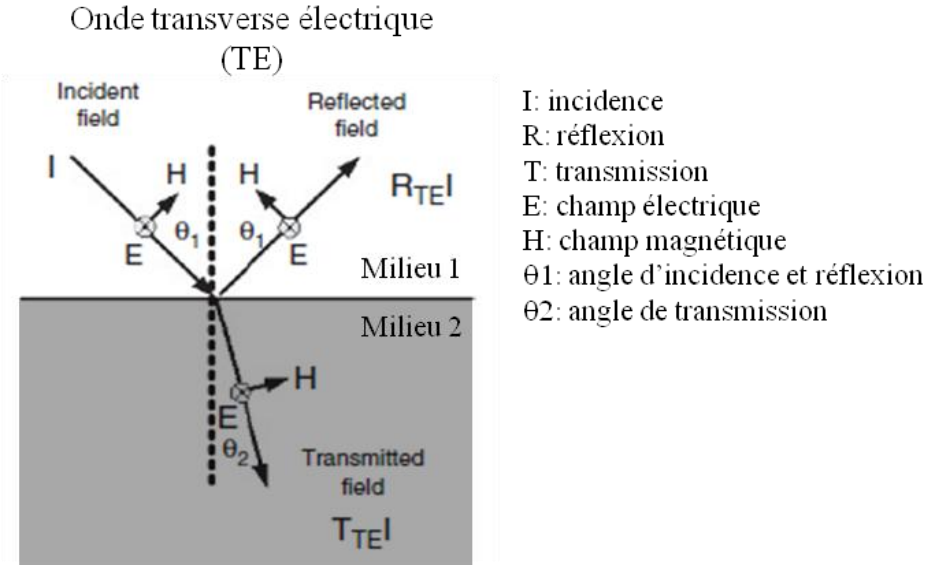


Figure 2.3: Représentation d'une onde EM transverse électrique incidente, réfléchie et transmise au niveau de l'interface de deux milieux diélectriques (Annan 2009)

2.6 RAYONNEMENT D'ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES PAR UNE ANTENNE RADAR COUPLÉE AU MATÉRIAU

Nous allons nous intéresser dans cette partie à l'émission de rayonnements électromagnétiques par les antennes radar.

De nombreuses antennes reposent sur le principe du rayonnement dipolaire. Celles utilisées dans notre étude sont de type dipolaire couplées au matériau, autrement dit au contact du matériau. La partie émettrice et réceptrice possèdent chacune un dipôle large de type papillon.

2.6.1 Rayonnement et orientation d'antennes radar

Nous utilisons pour nos mesures des antennes dipolaires. Chaque antenne est composée de deux dipôles de type papillon (Figure 2.4), un représente l'émetteur et l'autre le récepteur. Ces dipôles larges ont un diagramme de rayonnement semblable à celui d'un dipôle (Figure 2.5.a et b). Ce diagramme de rayonnement en espace libre (Figure 2.5.b) correspond à un cercle parfait dans le mode transverse électrique (TE). (Annan 2003, Millard et al. 2002)

Figure 2.4: Antenne dipolaire ouverte utilisée pour les mesures : Position des dipôles dans la boite de blindage

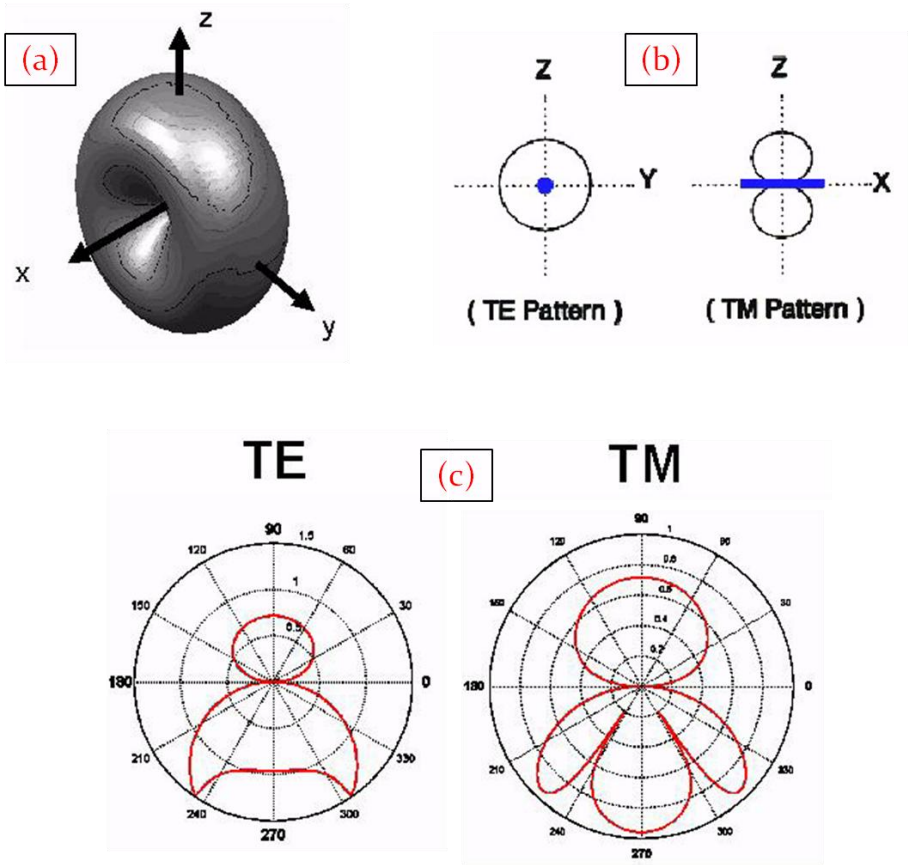


Figure 2.5: Représentation 3D et sections verticales (TE) et (TM) du diagramme de rayonnement d'un dipôle court en espace libre, respectivement en (a) et (b), Exemple du mode (TE) et (TM) du diagramme de rayonnement d'un dipôle dans un matériau (sol) typique (c) (Annan 2003)

Les positions usuelles des antennes radar sont parallèles et orientées perpendiculairement à la direction d'investigation. L'acquisition est en mode électrique transversal (TE) (Figure 2.6), ce

qui signifie que le champ électrique est polarisé perpendiculairement au plan de propagation (Bradford et Deeds 2006). C'est toujours le cas lorsqu'on utilise une seule antenne blindée, car les antennes du récepteur et de l'émetteur sont parallèles dans le boitier.

Dans la configuration opposée, le mode magnétique transversal (TM) (Figure 2.6), c'est le champ magnétique qui est polarisé perpendiculairement au plan de propagation. Cette configuration est moins utilisée, car il y a moins d'énergie rayonnée, mais il peut être utile dans certaines configurations d'utiliser les deux modes afin de maximiser les informations mesurées à partir de la surface (Bradford et Deeds 2006).

Certaines propriétés, comme le diagramme de rayonnement de l'antenne ou le coefficient de réflexion, dépendent fortement du mode considéré (Bradford et Deeds 2006).

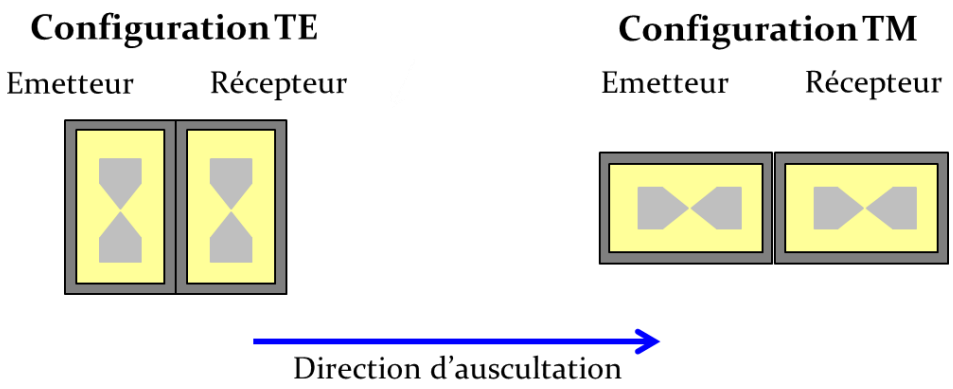


Figure 2.6:Configuration TE et TM d'une antenne bistatique

2.6.2 Couplage antenne – milieu diélectrique

Il est indispensable de s'intéresser à l'interaction entre l'antenne et le matériau ausculté, puisque celle-ci influence les caractéristiques de rayonnement de l'antenne concernant la répartition spatiale et temporelle.

L'espace autour d'un élément rayonnant est habituellement divisé en trois zones :

- La zone de champ proche (nommée aussi zone de Rayleigh), cette zone s'étend de l'élément rayonnant à une distance $r < D^2/2\lambda$, avec r qui représente la distance jusqu'à l'antenne, D le diamètre de la surface équivalente de l'antenne et λ la longueur d'onde. Dans cette zone il y a échange d'énergie réactive entre l'antenne et le milieu

extérieur sans qu'il y ait propagation d'ondes. La densité de puissance est quasi constante.

- La zone de Fresnel où la densité de puissance rayonnée est variable pour une distance r telle que $D^2/2\lambda < r < 2\,D^2/\lambda$. Dans cette zone il est supposé qu'il y a propagation.
- La zone de champ lointain est définie pour $r > 2D^2/\lambda$. Dans cette zone on parle de propagation d'onde, et l'amplitude du champ décroît en $1/r$.

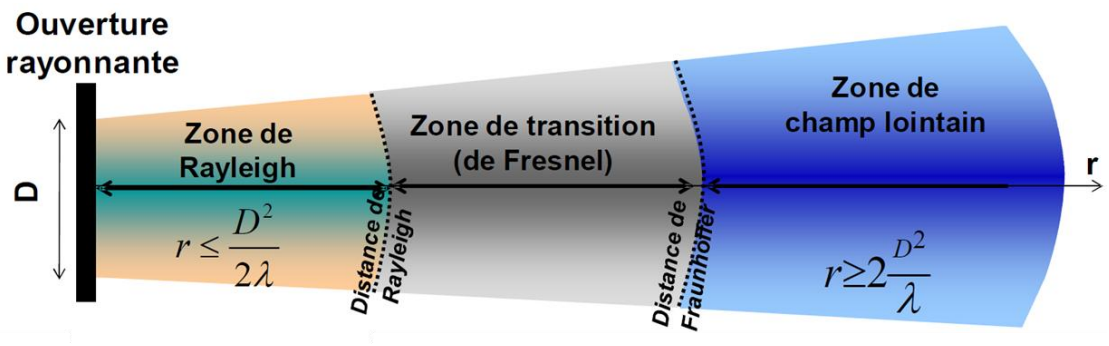


Figure 2.7: Les différentes zones de rayonnement d'une antenne

Plusieurs études ont été menées pour simuler le rayonnement d'antenne dipolaire en espace libre, mais aussi dans un matériau homogène (Millard et al. 2002, Klysz 2004) et dans un matériau hétérogène à pertes (Warren et Giannopoulos 2017).

(Millard et al. 2002) montrent dans leurs travaux l'effet de la constante diélectrique d'un milieu homogène et semi-infini sur le diagramme de rayonnement d'une antenne à dipôle court dans le plan du champ magnétique (Figure 2.8).

La Figure 2.8 montre qu'il y a un changement important du diagramme de rayonnement d'une antenne de type dipôle court dans l'air ($\varepsilon_r' = 1$) comparé à la situation où il est au contact de milieux diélectriques ($\varepsilon_r' = 4\ et\ \varepsilon_r' = 12$). Dans le cas où le dipôle est en contact avec un matériau, la majeure partie de l'énergie du rayonnement électromagnétique est transmise dans le milieu diélectrique. En plus, l'énergie de rayonnement EM se focalise vers le matériau lorsque la constante diélectrique du milieu augmente, ce qui est appelé resserrement des lobes de rayonnement.

Le resserrement des lobes de rayonnement est montré par Klysz en simulant, par différences finies (FDTD), le rayonnement d'un dipôle placé sur des milieux de différentes constantes diélectriques, respectivement égales à 9 et 80. (Klysz 2004)

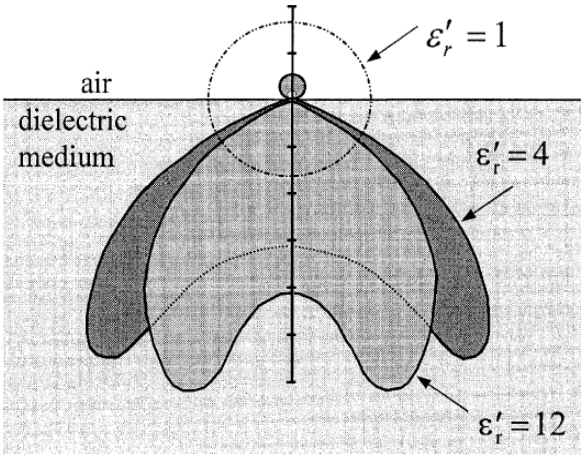


Figure 2.8: Diagramme de rayonnement dans le plan H d'un dipôle court placé sur un milieu diélectrique de constante diélectrique égale à 4 et 12 (correspondants respectivement à un béton saturé et saturé) (Millard et al. 2002)

2.7 APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE RADAR

Dans les paragraphes précédents, nous avons rappelé les points principaux de la propagation des ondes électromagnétiques dans le béton, le rayonnement des antennes qui génèrent ces ondes, mais aussi le comportement de celles-ci lorsqu'elles sont en contact ou à proximité de milieux diélectriques.

Nous allons nous intéresser dans ce qui suit au principe de l'auscultation radar ainsi qu'à son application pour la détection d'armatures dans le béton.

2.7.1 Principe de l'auscultation radar en génie civil

Le principe de l'auscultation radar en génie civil a été décrit par de nombreux auteurs (Clemeña 2004, Bungey 2004, Shaw et al. 2005). Dans cette partie, nous ferons une simple description du principe de l'auscultation de structures en béton armé, dans le cas de l'utilisation d'un radar impulsionnel avec antennes couplées au matériau, car c'est le type de matériel que nous avons utilisé dans ce travail.

Un système radar, comme nous l'avons décrit précédemment (paragraphe 1.3.2.2), est composé d'une unité d'acquisition et d'antennes émettrice et réceptrice. Le principe de mesure d'un système radar consiste à émettre des impulsions électromagnétiques de courte durée qui se propagent dans le milieu, et à enregistrer les signaux directs (parvenant directement de l'émetteur au récepteur), en plus des réflexions dues à la présence d'interfaces présentant un contraste diélectrique. La gamme de fréquences utilisée par les systèmes radar s'étend d'environ 100 MHz à 3 GHz.

L'auscultation au radar consiste à réaliser des profils radar sur la structure, ce que nous détaillerons dans paragraphe 2.7.2. Le radar émet, via l'antenne émettrice, une impulsion EM qui se propage dans le milieu en s'atténuant. Les interfaces qui présentent un contraste de propriétés EM réfléchissent une partie de l'énergie émise par la source. Ces réflexions sont enregistrées par l'antenne réceptrice pendant un intervalle de temps, et constituent un radargramme représentant l'amplitude du signal reçu en fonction du temps. Les interfaces susceptibles de présenter des contrastes de propriétés EM suffisamment forts pour être détectés par le radar dans une structure en béton armé sont habituellement air/béton, béton/acier, béton/air voire béton/sol lorsque la partie de la structure auscultée est en contact avec le sol.

La Figure 2.9 représente un exemple de signal temporel qu'on peut obtenir pour une dalle en béton armé possédant un lit d'armature lors d'une auscultation au radar avec des antennes couplées et en mode bistatique.

Le signal incident se propage dans toutes les directions de l'interface air/béton en dessous de l'antenne émettrice. Une partie du signal incident est directement transmise de l'émetteur au récepteur, c'est le signal S_1 qui représente l'onde directe émetteur-récepteur. Une partie du signal émis va se réfléchir sur les armatures constituant le signal S_2. Une partie de l'onde incidente est totalement réfléchie par les conducteurs parfaits comme les armatures, ce qui explique la capacité des radars à détecter les objets métalliques. Enfin le signal est partiellement réfléchi par l'interface béton/air, il est alors divisé en une onde réfléchie S_3 qui va être rétrodiffusée vers le récepteur et en une onde qui sera réfractée S_4.

L'analyse du temps de parcours de ces signaux permet d'estimer l'épaisseur de la dalle ainsi que la profondeur des armatures, mais pour cela une approximation de la constante diélectrique du béton pour estimer la vitesse de propagation est nécessaire.

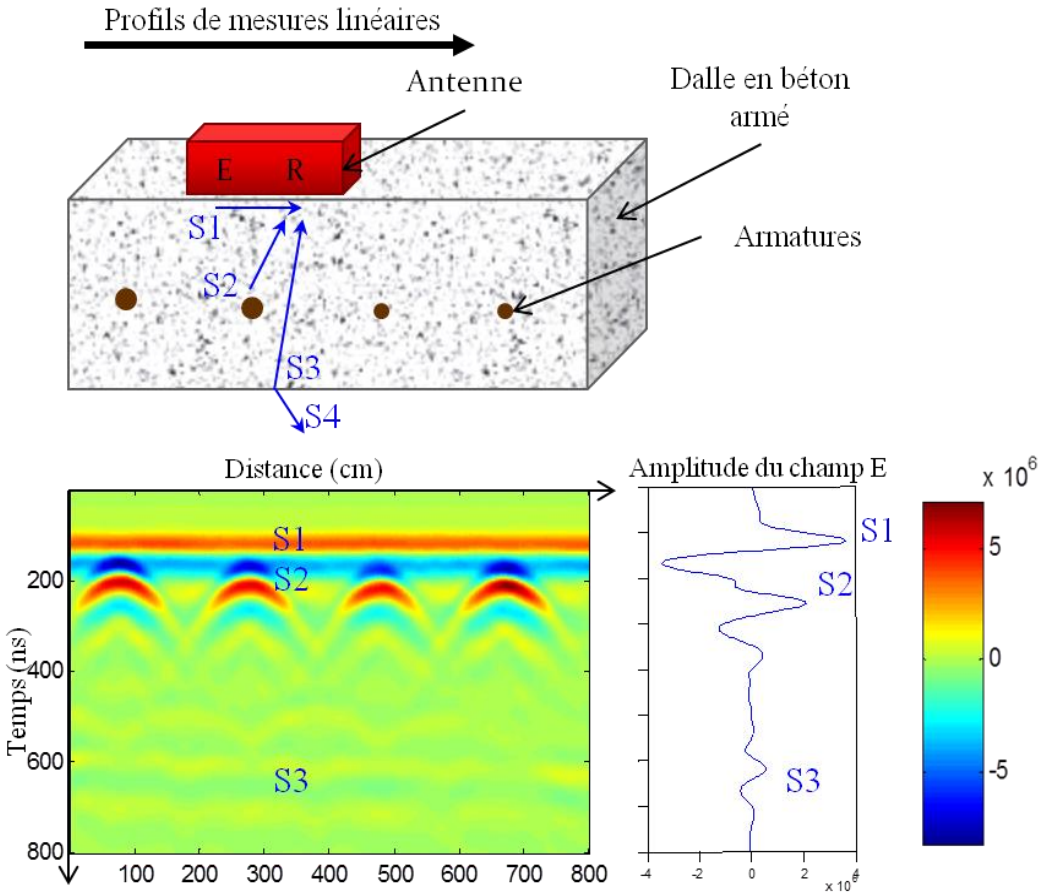


Figure 2.9: Exemple d'une coupe-temps obtenue pour un profil effectué sur une dalle en béton contenant quatre armatures

2.7.2 Exemple de profils radar : radargrammes

L'acquisition de profils radar consiste à effectuer des mesures sur un matériau, et à enregistrer des signaux avec un pas prédéfini par l'opérateur. Ces signaux enregistrés représentent l'amplitude des ondes réfléchies par les différentes interfaces présentant des contrastes de propriétés diélectriques en fonction du temps. Les signaux radar sont généralement enregistrés sous forme de données à une, deux voire trois dimensions, communément appelées dans le domaine du contrôle non destructif, respectivement, A-scan, B-scan et C-scan.

- A-scan : celui-ci correspond à une seule forme d'onde enregistrée par l'antenne réceptrice du radar à une position émetteur-récepteur donnée (Figure 2.10). La

variable temps est liée à la profondeur par la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le milieu.

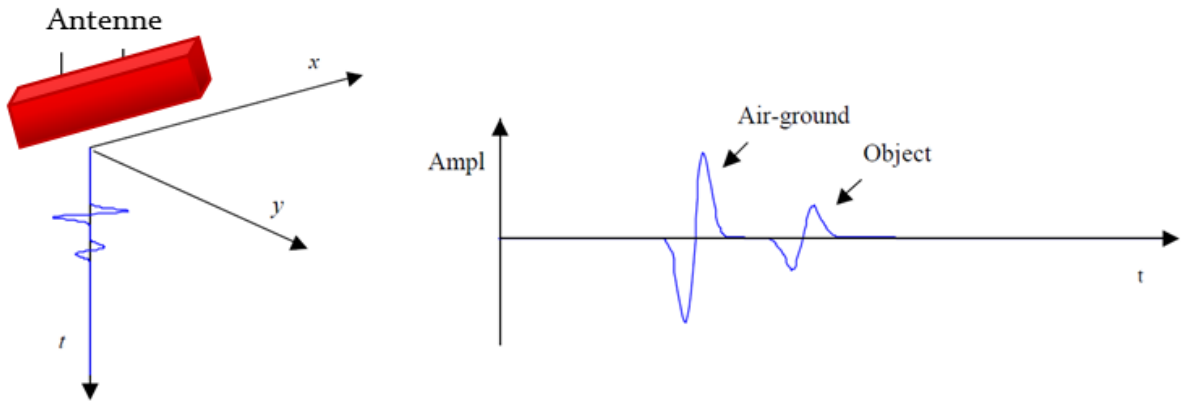


Figure 2.10: Exemple de A-scan

- B-scan : lorsqu'on déplace les antennes radar sur le matériau le long d'une ligne, on obtient une série de A-scans à des cordonnées x ou y connues qui forment un ensemble de données bidimensionnelles (Figure 2.11.a). La juxtaposition des A-Scans forme un B-scan, appelé aussi radargramme ou aussi coupe-temps.

  Lorsqu'on représente l'amplitude du signal reçu avec une échelle de couleurs ou de gris, on obtient une image en 2D représentant une coupe verticale du milieu ausculté (Figure 2.11.b). L'axe temporel (ou l'axe de profondeur) associé est généralement dirigé vers le bas.

  La Figure 2.11 représente un radargramme obtenu suite à des mesures effectuées sur une dalle en béton armé. La présence d'un point réflecteur (acier d'armature) est caractérisée par une signature hyperbolique. Cette signature caractéristique d'un point réflecteur est due au rayonnement multidirectionnel des antennes radar, ce qui permet à l'antenne réceptrice de percevoir les ondes réfléchies par l'armature avant d'être à l'aplomb de celui-ci (Che Way Chang et al. 2009).

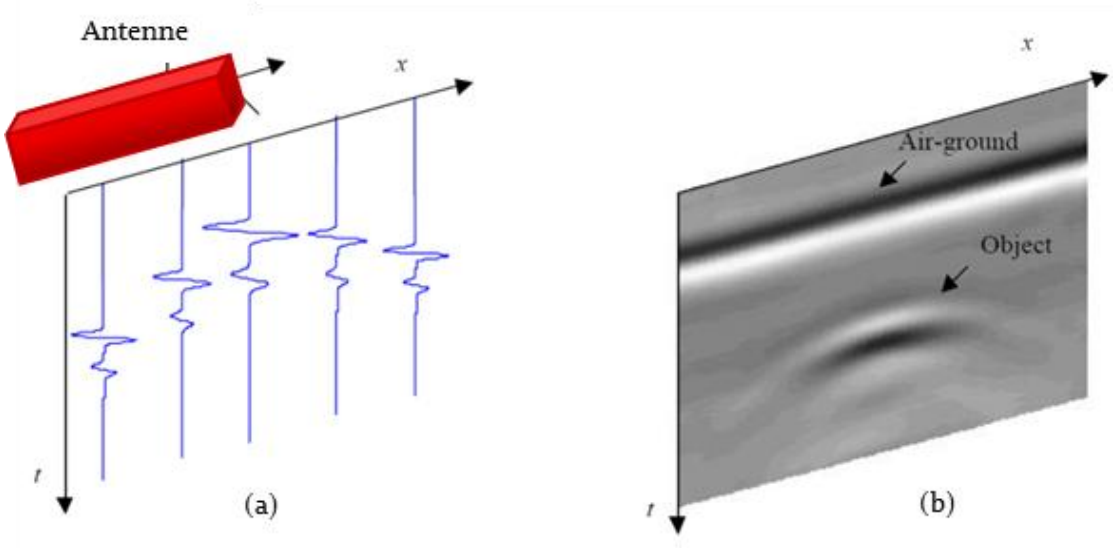


Figure 2.11: Exemple d'une juxtaposition des A-scan (a) formant un radargramme en niveau de gris (B-scan) (b)

- C-scan : Lorsqu'on effectue une série de B-scans parallèles, autrement dit, lorsque les antennes sont déplacées sur une grille (régulière) dans le plan xy, un ensemble de données tridimensionnelles peut être enregistré. La juxtaposition de ces B-scans permet de reconstituer une image en 3D qui est appelée C-scan (Figure 2.12).

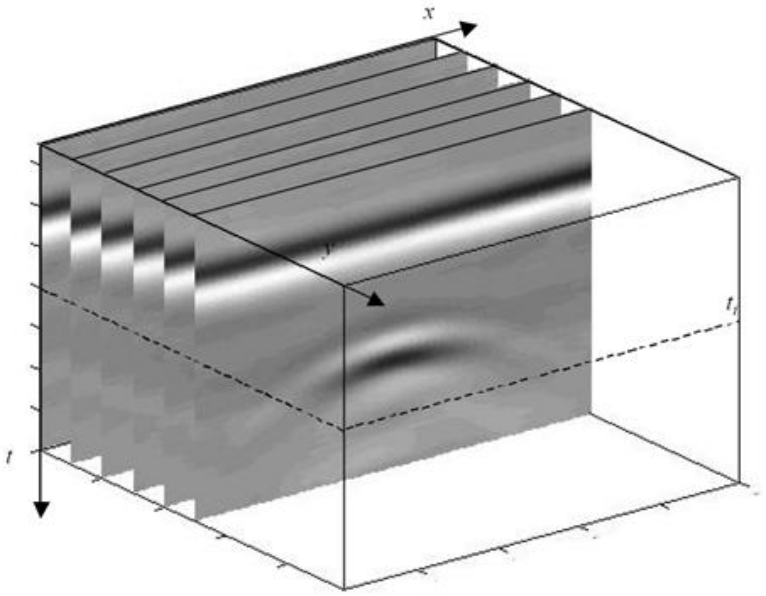


Figure 2.12 : Multiples B-scan parallèles formant un C-scan

2.7.3 Application de la technique radar pour la détection des armatures dans le béton armé

Comme nous l'avons vu précédemment, le principe de fonctionnement du radar est basé sur l'émission d'ondes EM qui se propagent dans le milieu ausculté, et l'enregistrement des ondes réfléchies par les interfaces ayant des différences de propriétés électromagnétiques. L'acquisition de données radar s'effectue simplement et rapidement, cela fait de cette technique un outil puissant et pertinent pour la localisation d'objets enfouis, mais aussi la détermination des épaisseurs d'éléments de structures de génie civil.

Dans les paragraphes qui suivent, nous nous intéresserons à l'une de ses applications les plus usuelles qui est la localisation des armatures dans le béton. Dans ce contexte, de nombreuses études ont été menées par des chercheurs (Bungey et al. 1994, Utsi et Utsi 2004, Shaw et al. 2005, Soldovieri et al. 2006, Hugenschmidt et al. 2010).

(Utsi et Utsi 2004) ont présenté des résultats de simulation pour deux fréquences centrales de GPR, appliquées à une gamme de diamètres d'armature (5, 6, 9, 16 et 28 mm) qui se trouvent à différentes profondeurs (3, 5, 10 et 15 cm). Les auteurs ont noté que les amplitudes des signaux de l'acier sont proportionnelles au diamètre et à la fréquence, mais aussi inversement proportionnelles à la profondeur. Un écart de 20% sur le diamètre et la profondeur des armatures entre valeurs déduites de la mesure et valeurs réelles a été trouvé.

(Shaw et al. 2005) ont utilisé des réseaux de neurones artificiels (RNA) pour automatiser et faciliter le post-traitement des résultats radar. Les données radar sont réduites à un ensemble simplifié de données. Les réflexions de signaux à partir des armatures présentant une forme hyperbolique sont détectées à l'aide d'un RNA de perceptrons multicouches (PMC) avec une seule couche cachée contenant 8 neurones pour reconnaître une forme hyperbolique simplifiée.

Les résultats ont montré que l'utilisation d'une approche RNA-PMC pourrait être très efficace dans l'automatisation de la localisation des barres d'armatures en acier à partir d'une auscultation radar. En ce qui concerne l'évaluation de la profondeur d'une barre, celle-ci peut être améliorée par une meilleure connaissance des propriétés diélectriques in situ.

D'après (Shaw et al. 2005) l'approche réseau PMC donne des résultats prometteurs, mais nécessite un développement supplémentaire, en particulier un apprentissage évolutif des

RNA. Les résultats obtenus lors de l'estimation des profondeurs d'armatures situées à la profondeur moyenne de 52 mm, ont une précision moyenne évaluée à 23%.

Dans (Soldovieri et al. 2006), les auteurs exploitent un algorithme appelé « Inverse Scattering » linéaire dans le domaine fréquentiel basé sur l'approximation de Born, afin d'obtenir des résultats satisfaisants et fiables en termes de localisation et de dimensionnement d'objets métalliques enfouis.

Le résultat de cette étude est une image tomographique représentant l'emplacement des armatures (Figure 2.13). Par ailleurs, aucune indication sur la précision ou l'erreur en profondeur n'est mentionnée.

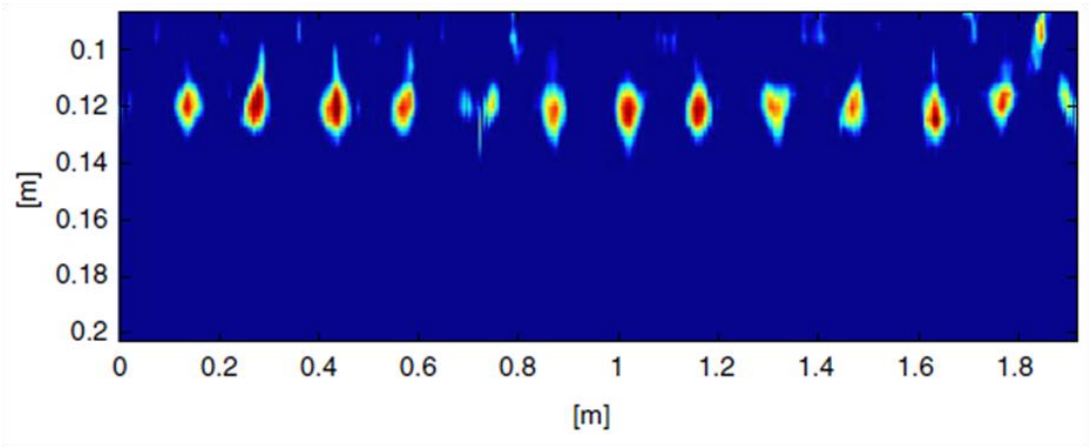


Figure 2.13:Image tomographique après traitement (Soldovieri et al. 2006)

(Hugenschmidt et al. 2010) ont réalisé un état de l'art des différentes approches pour localiser les armatures dans un mur de soutènement en béton, en utilisant des données radar obtenues avec deux antennes (0 et 1), dont le champ E est respectivement polarisé horizontalement et verticalement (Figure 2.14).

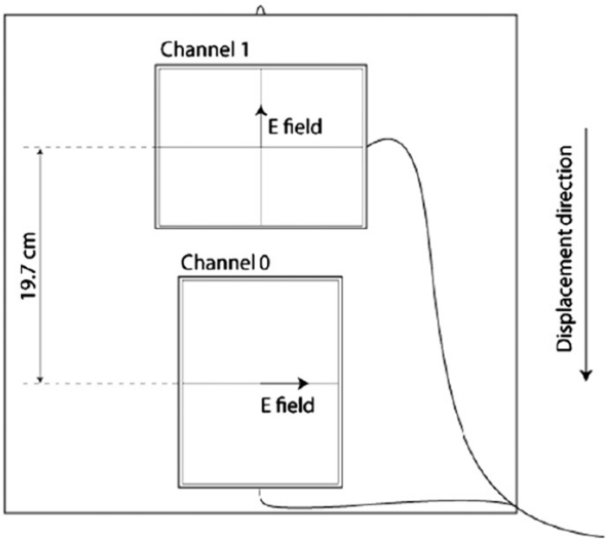


Figure 2.14: Orientation de l'antenne 0 (champ E horizontal) et de l'antenne 1 (champ E vertical) (Hugenschmidt et al. 2010)

Afin d'examiner les avantages et les limites des stratégies de traitement innovantes, Hugenschmidt et al. ont traité les données avec trois méthodes différentes: traitement 2D classique, traitement 3D suivi d'une fusion de données et enfin par « Inverse Scattering » suivie d'une fusion de données.

La première approche consistait à appliquer aux données radar (Figure 2.15.a) un traitement en 2D en utilisant le logiciel REFLEXW de *Sandmeier scientific software* (Figure 2.15.b), cette première étape est suivie par la construction d'un cube de données 3D pour obtenir une cartographie des armatures (Figure 2.16). Les paramètres appliqués dans le traitement sont :

- utilisation de filtre passe-bande dans le domaine fréquentiel ;
- choix du temps zéro qui correspond au temps d'arrivée de l'onde directe ;
- migration de Kirchhoff en supposant une permittivité diélectrique égale à 6,25 ;
- suppression du bruit de fond ;
- application de gain.

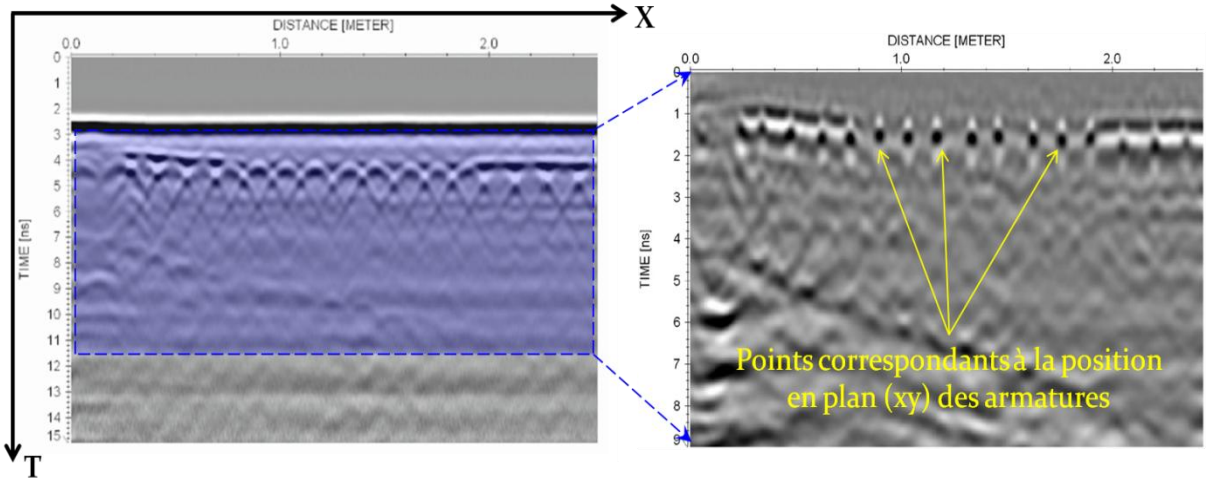


Figure 2.15:Données radar brutes (a), résultat de l'approche en 2D (b) (Hugenschmidt et al. 2010)

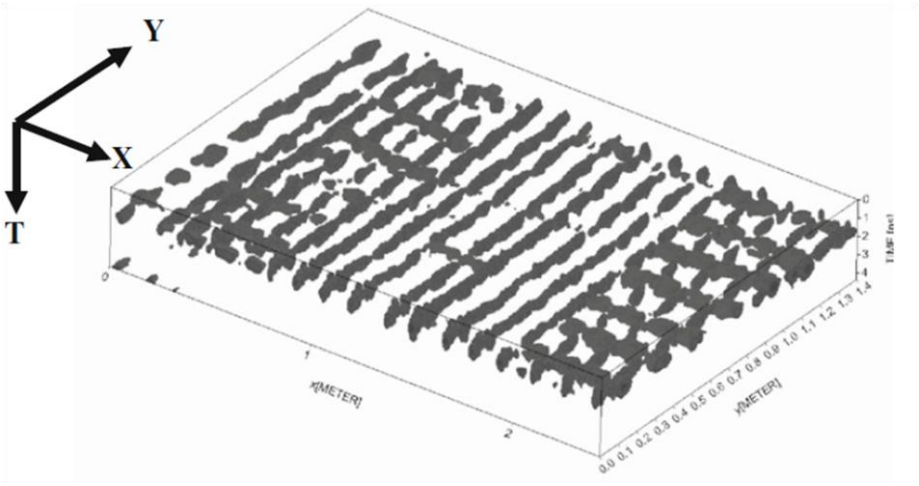


Figure 2.16:Résultat après la construction d'un cube de données 3D (0 – 4 ns) avec l'approche en 2D (Hugenschmidt et al. 2010)

La deuxième approche est un traitement en 3D suivi d'une fusion de données. Cette stratégie de traitement a été mise en œuvre en trois étapes. Dans un premier temps, le traitement en 2D a été appliqué à chaque ligne acquise dans la direction X des deux ensembles de données (Figure 2.17.a et Figure 2.17.b) obtenus par deux positions d'antennes : champ E horizontal et champ E vertical par rapport à la direction de l'auscultation (Figure 2.14). Puis les données ont été regroupées en deux ensembles de données 3D (un pour chaque antenne) pour appliquer la migration 3D. Enfin, les deux ensembles de données ont été fusionnés ligne par ligne.

Le traitement 2D a été appliqué ligne par ligne aux ensembles de données des deux antennes en utilisant le logiciel REFLEXW. Le traitement comporte:

- un recalage temporel ;
- l'application du filtre Dewow (soustraction moyenne) ;
- la suppression du bruit de fond ;
- une correction de gain ;
- la suppression dans le radargramme de la partie en dessous de la réflexion du fond du mur ;
- une déconvolution appliquée principalement pour augmenter la résolution;
- l'utilisation d'un filtre F-K.

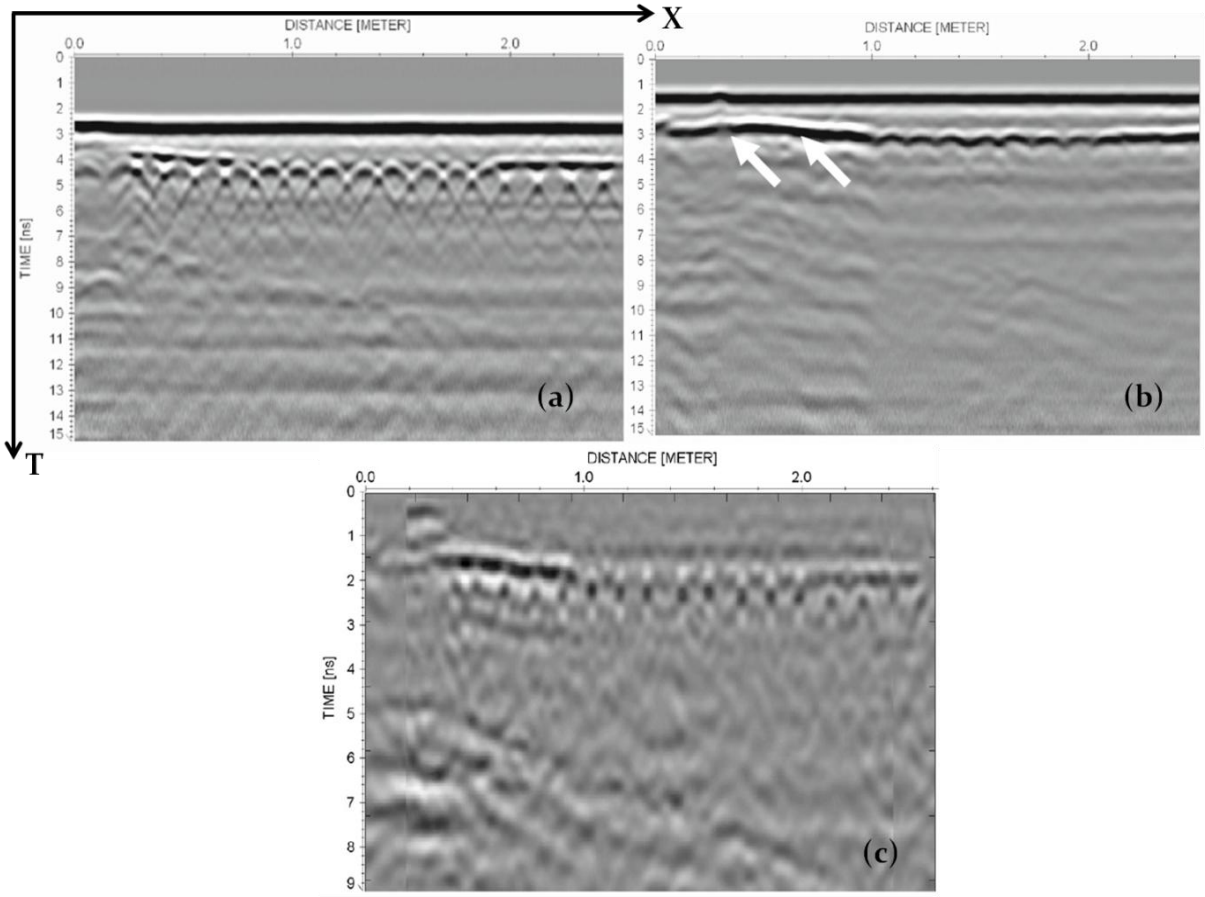


Figure 2.17: Données radar brutes respectivement lorsque le champ E est horizontal (a) et vertical (b), résultat de l'approche en 3D (c) (Hugenschmidt et al. 2010)

Le traitement 3D suivi de la fusion des données a permis d'obtenir une carte complète des armatures horizontales et verticales pour la couche supérieure de l'armature (Figure 2.18).

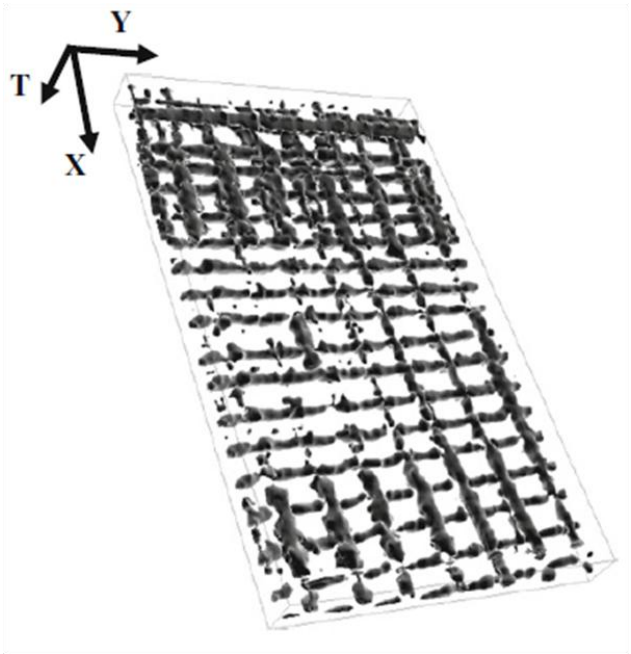


Figure 2.18: Résultat après traitement 3D et fusion de données, (0.5 - 3.5 ns) (Hugenschmidt et al. 2010)

Enfin la troisième approche est la méthode « Inverse Scattering » suivie d'une fusion de données.

Afin d'aborder le problème de la méthode « Inverse Scattering » 3D, une approche d'inversion basée sur une tranche 2D a été appliquée séparément aux deux données (Figure 2.17.a et b) acquises avec les deux antennes:

- Étape 0: Prétraitement.
- Étape 1: Reconstruction tomographique des ensembles de données 2D.

Après les étapes 0 et 1, les données ont été transférées de 2D à 3D.

- Étape 2: Superposition et interpolation des reconstructions tomographiques bidimensionnelles pour obtenir la représentation tridimensionnelle.
- Étape 3: La reconstruction 3D finale a été obtenue en fusionnant les deux résultats 3D des deux antennes par l'utilisation d'un algorithme.

Les données inversées et fusionnées correspondant aux données brutes de la Figure 2.17.a et b sont représentés dans la ci-dessous.

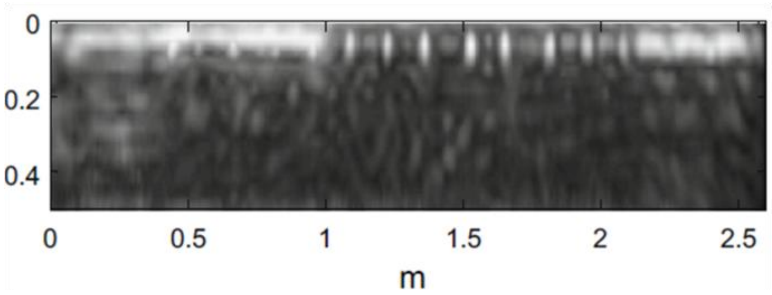


Figure 2.19 : Résultat de l'approche « Inverse Scattering »et fusion de données, champ E horizontal et vertical (Hugenschmidt et al. 2010)

L'approche par la méthode « Inverse Scattering » suivie de la fusion des données a permis d'obtenir le premier lit d'armatures, on retrouve dans cette cartographie (Figure 2.20) la totalité des armatures horizontales et verticales.

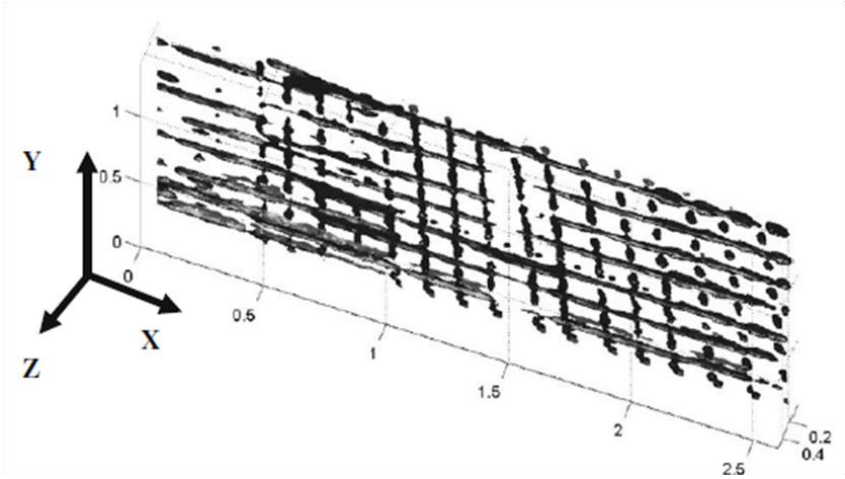


Figure 2.20: Résultat après traitement diffusion inverse et fusion de données, (0.0 - 0.5 m) (Hugenschmidt et al. 2010)

Les trois approches utilisées par (Hugenschmidt et al. 2010) donnent de bons résultats, mais elles restent limitées, car les valeurs de certains paramètres utilisées dans les étapes de traitement sont approximatives, de ce fait peuvent être source d'erreur lors de la détermination de la position des armatures, notamment en profondeur. Nous pouvons citer comme paramètres, le temps zéro choisi de façon arbitraire comme le temps d'arrivée de l'onde directe, et la valeur de la constante diélectrique du matériau prise égale à 6,25.

(Wiwatrojanagul et al. 2017) proposent une méthode basée sur la recherche des profondeurs des armatures dans des corps d'épreuves de béton armé et de sables comportant des aciers. La

méthode consiste à utiliser et à modifier des données radar basées sur des modèles existants de signature hyperbolique.

La vitesse de propagation des ondes électromagnétiques est calculée, par la distance parcourue par l'onde divisée par le temps de vol (relevé dans les données radar), où la distance parcourue est égale à deux fois l'épaisseur du corps d'épreuve. La profondeur des armatures est par la suite déterminée par le produit de la vitesse et du demi-temps de parcours de l'onde réfléchie par l'armature.

Les résultats d'interprétation obtenus par la méthode proposée ont été comparés à ceux obtenus par les deux méthodes existantes, à savoir la méthode conventionnelle et la méthode de signature hyperbolique existante utilisée en géophysique.

La méthode dite conventionnelle correspond à la méthode traditionnelle de l'utilisation de données radar pour le calcul des épaisseurs d'enrobage. Cette méthode nécessite de déterminer la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques sur des carottes prélevées sur ouvrage, afin d'estimer la profondeur des armatures.

La méthode de signature hyperbolique existante consiste quant à elle à étudier le modèle hyperbolique qui apparaît dans les données radar sous forme de Bscan. Cette méthode est fréquemment appliquée dans les relevés géologiques pour estimer la vitesse de propagation des ondes et le rayon des objets enterrés en utilisant les données radar. Cependant, cette méthode nécessite généralement l'extraction de coordonnées ponctuelles à partir du motif hyperbolique comme données d'entrée pour l'ajustement de la courbe.

Les auteurs estiment que les résultats obtenus par la méthode proposée et la méthode de signature hyperbolique existante sont équivalents, et qu'ils sont meilleurs pour les corps d'épreuves de sable sec. L'erreur moyenne absolue sur la profondeur des aciers dans le béton est estimée à environ 13,5%.

2.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, un bref historique sur la technologie radar et de son utilisation en génie civil a été rapporté, et l'ensemble des propriétés électromagnétiques du béton ont été définies.

Nous avons mis en évidence l'importance de l'orientation des antennes lors d'une auscultation au radar, et nous nous sommes intéressés à l'interaction entre l'antenne et le matériau ausculté afin de comprendre le comportement d'une onde EM lorsqu'elle est émise dans le béton.

Nous nous sommes aussi intéressés à l'application du radar pour la détection des armatures dans le béton en citant et rapportant quelques études réalisées pour en améliorer la localisation. Un bref résumé de ces travaux a permis de relever les limites de celles-ci concernant la procédure proposée et la précision de localisation des armatures en surface et en profondeur.

Dans le contexte des procédures proposées par les différents auteurs, nous avons noté certaines difficultés comme la définition du temps zéro, correspondant au moment d'émission de l'impulsion électromagnétique (EM), et l'estimation de la vitesse de propagation des ondes EM dans le matériau. Cependant, certains auteurs utilisent des alternatives pour définir ces deux paramètres essentiels pour la localisation précise des armatures dans le béton. Par exemple le temps d'arrivée du 1er pic de l'onde directe pris comme le temps zéro, ou l'utilisation de l'épaisseur de l'élément investigué pour estimer la vitesse. Sur site, où la contrainte de temps de mise en œuvre et de diagnostic est synonyme de coût, les gestionnaires et les opérateurs de diagnostic d'ouvrages n'ont souvent que le choix de se référer au retour d'expérience pour la valeur de la vitesse.

Suite à cet état de l'art sur la localisation des armatures dans les structures de génie civil par GPR, la recherche d'une solution permettant de localiser précisément les aciers de façon automatique et sans a priori en particulier sur la vitesse semble pertinente.

2.9 RÉFÉRENCES

(Annan 2003) A.P. Annan, Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications, Sensors & Software Inc., 2003, 278 p.

(Annan 2009) A.P. Annan, Chapter 1 - Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar, In Ground Penetrating Radar Theory and Applications, edited by Harry M. Jol,, Elsevier, Amsterdam, 2009, Pages 1, 3-40

(Arcone 2009), S.A. Arcone, Chapter 12 - Glaciers and Ice Sheets, In Ground Penetrating Radar Theory and Applications, edited by Harry M. Jol,, Elsevier, Amsterdam, 2009, Pages 361-392

(Barrile et al. 2005) Vincenzo Barrile, Raffaele Pucinotti, Application of radar technology to reinforced concrete structures: a case study, NDT & E International, Volume 38, Issue 7, October 2005.

(Bradford et Deeds 2006) Bradford, J.H. and Deeds, J.C., Ground-penetrating radar theory and application of thin-bed offset-dependent reflectivity. Geophysics, 2006. pages K47-K57.

(Bungey et al. 1994) J.H. Bungey, S.G. Millard, M.R. Shaw, The influence of reinforcing steel on radar surveys of concrete structures, Construction and Building Materials, Volume 8, Issue 2, 1994, Pages 119-126.

(Bungey 2004) J.H Bungey, Sub-surface radar testing of concrete: a review, Construction and Building Materials, Volume 18, Issue 1, February 2004, Pages 1-8.

(Cariou 1997) Cariou J., Chevassu G., Cote P., Dérobert X., Le Moal J.Y., “Application du radar géologique en génie civil”, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées 211, Sept-Oct 1997 - RÉF. 4135, p. 117 - 131.

(Che Way Chang et al. 2009) Che Way Chang, Chen Hua Lin, Hung Sheng Lien, Measurement radius of reinforcing steel bar in concrete using digital image GPR, Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 2, February 2009, Pages 1057-1063.

(Clemeña 2004) Gerardo G. Clemeña, Short-Pulse Radar Method, in CRC Handbook on Non-Destructive Testing of Concrete, Malhotra and Carino Editors, CRC Press, 2004, chapter 13.

(Daniels 2004) Daniels D.J., Ground Penetrating Radar, 2nd edition, The Institution of Electrical Engineers, 2004

(Darricau 2012) Jacques Darricau, Radars : Principes de base – Éléments constitutifs, Techniques de l'ingénieur, dossier Technologies radars et applications, février 2012.

(Hamrouche 2011) Hamrouche R., Reconnaissance géométrique des structures en maçonnerie ou en béton par imagerie radar multi récepteurs : approche numérique et expérimentale. Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier ; Université de Sherbrooke, 2011, 237 p.

(Hugenschmidt et al. 2010), J. Hugenschmidt, A. Kalogeropoulos, F. Soldovieri, G. Prisco, Processing strategies for high-resolution GPR concrete inspections, NDT & E International, Volume 43, Issue 4, 2010, Pages 334-342

(Klysz 2004) Klysz G., Caractérisation du béton d'enrobage par technique radar : exploitation de l'onde directe émetteur-récepteur. Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier; 2004, 233 p.

(Millard et al. 2002) S.G Millard, A Shaari, J.H Bungey, Field pattern characteristics of GPR antennas, NDT & E International, Volume 35, Issue 7, October 2002, Pages 473-482.

(Sbartaï 2005) Sbartaï Z. M., Caractérisation physique des bétons par radar – Approche neuromimétique de l'inversion. Thèse de doctorat, Université de Toulouse III – Paul Sabatier, 2005, 244 p.

(Shaw et al. 2005) M.R. Shaw, S.G. Millard, T.C.K. Molyneaux, M.J. Taylor, J.H. Bungey, Location of steel reinforcement in concrete using ground penetrating radar and neural networks, NDT & E International, Volume 38, Issue 3, April 2005, Pages 203-212

(Soldovieri et al. 2006) Francesco Soldovieri, Raffaele Persico, Erica Utsi, Vincent Utsi, The application of inverse scattering techniques with ground penetrating radar to the problem of rebar location in concrete, NDT & E International, Volume 39, Issue 7, October 2006, Pages 602-607.

(Van Der Wielen 2014) Van der Wielen, A., Characterization of thin layers into concrete with Ground Penetrating Radar. Thèse de doctorat, Université de Liège, 2014, 247 p.

(Warren et Giannopoulos 2017) Craig Warren, Antonios Giannopoulos, Characterisation of a ground penetrating radar antenna in lossless homogeneous and lossy heterogeneous environments, Signal Processing, Volume 132, March 2017, Pages 221-226.

(Wiwatrojanagul et al. 2017), P. Wiwatrojanagul, R. Sahamitmongkol, S. Tangtermsirikul, N. Khamsemanan, A new method to determine locations of rebars and estimate cover thickness of RC structures using GPR data, Construction and Building Materials, Volume 140, 1 June 2017, Pages 257-273

Chapitre ***3***

Algorithme de traitement des signaux radar permettant de localiser les aciers du premier lit d'une structure en béton arme : mise au point et validation expérimentale

CHAPITRE 3 : ALGORITHME DE TRAITEMENT DES SIGNAUX RADAR PERMETTANT DE LOCALISER LES ACIERS DU PREMIER LIT D'UNE STRUCTURE EN BETON ARME. MISE AU POINT ET VALIDATION EXPÉRIMENTALE

3.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, le principe de l'auscultation au radar en génie civil a été décrit, et son application pour la détection des armatures dans le béton a été rapportée en citant quelques études et approches faites par des chercheurs.

Dans ce chapitre, notre objectif est de mettre au point un algorithme de traitement des signaux radar, totalement automatique et ne nécessitant aucun prérequis, capable de localiser en surface et en profondeur les armatures du premier lit d'éléments en béton armé, et de déterminer la vitesse de propagation des ondes EM dans le béton d'enrobage de chaque acier.

Par la suite nous procéderons à une validation expérimentale de l'algorithme sur une dalle en béton armé dont les profondeurs d'armatures et leurs positions en surface sont connues.

3.2 FONDEMENT DE L'ALGORITHME

Comme nous l'avons cité précédemment, un radar émet une impulsion électromagnétique par une antenne couplée au matériau (par la partie émettrice E). Cette impulsion se propage dans le milieu en s'atténuant et se réfléchit sur les interfaces qui présentent un contraste de propriétés électromagnétiques. Ces réflexions sont enregistrées par la partie réceptrice (R) de l'antenne pendant un intervalle de temps défini par l'opérateur, et constituent un radargramme, appelé aussi A-scan, représentant l'amplitude du signal reçu en fonction du temps. La juxtaposition des radargrammes obtenus par un profil linéaire de mesures constitue une image temporelle en coupe verticale du matériau, nommée coupe-temps et communément appelée B-scan. Ce principe de mesure est illustré sur une dalle en béton armé dans la Figure 3.1.

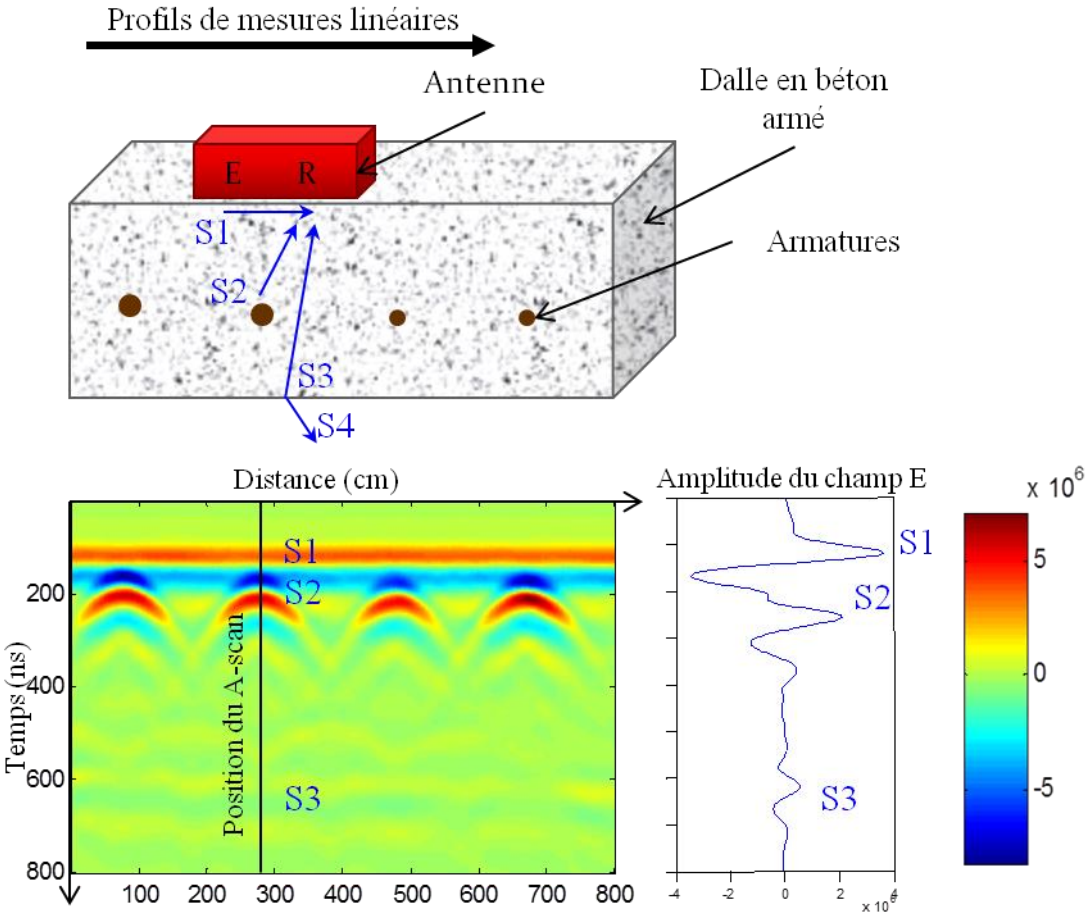


Figure 3.1 : Exemple de coupe-temps caractéristique d'un élément en béton armé

Sur le radargramme (A-scan), le signal S1 correspond à l'onde directe émetteur-récepteur, le signal S2 à la réflexion sur l'armature et le signal S3 à la réflexion sur le fond de l'élément.

La position des aciers dans le plan peut être identifiée manuellement par l'opérateur par la visualisation du B-scan. La position d'un acier dans le plan correspond au sommet de l'hyperbole tracée grâce au rayonnement multidirectionnel de l'antenne radar qui permet de voir l'acier avant d'être à la position verticale de celui-ci. Mais, il n'existe aucune méthode précise qui permette de retrouver automatiquement la position de l'acier dans le plan.

De plus, afin de convertir le temps du A-scan en profondeur il est nécessaire de connaitre la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le matériau ausculté (ASTM D 6432 – 11), et le temps zéro (moment d'émission des impulsions électromagnétiques). Étant donné qu'un système radar fournit uniquement l'amplitude et le temps d'arrivée des ondes EM aux récepteurs (Yelf and Yelf 2004), le temps zéro noté t_0 reste inconnu. Pourtant, le temps zéro est nécessaire pour le calcul du temps de vol d'une onde de l'émetteur jusqu'au récepteur pour un point réflecteur dans le matériau (un acier par exemple).

Habituellement la valeur de la vitesse est estimée à partir de données prises de la littérature ou en se basant sur le retour d'expérience. Cette estimation de la vitesse conduit à des estimations de profondeurs qui peuvent être recalées en quelques points par des carottages, mais l'opération est assez fastidieuse. On peut également utiliser une méthode de migration, la migration de Kirchhoff, qui permet de remonter à la vitesse en exploitant la trace hyperbolique sur le B-scan d'une armature. Toutefois cette méthode est assez lente à mettre en place et ne prend pas en compte le diamètre de l'armature, ce qui peut conduire à une erreur sur la vitesse. Le temps zéro est quant à lui très souvent choisi comme étant le temps d'arrivée du premier pic dans le A-scan.

On comprend aisément que la détermination du temps zéro et de la vitesse de propagation des ondes EM dans le béton est indispensable pour obtenir une bonne précision de la localisation des aciers en profondeur.

Afin de remédier aux limites que présentent les systèmes radars et de localiser précisément les armatures dans les éléments en béton armé, nous avons développé un algorithme capable de localiser automatiquement les sommets des hyperboles qui représentent la position des armatures en surface. L'algorithme permet également de retrouver les profondeurs des aciers

du premier lit d'armatures lorsque la position de l'acier dans le plan est connue. Cet algorithme est construit en posant l'hypothèse que le trajet de propagation des ondes électromagnétiques est linéaire (hypothèse de l'optique géométrique).

3.3 LOCALISATION DES ARMATURES DANS LE PLAN

Le rayonnement multidirectionnel des antennes radar permet de percevoir l'acier avant que l'antenne soit au-dessus de celui-ci. Comme nous l'avons vu, la coupe-temps résultante d'un profil de mesures radar effectué sur un élément en béton armé présente des formes hyperboliques, ces hyperboles sont la signature caractéristique d'un point réflecteur représentant un acier dans notre cas. La formation de cette hyperbole est due au fait que l'onde enregistrée, en déplaçant l'antenne, parcourt de moins en moins de distance en se rapprochant du point réflecteur et inversement de plus en plus de distance en s'en éloignant, ce qui diminue ou augmente respectivement le temps de parcours de l'onde.

3.3.1 Recherche des sommets d'hyperboles correspondant aux aciers (simples et multiples)

L'onde directe est une onde qui se propage directement de l'émetteur au récepteur et principalement dans les premiers centimètres du matériau. Dans le béton celle-ci est mélangée avec les réflexions sur les aciers du premier lit ce qui peut parfois brouiller la signature hyperbolique caractéristique d'un point réflecteur, et peut rendre difficile la recherche des aciers. Afin de faire ressortir sur le B-scan la forme des hyperboles formées par les signaux réfléchis par les armatures, le signal moyen (Figure 3.2) de tous les signaux enregistrés dans le matériau est soustrait à chacun des radargrammes enregistrés. Ce premier filtre, appelé réduction du Clutter, permet d'éliminer tous les signaux continus sur le B-scan ce qui est le cas de l'onde directe.

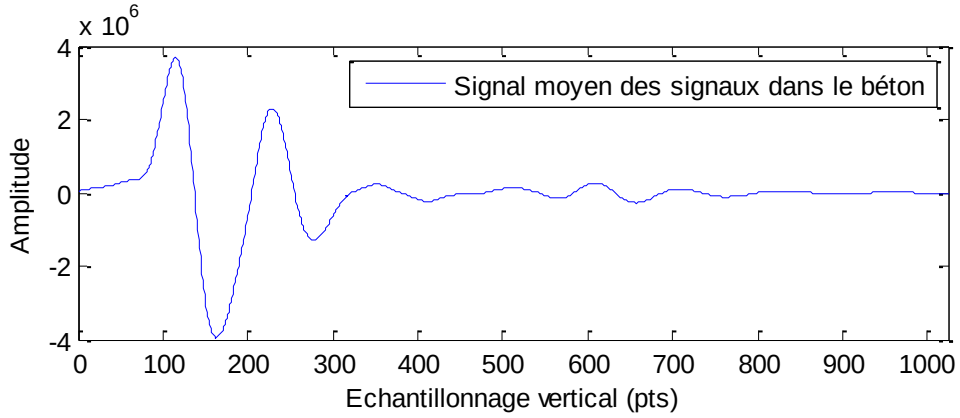


Figure 3.2 : Signal moyen résultant des acquisitions dans le béton en haut

Une fois ce filtre appliqué le B-scan de la Figure 3.1 ne contient plus que les réflexions dues à la présence des aciers (Figure 3.3).

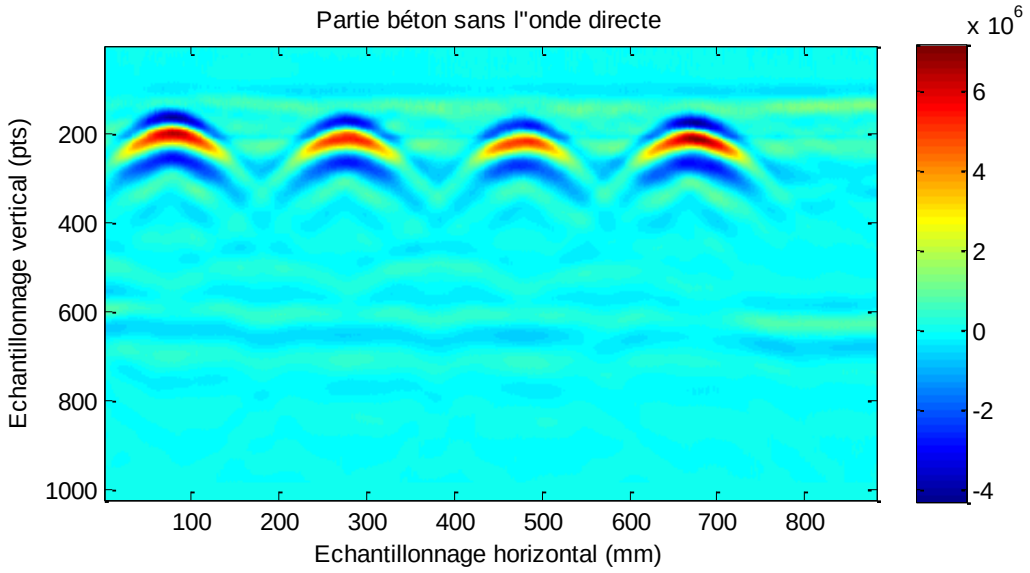


Figure 3.3: Représentation de la partie matériau après soustraction de l'onde directe

Lorsque les antennes sont placées à l'aplomb d'un acier, l'onde aura parcouru le plus court trajet allant de l'émetteur à l'acier puis de celui-ci au récepteur. Ainsi la position en surface d'une armature correspond à l'emplacement (échantillonnage horizontal) du sommet de l'hyperbole dans un B-scan. Afin de repérer automatiquement les sommets des hyperboles, on relève le temps d'arrivée du pic d'amplitude maximale positive de chaque A-scan. Un filtre de lissage est par la suite appliqué afin de rendre plus régulier le tracé de la courbe et de mieux faire ressortir les formes hyperboliques (Figure 3.4).

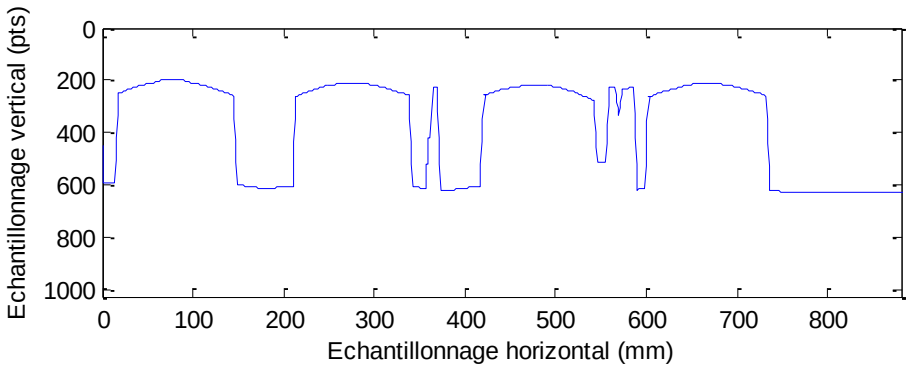


Figure 3.4: Temps d'arrivée des amplitudes maximales

Dans la Figure 3.5, les positions des armatures en surface sont représentées par les droites verticales qui correspondent aux coordonnées (échantillonnage horizontal) des sommets des hyperboles.

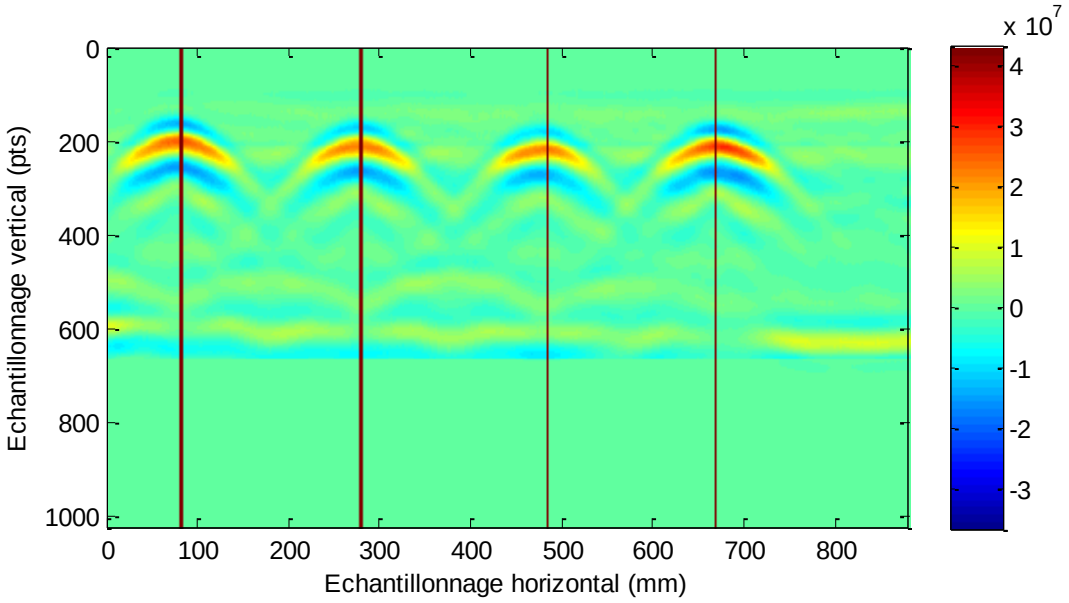


Figure 3.5 :Repérage des sommets des hyperboles correspondant aux positions des aciers en surface

3.4 LOCALISATION DES ARMATURES EN PROFONDEUR ET DÉTERMINATION DE LA VITESSE DE PROPAGATION DES ONDES EM DANS LE BÉTON D'ENROBAGE

Une fois les positions des armatures dans le plan (x,y) déterminées, nous allons nous focaliser sur la détermination des profondeurs des aciers et de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans la couche d'enrobage de chaque acier.

Nous explicitons ci-dessous la procédure et la méthode élaborées.

3.4.1 Évaluation du temps zéro – instant d'émission des ondes électromagnétiques

L'appareil de mesure que nous utilisons est un dispositif développé au laboratoire à partir des antennes GSSI 5100. Il est composé d'une antenne émettrice et de deux antennes réceptrices fixées dans un boitier muni d'une roue codeuse (Figure 3.6).

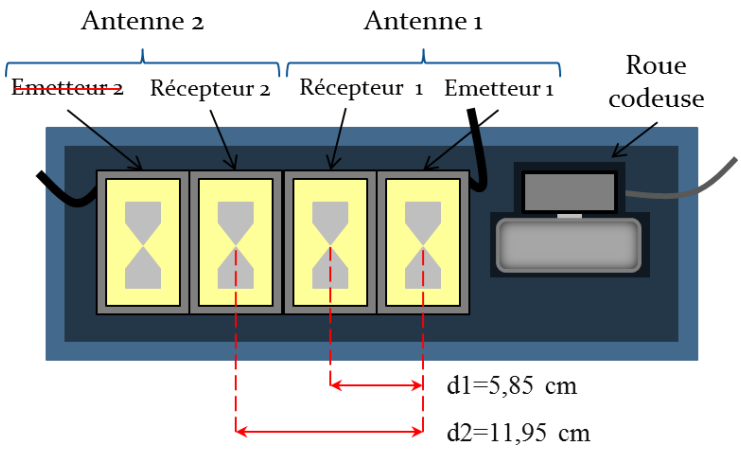


Figure 3.6: Représentation schématique du dispositif de mesure de laboratoire

En ce qui concerne l'acquisition de données, le dispositif est déplacé suivant un axe sur le matériau investigué, sans interruption de l'enregistrement, d'acquisitions effectuées en espace libre (Figure 3.7).

L'antenne émettrice (E) et les deux récepteurs (R1 et R2) sont fixés dans le compartiment du dispositif, ainsi E et R1 sont distantes de *d1* et E et R2 de *d2*, nous obtenons ainsi pour chaque position de l'émetteur deux acquisitions, respectivement du récepteur 1 (Figure 3.8 à gauche) et du récepteur 2 (Figure 3.8 à droite).

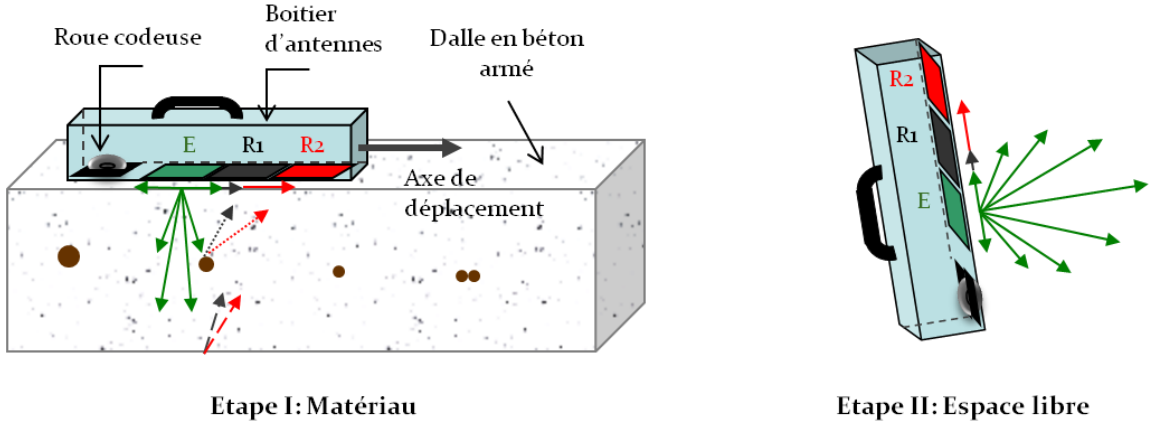


Figure 3.7: Procédure de mesure au radar double récepteur sur un exemple de dalle en béton armé avec quatre aciers

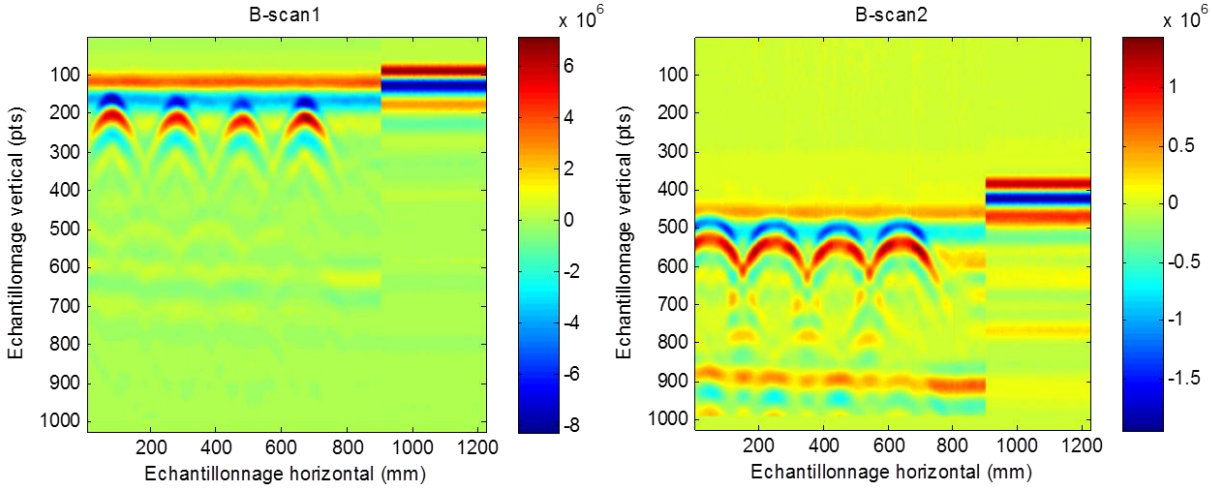


Figure 3.8: B-scans résultants d'une acquisition sur l'exemple de dalle en béton avec quatre aciers, à gauche le récepteur 1 et à droite le récepteur 2

L'enregistrement des signaux par le récepteur 1 (*R1*) est temporellement indépendant de celui du récepteur 2 (*R2*). Pour les ramener au même référentiel temporel nous utilisons les signaux enregistrés en espace libre. Dans ce cas de figure, la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques est connue et constante dans l'air (c), les distances *E1-R1* et *E1-R2* sont également définies, il ne reste comme inconnue que le t_0 qui doit être le même pour les deux récepteurs. Dans cette configuration il est alors aisé de recaler en temps les signaux du récepteur R2 pour que ceux-ci aient la même base temporelle que ceux du récepteur R1 tout en calculant le t_0.

À ce stade notre algorithme calcule pour chaque antenne réceptrice (*R1* et *R2*) le signal moyen des signaux enregistrés dans l'air, représentant l'onde directe. Ensuite, il relève

automatiquement le temps d'arrivée du premier pic négatif du signal, respectivement *t1* et *t2* (Figure 3.9). Le premier pic négatif de l'onde directe est choisi, car celui-ci contient l'amplitude prépondérante. Enfin, le temps d'arrivée *t* est relié à la distance *d* qui lui correspond (Figure 3.10), donnant ainsi la distance en fonction du temps ($d_i = v_{air} \times t_i + d_0$). La pente de cette droite représente la vitesse de propagation des ondes EM dans l'air qui est de *30 cm/ns*. Ainsi le temps zéro est déterminé par régression linéaire ce qui permet de recaler les signaux à leur instant d'émission.

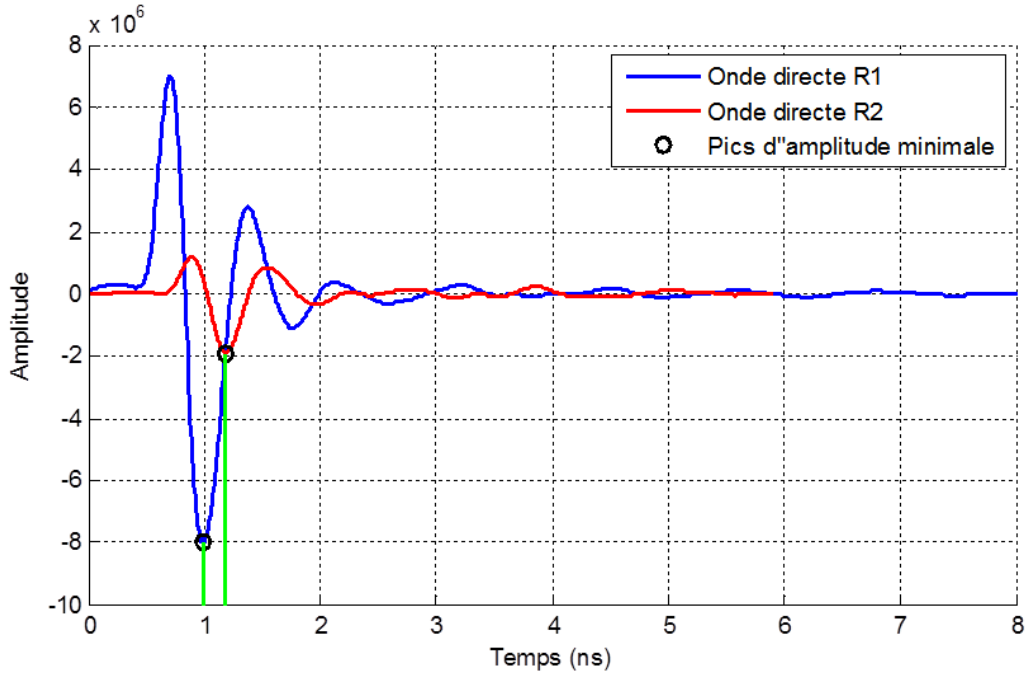


Figure 3.9: Signaux enregistrés par les deux récepteurs dans l'air en fonction du temps

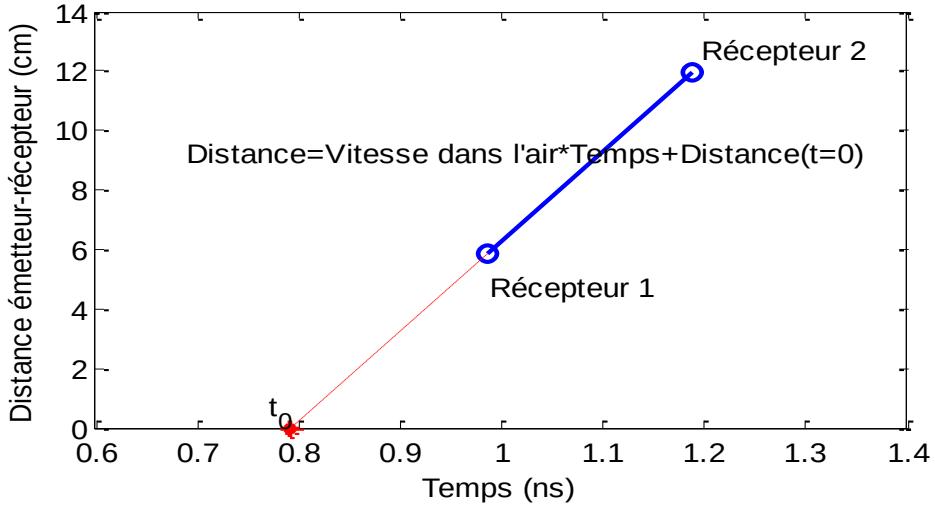


Figure 3.10: Régression linéaire de la droite 'distances émetteur-récepteurs en fonction du temps d'arrivée des pics négatifs des signaux enregistrés dans l'air'

3.4.2 Recherche de la profondeur des aciers et détermination de la vitesse réelle

Pour déterminer la profondeur de chaque acier, nous utilisons le fait que les ondes reçues sur chaque récepteur doivent arriver de manière cohérente en fonction du trajet qu'elles ont suivi. Ce trajet correspond au parcours allant de l'émetteur à l'acier puis de celui-ci au récepteur.

Nous supposons que les trajets parcourus par les ondes électromagnétiques dans le matériau sont linéaires. Ces trajets correspondent aux parcours que suivent les ondes : de l'émetteur à un point et de ce point aux deux récepteurs (*R1* et *R2*) (Figure 3.11, a). Ces trajets sont calculés uniquement pour les points dont la position dans le plan correspond à celle de l'acier (sommet de l'hyperbole), et situés à une profondeur comprise dans la gamme de profondeur *h* définie (Figure 3.11, b). Nous utilisons une gamme de profondeurs suivant l'épaisseur de l'élément en béton armé de 0.5 à 8 cm.

Nous calculons ensuite le temps de trajet de chaque point en supposant connaitre la vitesse de propagation des ondes EM dans le béton.

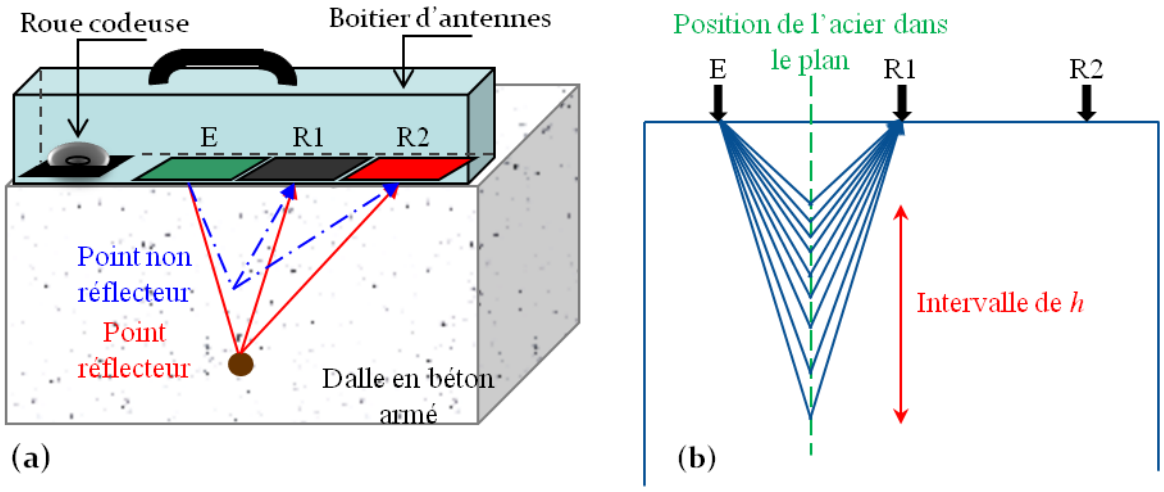


Figure 3.11: Représentation des trajets linéaires émetteur-point-récepteur parcourus par l'onde électromagnétique dans le béton

On extrait par fenêtrage temporel les parties de signal qui correspondent au temps de trajet de chaque A-scan équivalent à la position de l'acier en surface. La taille de cette fenêtre temporelle est égale à la largeur temporelle du pic négatif de l'onde directe enregistrée en espace libre, ce pic contient l'amplitude la plus élevée du A-scan en valeur absolue. La taille de ce pic est prise comme référence, car les signaux enregistrés dans l'air sont stables et moins perturbés que ceux de l'onde directe enregistrée dans le matériau. Ce fenêtrage temporel permet de suivre le parcours réel du pic contenant le maximum d'énergie de l'onde émise par l'émetteur, qui va ensuite se réfléchir sur l'acier avant d'être enregistrée par les deux récepteurs.

La présence d'un point réflecteur dans le matériau se traduit par une réflexion, celle-ci apparait en forme de pic sur le A-scan dont la largeur temporelle est similaire à celle de l'onde directe.

Afin de diminuer le rapport signal/bruit, on prend en compte plusieurs signaux correspondants à différentes positions émetteur – récepteur autour de la position en surface de l'acier (Figure 3.12). Les *m* positions correspondent aux *m* A-scans centrés autour de la position de l'acier en surface, la sélection des *m* positions centrées autour de l'acier a été adoptée suite à une étude paramétrique que nous explicitons dans le paragraphe 3.6.4.

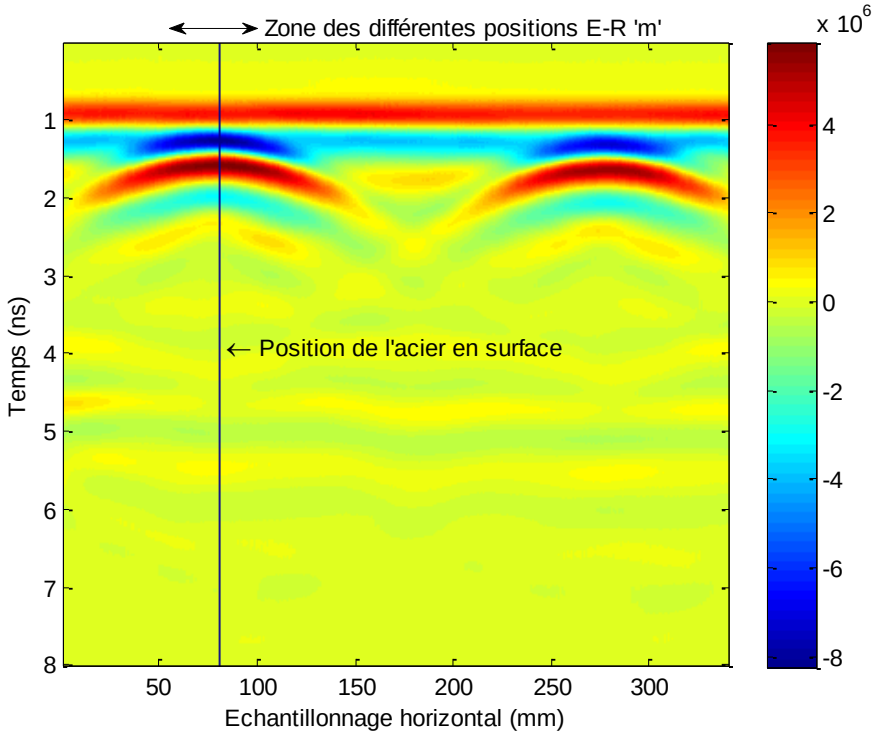


Figure 3.12: Représentation de la zone comprenant les 'm' radargrammes autour d'un acier correspondant aux différentes positions E-R dans le B-scan du récepteur 1

Une fenêtre temporelle est constituée d'une succession d'amplitudes en fonction du temps représentant une partie du signal. Pour chaque profondeur *h* et pour toutes les positions émetteur – récepteur *m* prises en compte, nous additionnons les différents signaux extraits par fenêtrage temporel et nous calculons l'aire sous la courbe de la somme de ces signaux (Hamrouche, 2011).

Pour une profondeur donnée *h* et un temps de trajet calculé avec la vitesse de propagation *v*, la somme des signaux prélevés par fenêtrage temporel à chaque position émetteur – récepteur (Figure 3.13 et Figure 3.14) ne forme une aire imposante et prépondérante que si cette profondeur, *h*, correspond à un point réellement réflecteur et seulement si cette vitesse correspond à la vitesse moyenne réelle des ondes dans le matériau autour de ce même point (Figure 3.15.a) . Dans ce cas, ce résultat traduit la présence d'un réflecteur (en l'occurrence l'armature dans le cas présent) à cette profondeur *h* et correspondant à une vitesse moyenne de propagation des ondes EM *v* dans le béton d'enrobage.

Dans le cas contraire où nous sommes à une position pour laquelle le point n'est pas réellement réflecteur ou si la vitesse de propagation ne correspond pas à la vitesse réelle dans le matériau, le résultat de la sommation est faible (Figure 3.15.b).

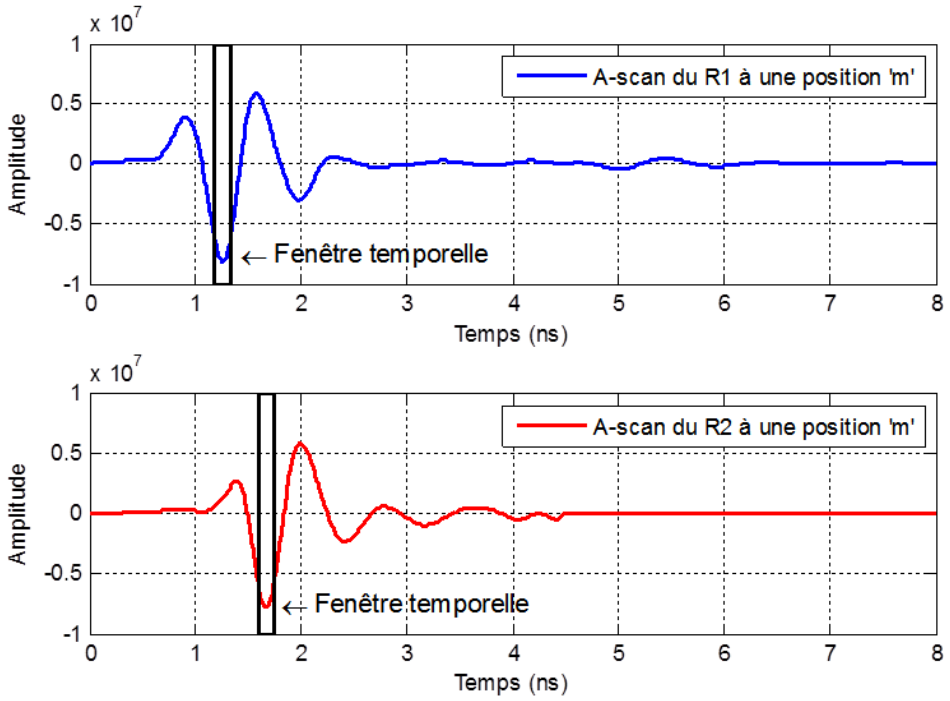


Figure 3.13: Fenêtrage temporel des signaux du récepteur 1 et du récepteur 2 pour une position donnée « m ». Cas d'un point réflecteur

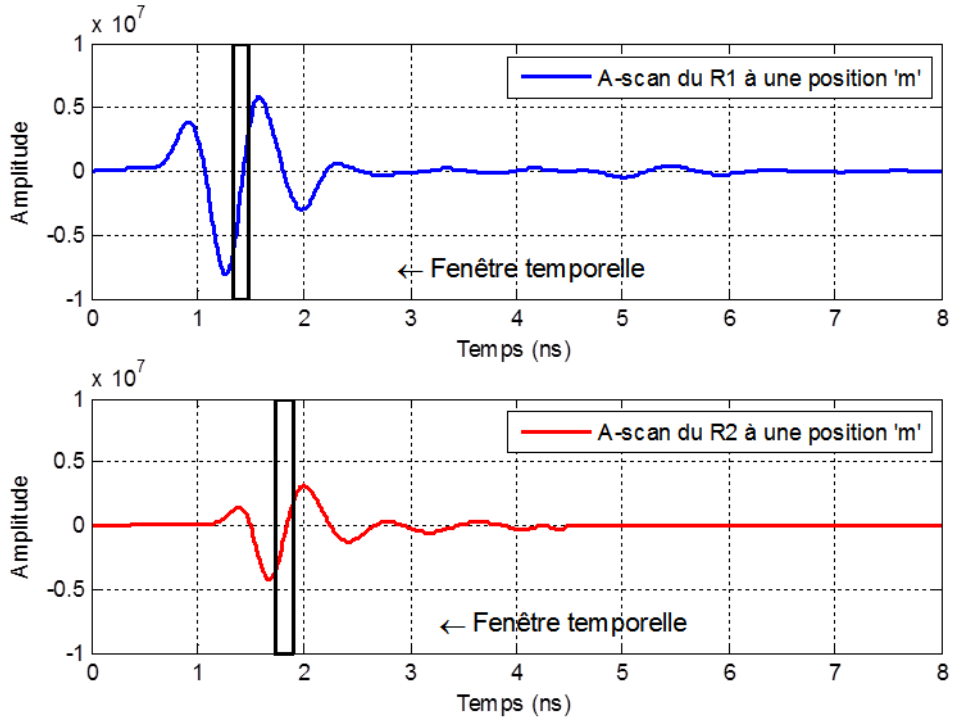


Figure 3.14: Fenêtrage temporel des signaux du récepteur 1 et du récepteur 2 pour une position donnée « m ». Cas d'un point non réflecteur

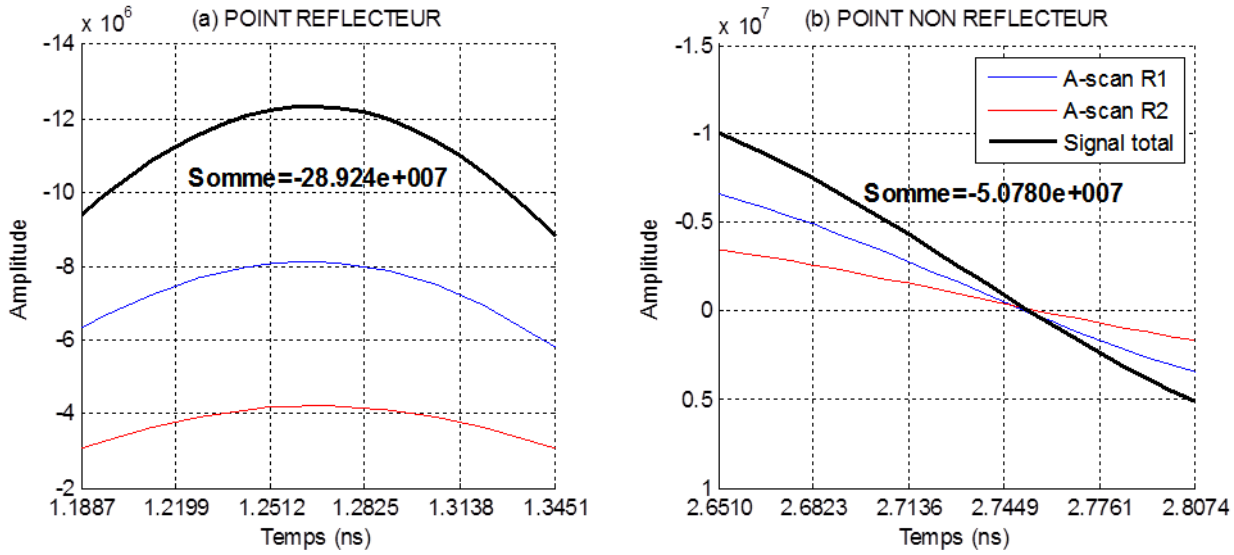


Figure 3.15: Résultats des sommations des fenêtres temporelles dans le cas d'un point réflecteur correspondant à un acier (a) et un point non réflecteur (b)

3.5 IDENTIFICATION AUTOMATIQUE DE LA TRANSITION BÉTON / AIR SUR LE B-SCAN

Comme détaillé ci-dessus, un profil de mesure contient une partie représentant les acquisitions effectuées sur le béton et la seconde partie correspondant aux acquisitions en espace libre.

Il est nécessaire de retrouver le point de transition entre les acquisitions effectuées dans le matériau et celles dans l'air.

Les signaux enregistrés en espace libre sont identiques, et la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans l'air est supérieure à celle dans le béton, par conséquent l'onde directe enregistrée en espace libre prend moins de temps pour parcourir la distance émetteur – récepteur (Figure 3.16). L'uniformité des signaux enregistrés dans l'air est utilisée pour différencier les acquisitions faites dans le béton de celles effectuées en espace libre.

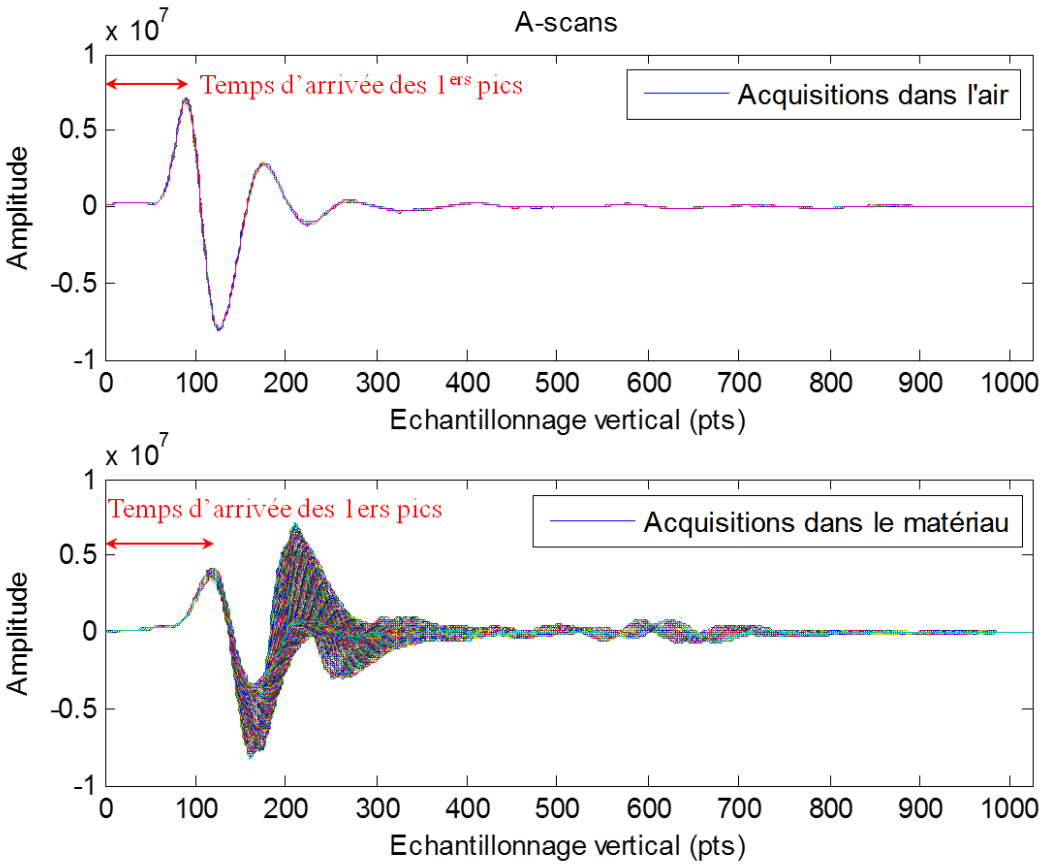


Figure 3.16 : Ensemble des A-scans respectivement enregistrés dans l'air et dans le béton

Chaque profil de mesure est représenté par une matrice correspondant à un B-scan, dans laquelle le nombre de lignes '*k*' représente l'échantillonnage vertical en nombre de points (prédéfini par l'opérateur lors des configurations), cet échantillonnage correspond à la fenêtre temporelle d'écoute du signal en nanoseconde (ns), sa taille est choisie par l'opérateur et correspond également à la longueur du A-scan. Le nombre de colonnes '*l*' de la matrice est l'échantillonnage horizontal, son unité est choisie par l'opérateur, elle peut être millimétrique, centimétrique ou métrique. Chaque colonne '*j*' correspond à un signal enregistré au point sur l'axe du profil distant de la valeur '*j*' par rapport à l'origine '0' du profil, ce qui donne pour chaque échantillonnage horizontal un A-scan, ce dernier correspond en réalité à une succession d'acquisitions moyennées. Dans un exemple de B-scan représentant un profil de mesures obtenu sur une dalle en béton armé avec quatre armatures (Figure 3.17), la taille de la matrice *(k,l)* est égale à *(1024,1227)*.

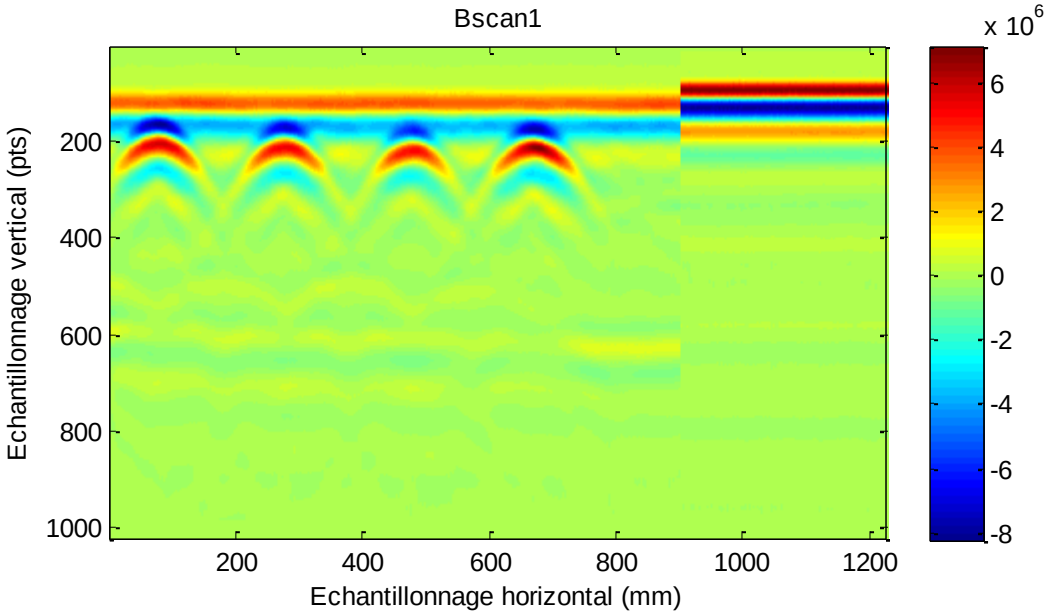


Figure 3.17: Exemple de B-scan représentant un profil de mesures effectué sur une dalle en béton comportant quatre armatures

En premier ce sont les dimensions *(k,l)* de la matrice qui sont déterminées. Dans tous les profils, les acquisitions effectuées dans l'air viennent après les mesures sur le matériau, donc elles sont à la fin du B-scan. Les dernières colonnes sont testées et comparées les unes aux autres en termes d'amplitude totale en calculant le produit vectoriel de deux A-scans successifs que l'on divise par la norme de chaque vecteur. Puisque ces signaux enregistrés dans l'air sont identiques par conséquent, quel que soit le couple des A-scans l'amplitude

totale est identique ou varie légèrement pour toute la partie enregistrée dans l'air. Nous cherchons donc à retrouver le couple de A-scans '*j*' et '*j-1*' donnant une amplitude totale très différente de celles des combinaisons précédentes, cette combinaison n'est que le premier A-scan des signaux enregistrés dans l'air, représentant '*j=901*' dans notre exemple, et le dernier A-scan des acquisitions dans le béton correspondant à '*j-1=900*'.

Ainsi les coordonnées *(k,l)* de chaque partie sont déterminées, telles que la partie béton correspond aux signaux allant du premier signal du B-scan à '*j-20mm*', $(k,l)_{béton}=(1 \text{ à } 1024,1 \text{ à } 881)$. Quant à la partie air, celle-ci correspond aux acquisitions commençant par '*j+20mm*' et finie au dernier signal B-scan, $(k,l)_{air}=(1 \text{ à } 1024,921 \text{ à } 1277)$. La marge de 20 mm est ajoutée ou soustraite comme sécurité afin d'éviter de tomber sur la partie de transition, qui peut très souvent correspond à un mélange d'acquisitions dans le matériau et l'air.

3.6 VALIDATION EXPÉRIMENTALE DE L'ALGORITHME

Pour vérifier la fiabilité des résultats donnés par l'algorithme nous procédons à sa validation expérimentale sur une dalle test en béton armé dont les emplacements des armatures sont connus.

Dans cette partie du chapitre, nous commençons par décrire la dalle test qui est utilisée pour la validation expérimentale de l'algorithme. Par la suite, nous présentons le dispositif de mesures et la procédure d'auscultation élaborée. Enfin, on termine avec la présentation des résultats obtenus.

3.6.1 Description de la dalle test

La dalle test a été confectionnée avec un béton ordinaire composé de :

- Granulats siliceux roulés qui proviennent de la Garonne (gravillons roulés siliceux 4-10 mm, ainsi qu'un sable roulé siliceux 0/4 mm ayant un module de finesse de 3 et une densité de 2,68) ;
- Ciment Portland CEM I (350 kg/m3) avec un rapport eau/ciment de 0,55.

Le béton a une porosité à l'eau mesurée à 28 jours d'environ 14%. La dalle avait été fabriquée au sein de notre laboratoire (LMDC) en 2002 pour effectuer des tests de techniques non destructives.

Elle a pour dimensions de 2 x 1 x 0,2 m^3. Elle comporte trois lits d'armatures de tailles différentes (8, 12 et 16 mm). La partie supérieure comprend deux lits croisés (en rouge sur la Figure 3.18) situés à des profondeurs de l'ordre de 3,2 cm à 3,6 cm pour le lit transversal, et de 4,7 cm à 5,1 cm pour le lit longitudinal. La nappe inférieure (en bleu) est située entre 15,2 cm et 15,6 cm de profondeur. Un tuyau en PVC (en gris) a également été enfoui dans la dalle à 7,5 cm de profondeur. Et à droite du tuyau trois plaques métalliques ont été placées à des profondeurs de 5, 10 et 15 cm à l'extrémité non ferraillée de la dalle.

Les armatures transversales supérieures sont désignées par les lettres A (Ø16), B (Ø12), C (Ø8), et D (2Ø12). La lettre E correspond à la position du tuyau en PVC et la lettre F à la position des 3 plaques métalliques. Les armatures longitudinales sont quant à elles désignées par les chiffres 1 (Ø16), 2 (Ø12), 3 (Ø8), et 4 (3Ø8).

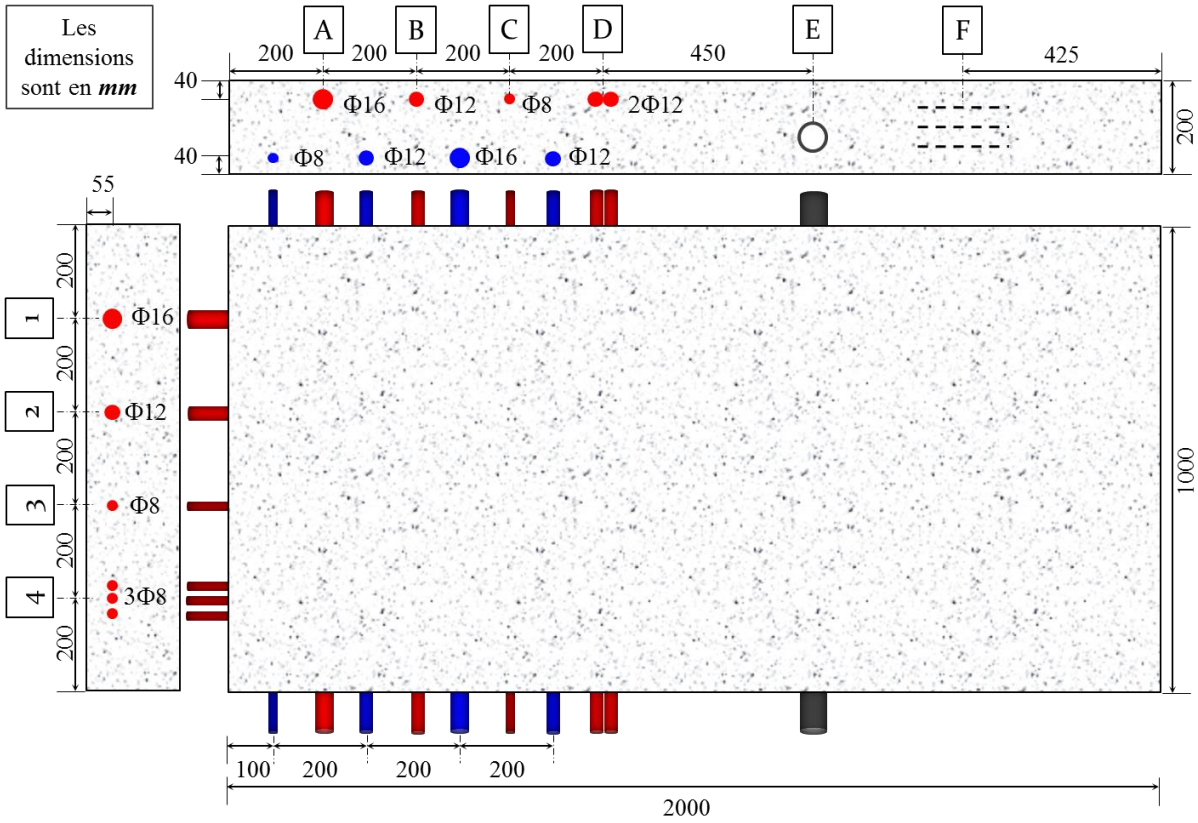


Figure 3.18: Disposition et profondeurs des armatures dans la dalle test en béton armé

3.6.2 Dispositif expérimental

Pour nos auscultations nous utilisons un système radar SIR® 30 développé par GSSI® Geophysical Survey Systems, Inc (Figure 3.19).

Le système doit être connecté à un écran d'affichage HDMI et à un clavier. L'espace de stockage de données est un disque dur d'une capacité de 500 Gb. Selon les besoins, l'utilisateur peut paramétrer l'échantillonnage du signal (échantillonnage vertical en *nombre de points*/fenêtre d'écoute en *ns* entre 256 et 16384 points).

Figure 3.19: Représentation du radar SIR® 30

Le boitier d'antennes a été fabriqué dans un atelier au laboratoire, il est composé de deux antennes bi-statiques de modèle 5100 GSSI® avec une fréquence centrale de 1,5 GHz. Chaque antenne possède deux dipôles de forme papillon, un est l'émetteur l'autre est le récepteur. Nous utilisons seulement l'émetteur de la première antenne (*E1*) et le récepteur de chaque antenne (*R1* et *R2*) (Figure 3.20), ce boitier et aussi muni d'une roue codeuse qui permet de contrôler le pas de mesure (échantillonnage horizontal). Les antennes sont reliées à des boites contenant l'électronique via des câbles.

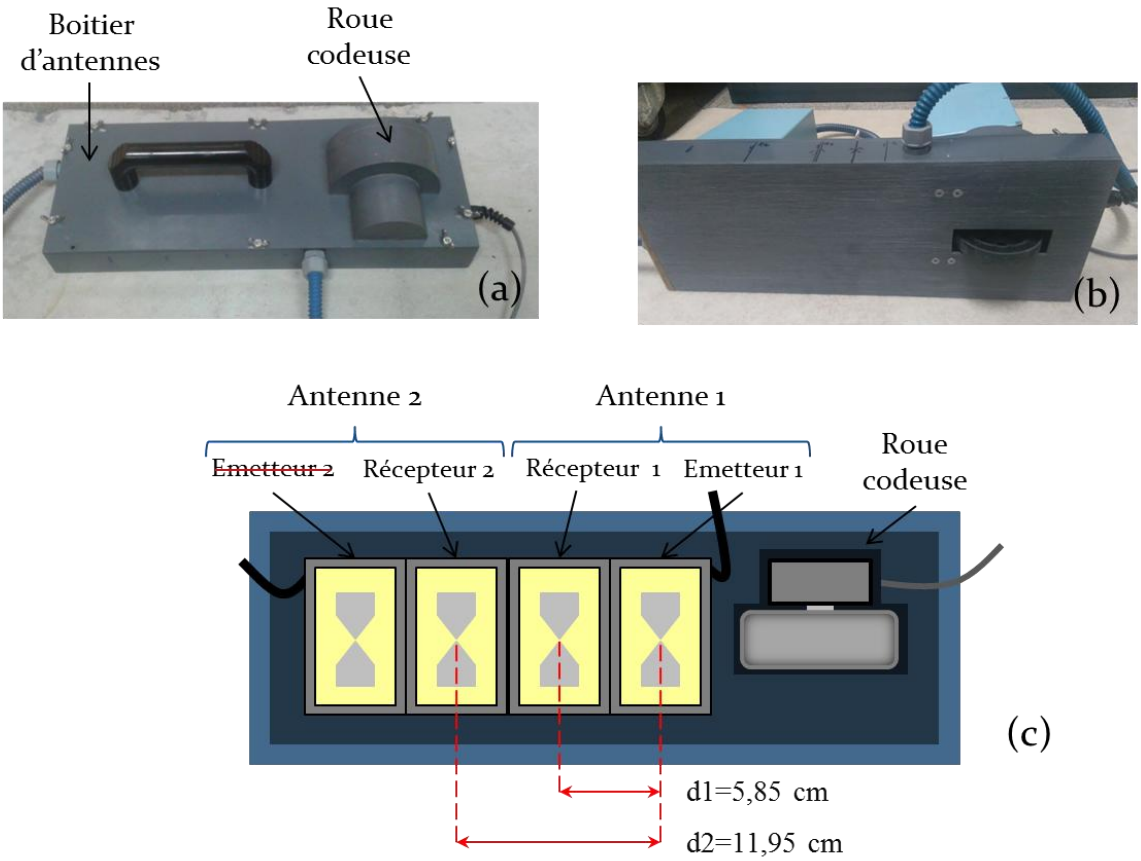


Figure 3.20 : Représentation du dispositif radar double récepteur, (a) vue de dessus, (b) vue de dessous, (c) représentation de l'intérieur du dispositif montrant l'emplacement des antennes

3.6.3 Procédure de mesures

Pour effectuer nos mesures, nous plaçons le boitier d'antennes sur la surface de la dalle en béton armé et nous le déplaçons suivant un axe linéaire, l'antenne émettrice envoie alors des impulsions électromagnétiques qui traversent le matériau à chaque pas de mesure préalablement prédéfini (Figure 3.21).

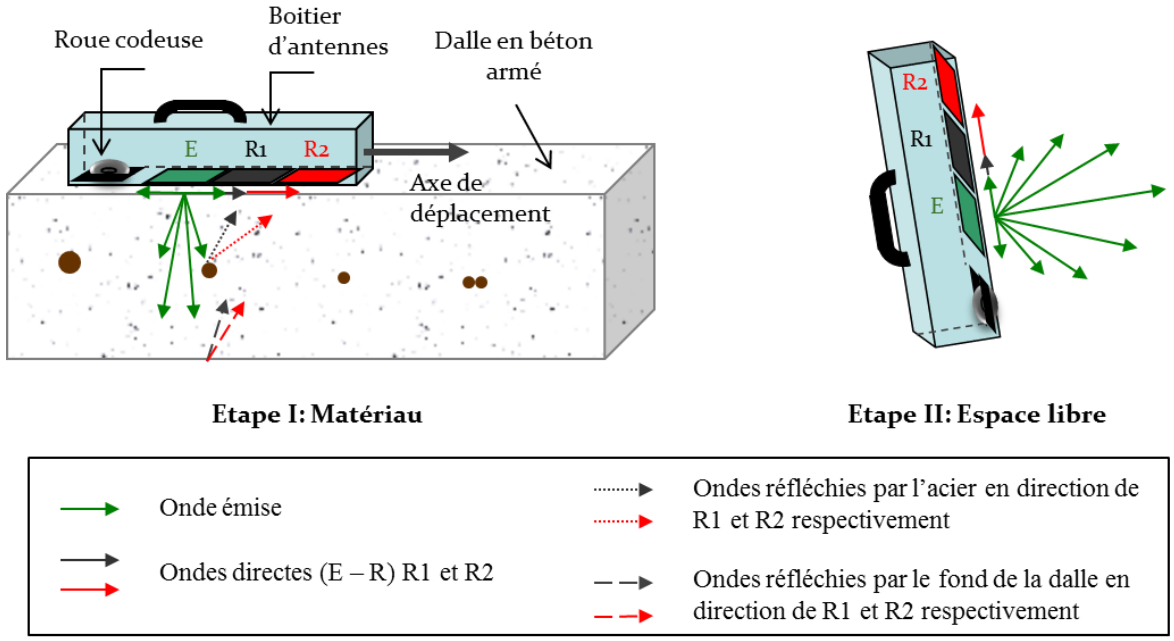


Figure 3.21: Principe de mesure

Les antennes réceptrices (*R1* et *R2*) enregistrent les signaux des ondes directes *Sd* (émetteur – récepteur) et les signaux réfléchis *Sr* par les différentes interfaces dans la dalle en béton armé présentant un contraste de propriétés électromagnétiques (béton/acier et béton/air qui correspond au fond de la dalle). On obtient ainsi pour chaque position un radargramme, il représente l'amplitude du signal enregistré en fonction du temps.

À la fin du profil linéaire dans le matériau nous effectuons une mesure en espace libre sans arrêter l'enregistrement, cela permet de déterminer le moment d'émission de l'onde électromagnétique t_0 et de recaler les signaux reçu sur chaque récepteur dans le temps, comme cité dans le paragraphe (3.4.1). Pour ce faire, nous soulevons le boitier en orientant les antennes (la partie inférieure du boitier) vers une zone dégagée de tout obstacle susceptible de réfléchir le rayonnement. Pour ces mesures en espace libre les radargrammes obtenus ne contiennent alors que le signal directement émis de l'émetteur aux récepteurs.

Le tableau ci-dessous représente les paramètres d'acquisitions du radar.

Tableau 3.1: Paramètres d'acquisitions

Échantillonnage		**Gain (dB)**		**Range (ns) Fenêtre d'écoute**
Horizontal (Scans/m)	**Vertical (Samples/scan)**	**Récepteur 1**	**Récepteur 2**	
1000	1024	2	15	8

3.6.4 Étude paramétrique sur l'influence de la taille de la fenêtre temporelle et du nombre de positions E/R sur les écarts de profondeur des aciers

Une étude paramétrique a été réalisée afin d'optimiser la taille de la fenêtre temporelle (FT) et le nombre de positions émetteur – récepteur (*m*) prises en compte. Ainsi cette étude permet de minimiser l'erreur sur la profondeur des aciers.

Dans cette démarche, nous avons calculé la moyenne des erreurs relatives sur les profondeurs des aciers isolés d'une dalle en béton armé.

$$Erreur\ relative\ moyenne\ (\%) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[\left(\frac{\left|p_i - p_i^{réel}\right|}{p_i^{réel}}\right) * 100\right] \qquad \text{(eq. 3.1)}$$

i: acier considéré ;

n : nombre total d'aciers isolés (6 aciers de profondeurs différentes) ;

p_i : profondeur de l'acier (i) déterminée par l'algorithme ;

$p_i^{réel}$: profondeur réelle de l'acier (i).

Cette moyenne est calculée pour différents cas en faisant varier deux paramètres :

- la taille de la fenêtre temporelle (largeur du pic d'amplitude maximale dans les signaux enregistrés en espace libre noté (*fntp*)) ;
- le nombre et l'emplacement des positions émetteur – récepteur par rapport au sommet de l'hyperbole qui représente la position de l'acier en surface.

Cette moyenne de l'erreur relative est calculée sur des résultats obtenus pour deux profils réalisés sur une dalle en béton armé qui comporte trois aciers isolés et un paquet d'aciers (non considéré dans cette étude) disposés à des profondeurs connues, allant de 3 cm à 5 cm, le pas de mesure des profils est de 1 mm. Nous avons considéré dans cette étude cinq tailles de fenêtre temporelle (FT) (Tableau 3.2), et quatre positions émetteur – récepteur (m) :

- cas 1 : une seule position qui correspond au sommet de l'hyperbole ;
- cas 2 : les positions situées entre le sommet de l'hyperbole et 2 cm à sa gauche ;
- cas 3 : les positions situées entre le sommet de l'hyperbole et 2 cm à sa droite ;
- cas 4 : les positions situées sur une distance de 4 cm centrée sur le sommet de l'hyperbole.

Tableau 3.2 :Erreur relative moyenne (%) sur les profondeurs des aciers simples en fonction du cas du nombre de positions « m » et de la taille de la fenêtre temporelle « FT »

	m=1 position	***m=21 positions à gauche du sommet***	***m=21 positions à droite du sommet***	***m=41 positions centrées sur le sommet***
FT=(1/5)fntp	4,23	5,53	3,30	3,52
FT=(1/3)fntp	4,08	4,45	2,93	3,30
FT=(2/5)fntp	3,98	4,94	2,83	3,10
FT=(1/2)fntp	3,55	3,80	2,26	2,16
FT=(2/3)fntp	3,08	3,49	2,42	2,07

La Figure 3.22 représente la variation de l'erreur moyenne relative des profondeurs des aciers simples.

Nous rappelons que l'objectif de l'étude paramétrique est de trouver la bonne combinaison de la taille de la fenêtre temporelle et le nombre de positions émetteur – récepteur permettant de minimiser l'erreur relative sur les profondeurs des aciers.

L'analyse des résultats de cette étude paramétrique nous mène à retenir le cas où la fenêtre temporelle (FT) est égale au deux tiers de la largeur temporelle du pic ayant l'amplitude la plus élevée dans les signaux enregistrés dans l'air, associée à quarante et une positions centrée sur le sommet de l'hyperbole, car c'est la combinaison pour laquelle l'erreur est la plus faible (2.07 %).

Nous remarquons que pour les différents nombres de positions (m) l'erreur relative moyenne diminue lorsque la taille de la fenêtre temporelle (FT) augmente. Cela est peut être dû à une perte d'informations si le rétrécissement de la fenêtre temporelle est trop important.

Le choix du nombre de positions (m=41) s'impose par lui-même parce que les positions sont centrées par rapport au sommet de l'hyperbole, et le fait de considérer plusieurs positions émetteur – récepteur améliore le rapport signal/bruit puisque le bruit incohérent est fortement atténué.

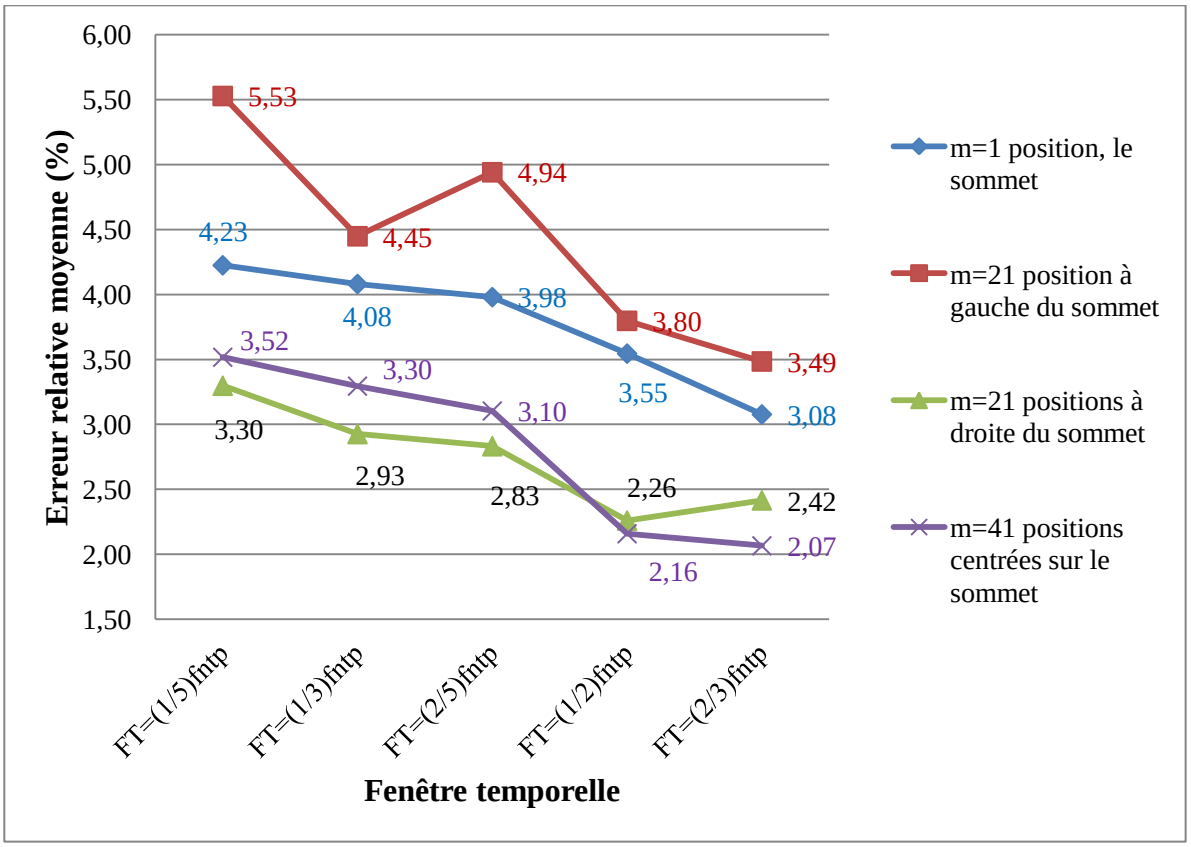


Figure 3.22 :Influence de la taille de la fenêtre temporelle (FT) et du nombre de positions E-R (m) prises en compte sur les écarts de profondeur des aciers simples

3.6.5 Résultats obtenus pour la dalle test

Une série de mesures a été effectuée sur la dalle test (Figure 3.18) suivant la procédure d'acquisition présentée dans le paragraphe 3.6.3 en utilisant le radar SIR® 30 (3.6.2) avec le dispositif à deux récepteurs (Figure 3.20). Cette série d'acquisitions est réalisée suivant les sens X et Y sous forme de profils longitudinaux et transversaux, respectivement cinq dans le sens de la longueur de la dalle (profils de X1 à X5) et dix dans le sens de sa largeur (profils de Y1 à Y10) comme représenté sur la Figure 3.23.

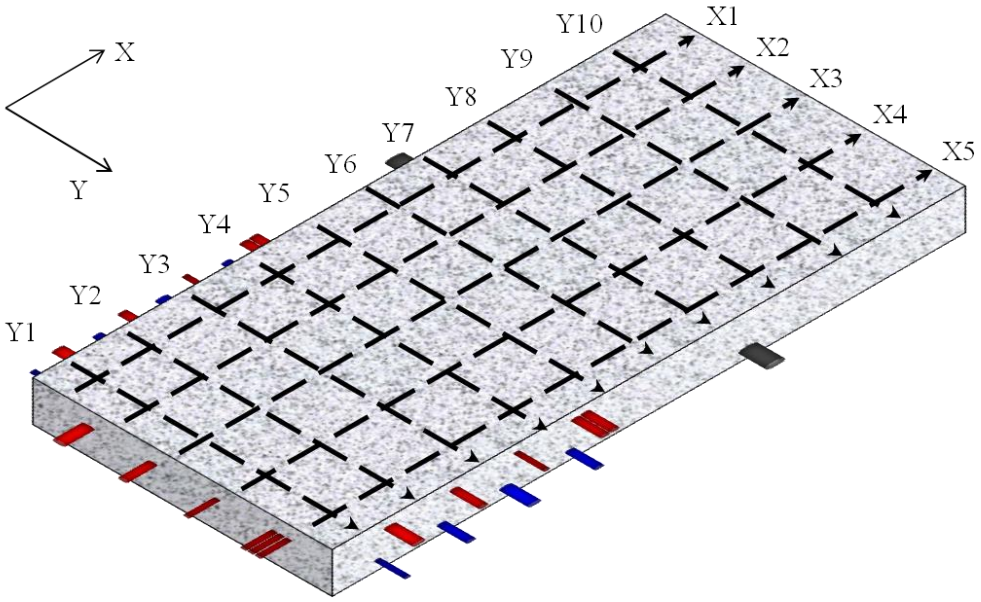


Figure 3.23 : Dénommination des profils de mesures longitudinaux, transversaux et sens de mesures

Les tableaux ci-dessous regroupent les résultats obtenus après application de l'algorithme sur l'ensemble des profils longitudinaux puis transversaux. Il faut noter que les profondeurs réelles des armatures sont connues, ce qui nous permet de comparer les profondeurs des aciers calculées par l'algorithme à celles-ci.

En ce qui concerne les positions des armatures sur le plan (x,y) de la dalle, il n'est pas intéressant de faire apparaitre dans les tableaux de résultats la comparaison avec leurs emplacements réels dans la dalle, car nous allons tracer par la suite la cartographie des armatures de la dalle test, et de ce fait nous pourrons mieux visualiser les positions des aciers dans la dalle et les comparaisons seront plus significatives.

Après l'évaluation de l'erreur entre la profondeur réelle et la profondeur calculée par l'algorithme dans le cas des aciers simples, une erreur moyenne sur la profondeur de l'ensemble des aciers simples est calculée pour chaque profil de mesures.

Tableau 3.3 : Résultats pour les profils de mesures longitudinaux

Résultats de l'algorithme								
Profil	**N° acier**	**Posit. sur x (cm)**	**Prof. (cm)**	**Vitesse (cm/ns)**	**t0 (ns)**	**Prof. réelle (cm)**	**Erreur (mm)**	**Err. relative (%)**
X1	1	7,9	3,2	10,9	0,783	3,2	0	**0,0**
	2	27,6	3,3	10,4		3,4	1	**2,9**
	3	48,1	3,6	10,3		3,6	0	**0,0**
	4	67,1	3,3	10,3		3,4	1	/
X2	1	8,3	2,9	10,2	0,790	3,1	2	**6,5**
	2	27,9	3,2	10,4		3,4	2	**5,9**
	3	47,8	3,4	10,1		3,6	2	**5,6**
	4	67	3,3	10,1		3,4	1	/
X3	1	7,6	2,9	10	0,790	3,1	2	**6,5**
	2	28,2	3,4	10,2		3,4	0	**0,0**
	3	47,8	3,7	10,1		3,8	1	**2,6**
	4	67,1	3,6	10,3		3,4	2	/
X4	1	7,6	3	10,3	0,790	3,1	1	**3,2**
	2	27,7	3,5	10,3		3,4	1	**2,9**
	3	47,6	3,9	10,2		4	1	**2,5**
	4	67,8	3,7	10,1		3,4	3	/
X5	1	7,5	3,1	10,5	0,790	3,2	1	**3,1**
	2	27,9	3,5	10,4		3,4	1	**2,9**
	3	47,6	3,9	10,3		3,6	3	**8,3**
	4	67	3,7	10,1		3,4	3	/

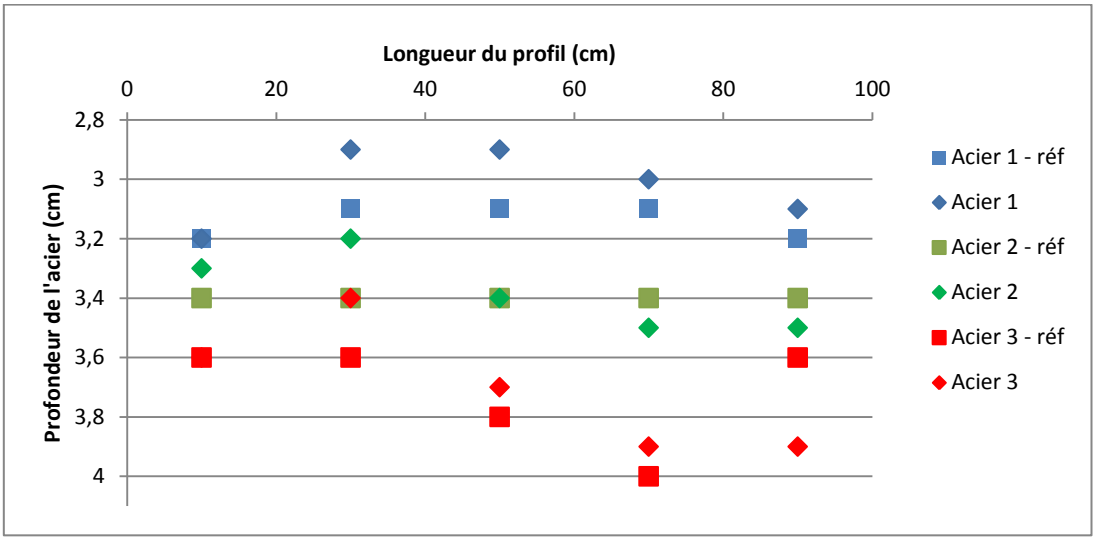


Figure 3.24 : Comparaison des profondeurs calculées et réelles des aciers transversaux

Tableau 3.4 : Résultats pour les profils de mesures transversaux

Résultats de l'algorithme								
Profil	**N° acier**	**Posit. sur x (cm)**	**Prof. (cm)**	**Vitesse (cm/ns)**	**t0 (ns)**	**Prof. réelle (cm)**	**Erreur (mm)**	**Err. relative (%)**
Y1	1	7,3	4,7	10,7	0,790	4,7	0	**0,0**
	2	27,7	4,8	10,4		4,9	1	**2,0**
	3	47,9	4,3	9,9		4,8	5	**10,4**
	4	67,4	5,5	11,5		5,1	4	/
Y2	1	7	4,3	10,4	0,790	4,7	4	**8,5**
	2	27,5	4,3	10,1		4,7	4	**8,5**
	3	47,8	4,4	10,1		4,7	3	**6,4**
	4	67,3	5,5	11,5		5,1	4	/
Y3	1	7,6	4,1	10	0,790	4,5	4	**8,9**
	2	27,2	4,2	10		4,5	3	**6,7**
	3	47,9	4,5	10,4		4,5	0	**0,0**
	4	66,8	5,3	11,2		5,1	2	/
Y4 à Y10	0	/	/	/	/	/	/	/

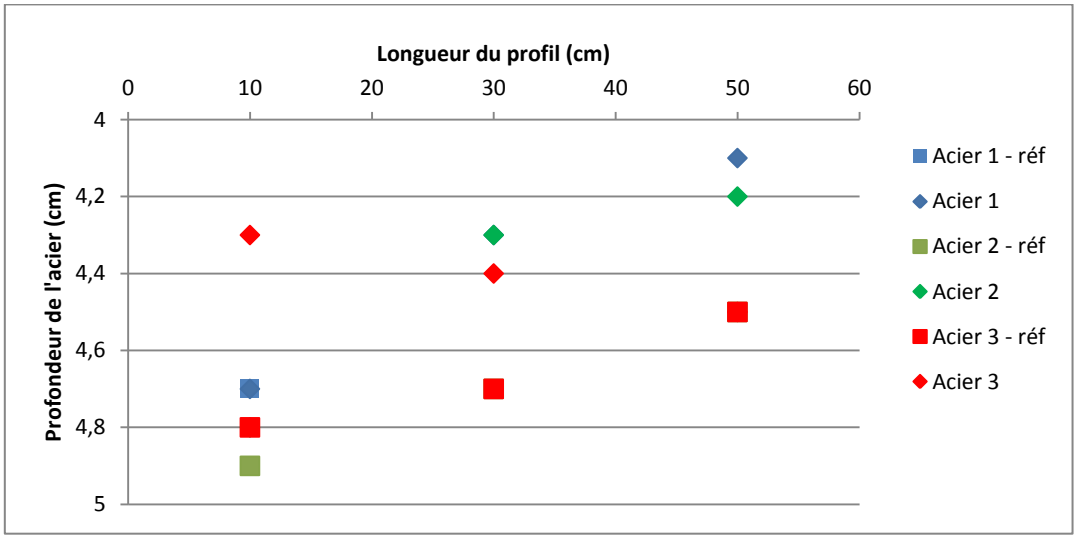


Figure 3.25: Comparaison des profondeurs calculées et réelles des aciers longitudinaux

Nous constatons que dans le cas des profils de mesures longitudinaux, en considérant l'ensemble des profils, l'erreur moyenne globale sur l'ensemble des aciers simples est de l'ordre de *1 mm*, et dans le second cas, autrement dit les profils de mesures transversaux, l'erreur globale est de *2,7 mm.* Cela donne une erreur moyenne relative de **3,5%** dans le cas

des armatures transversales situées à une profondeur moyenne de **3,4 cm**, et **5,7%** pour les armatures longitudinales enfouies à la profondeur moyenne de **4,8 cm**.

La cartographie des positions des aciers en surface (Figure 3.26) est tracée en superposant les positions des aciers (x) calculées par l'algorithme sur les axes de profils. Les coordonnées de début et de fin de profil sur la dalle sont préalablement notées par l'opérateur. Dans cette figure, nous avons affiché uniquement les quatre premiers profils transversaux, car à partir du quatrième profil il n'y a plus d'acier puisque les armatures longitudinales s'arrêtent au niveau de *x=60 cm*.

La Figure 3.26 correspond parfaitement à l'emplacement des armatures dans la dalle test présentée dans la partie 3.6.1, les espacements entre aciers sont de 20 cm dans les deux sens de mesures. Il faut noter que toutes les armatures sont des aciers simples, sauf le quatrième acier qui est un acier double dans la direction des armatures transversales, et un acier triple dans celle des armatures longitudinales.

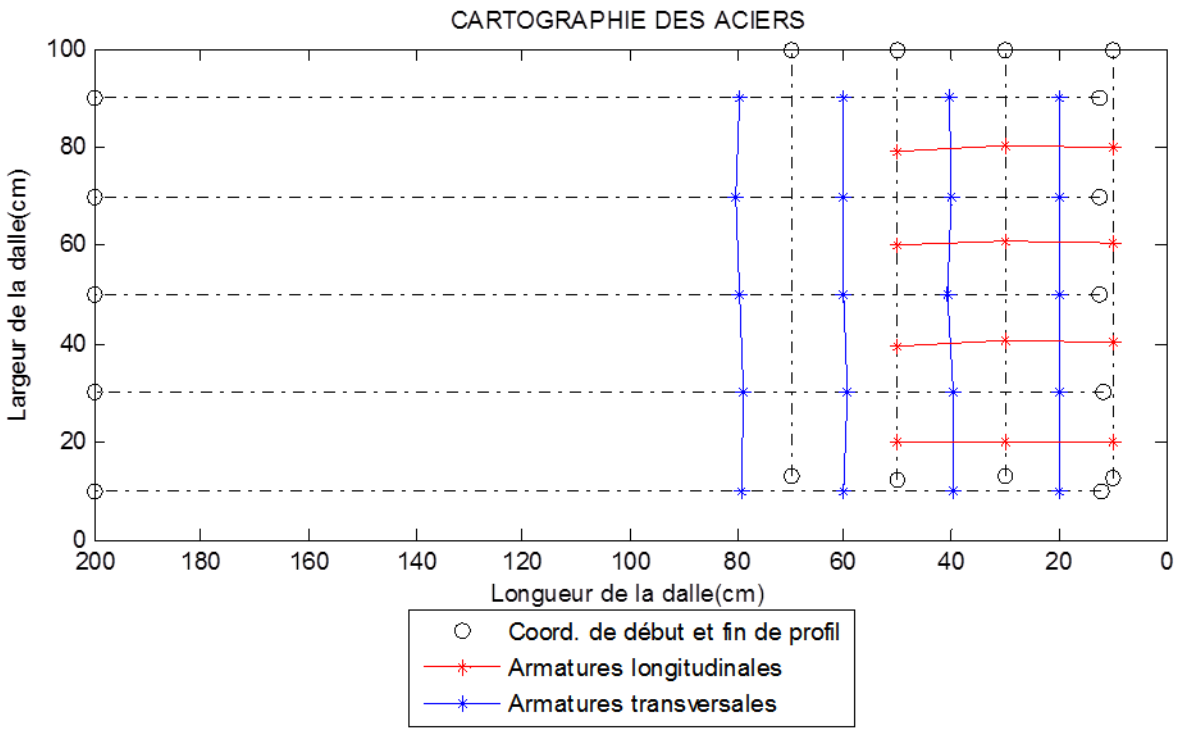


Figure 3.26 : Localisation des armatures longitudinales et transversales à la surface de la dalle test

Les profondeurs des aciers données par l'algorithme ont permis de tracer la cartographie des armatures de la dalle test en profondeur (Figure 3.27), et avoir ainsi une visualisation des

armatures dans la dalle en 3D. Les profondeurs calculées par l'algorithme sont cohérentes avec les profondeurs réelles des aciers.

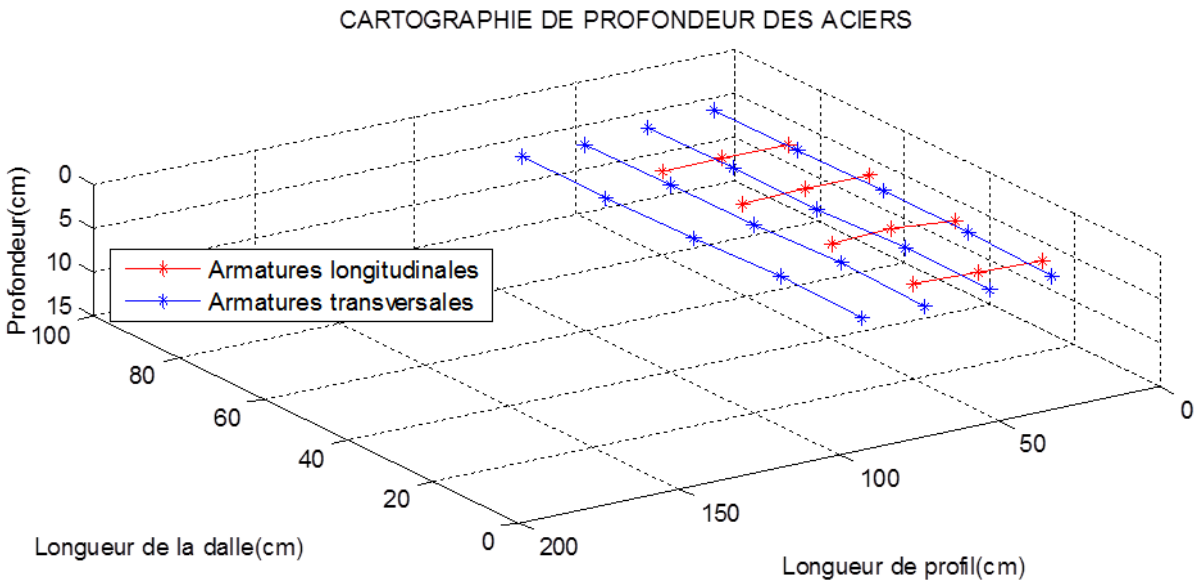


Figure 3.27: Localisation des armatures longitudinales et transversales en profondeur de la dalle test

Les Figure 3.28 et Figure 3.29 représentent les vitesses de propagation des ondes électromagnétiques dans le béton, respectivement à une profondeur moyenne de 3,4 cm et de 4.8 cm, correspondant respectivement à la position moyenne des armatures transversales et longitudinales.

La vitesse moyenne de propagation des ondes EM est de 10,2 cm/ns à la profondeur moyenne de 3,4 cm (à l'exception de la zone située au bord inférieur droit de la dalle dans laquelle la vitesse est de 10,9 cm/ns), tandis qu'elle est de 10,8 cm/ns à la profondeur moyenne de 4,8 cm. Cela veut dire que le béton est plus humide en surface qu'en profondeur, puisqu'en présence d'eau dans le béton la vitesse de propagation des ondes EM décroit dans ce matériau (Klysz 2004, Sbartaï 2005). Ces résultats sont attendus et justifiés étant donné que les conditions météorologiques étaient pluvieuses pendant la période où ont été effectuées les mesures.

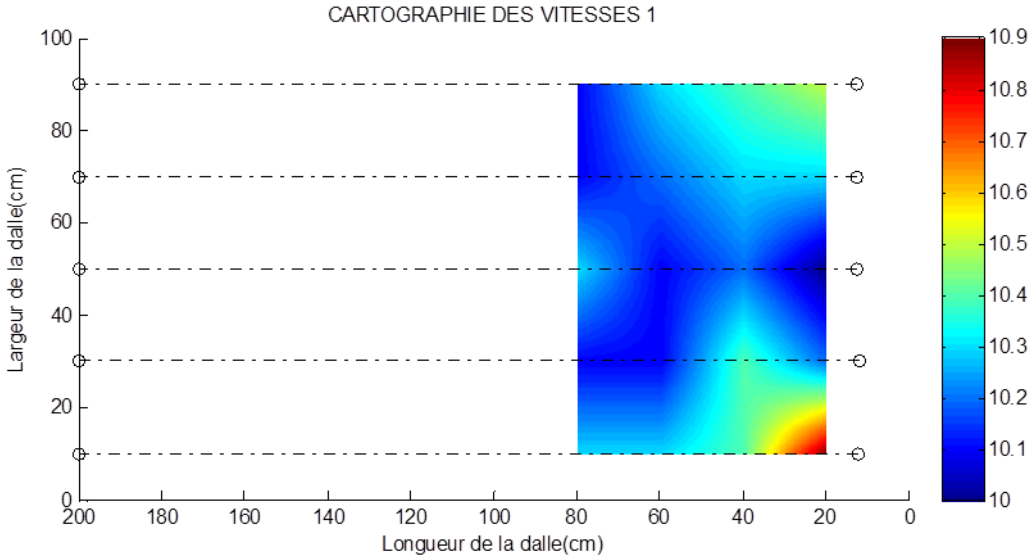


Figure 3.28 : Vitesses de propagation des ondes électromagnétiques dans le béton à une profondeur moyenne de 3,4 cm (vitesse dans la couche d'enrobage des armatures transversales)

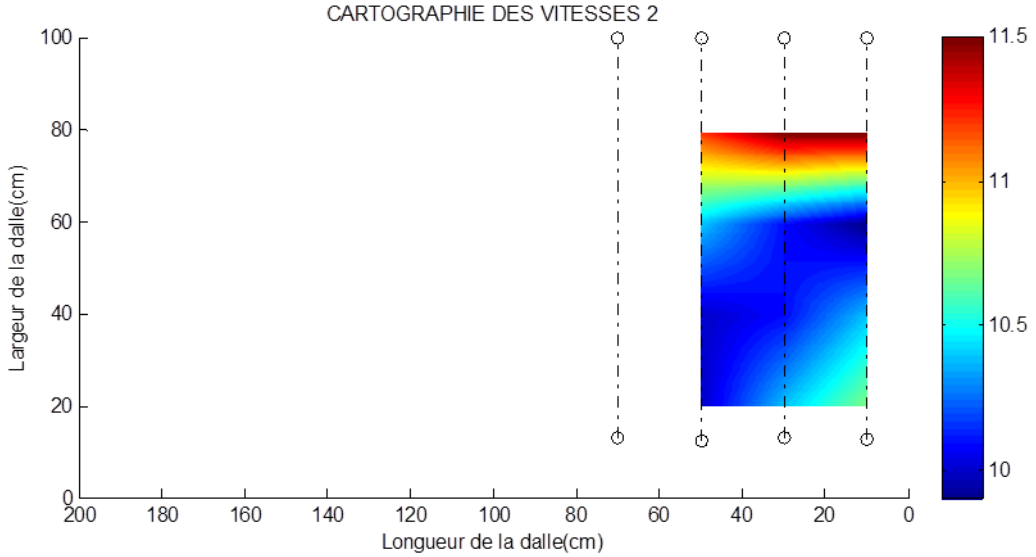


Figure 3.29 : Vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le béton à une profondeur moyenne de 4,8 cm (vitesse dans la couche d'enrobage des armatures longitudinales)

3.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté l'algorithme développé pour localiser les aciers du premier lit d'armatures d'éléments en béton armé et déterminer simultanément la vitesse de propagation des ondes EM dans le béton d'enrobage de chaque acier. Nous avons décrit dans un premier temps la méthode de localisation des armatures dans le plan, par la suite nous avons détaillé l'algorithme de détermination de la profondeur des aciers et de la vitesse.

Afin de valider expérimentalement l'algorithme, nous l'avons appliqué sur une dalle test en béton armé. Cette dalle contient des aciers longitudinaux et transversaux enfouis à différentes profondeurs connues, elle est stockée dans un endroit non abrité depuis plusieurs années, elle est donc exposée aux conditions climatiques comme peut l'être une structure réelle.

La procédure de mesures ainsi que les résultats obtenus sur la dalle test ont été présentés dans ce chapitre. Nous avons pu comparer les valeurs réelles des profondeurs des aciers dans l'élément aux valeurs calculées par l'algorithme, et de ce fait évaluer la performance de l'algorithme à déterminer l'emplacement des armatures en plan et en profondeur.

Enfin pour visualiser la disposition des armatures dans la dalle test et la distribution de la vitesse de propagation des ondes EM dans le béton au niveau des aciers, nous avons tracé différentes cartographies :

- Cartographie des positions des armatures en surface ;
- Cartographie des profondeurs des armatures ;
- Cartographie des vitesses de propagation des ondes EM dans le béton d'enrobage.

En plus d'une exécution très rapide, les avantages d'obtenir les positions des armatures du premier lit dans les trois dimensions sans la connaissance de paramètres liés à l'état du matériau sont bien évidents. En outre, nous verrons dans le chapitre suivant l'intérêt de la détermination des vitesses de propagation des ondes EM dans la couche d'enrobage autour de chaque acier pour caractériser la teneur en eau qui est un paramètre utile pour le diagnostic du béton d'enrobage.

Nous retenons de ce chapitre que l'algorithme ne requiert aucune étude préalable pour l'estimation de la vitesse de propagation des ondes EM dans le béton, ni la connaissance de paramètres décrivant l'état du matériau (constante diélectrique, état hydrique du béton, etc.)

comme c'est le cas dans l'application usuelle de la technique radar. De ce fait, le fonctionnement de l'algorithme est automatique et l'obtention de résultats peut donc être envisagée quasiment en temps réel.

Chapitre ***4***

Méthodologie de détermination de la teneur en eau à partir de la mesure de vitesse et mise en application de l'algorithme

CHAPITRE 4 : METHODOLOGIE DE DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN EAU À PARTIR DE LA MESURE DE VITESSE ET MISE EN APPLICATION DE L'ALGORITHME

4.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté l'algorithme développé permettant de localiser dans le plan et en profondeur les aciers du premier lit d'armatures d'un élément en béton armé, ainsi que la détermination de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans la couche d'enrobage de chaque acier. Par la suite nous avons présenté le dispositif d'acquisition et décrit la procédure de mesures. Enfin, nous avons validé expérimentalement l'algorithme sur une dalle test en béton armé dont les positions en plan et en profondeur des armatures sont connues, afin d'évaluer la fiabilité du programme.

En exploitant les résultats issus de la validation expérimentale, des cartographies de positionnement des armatures dans le plan et en profondeur ainsi que de vitesses de propagation des ondes EM ont été construites. L'intérêt de construire les cartographies de positionnement des aciers du premier lit d'armatures de la dalle en béton armé étant évident, en revanche la cartographie des vitesses n'est pas immédiatement exploitable pour le diagnostic. Nous allons donc voir dans ce chapitre l'utilité de connaître la valeur de la vitesse au-dessus de chaque acier.

Ce chapitre est découpé en deux grandes parties. Dans la première partie, nous présentons la procédure entreprise pour la caractérisation physique d'un corps d'épreuve en béton armé par des mesures radar. Cette procédure consiste à relier la mesure de la vitesse de propagation des ondes EM dans le béton à sa teneur en eau volumique. Dans cette perspective, un protocole expérimental a été réalisé afin d'établir une loi de calibration de la vitesse en fonction du degré de saturation du béton, qui pourra être utilisée pour convertir les vitesses mesurées en teneurs en eau volumiques.

Dans la seconde partie, nous allons mettre en application l'algorithme automatique que nous avons développé sur une maquette de dalle en béton armé à échelle réelle, afin de tester la robustesse de l'algorithme dans des conditions in situ.

4.2 DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN EAU À PARTIR DE LA MESURE DE VITESSE DE PROPAGATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

4.2.1 Plan expérimental

Afin de relier la teneur en eau du béton à la vitesse de propagation des ondes EM sur site, nous utilisons une méthode de calibration de la vitesse par mesures radar en transmission sur des carottes.

Dans le cadre de cette étude, deux corps d'épreuves identiques (D2 et D3) de dimensions 110x30x15 cm (Figure 4.1) ont été coulés en même temps qu'une dalle (D1) de 3 m de côtés que nous présenterons ultérieurement. Les trois dalles ont été confectionnées avec le même béton de porosité accessible à l'eau égale à 17,3%.

Les dalles D2 et D3 comportent 3 barres de Ø12 disposées à 2,4 cm, 3,4 cm et 4,4 cm, et espacées de 21 cm (Figure 4.1).

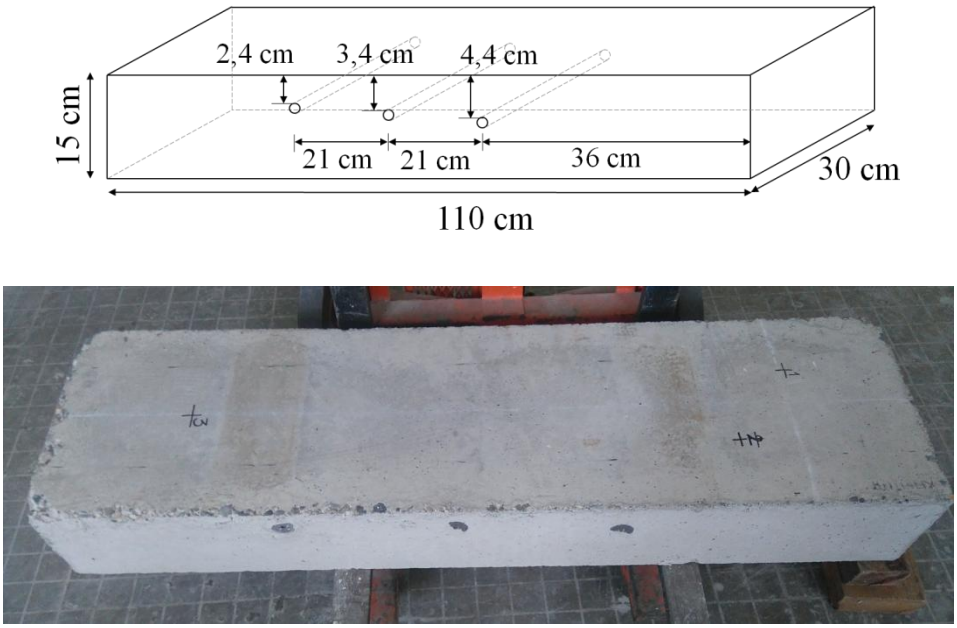


Figure 4.1 : Représentations schématique et photographique d'un corps d'épreuve D2 ou D3

4.2.1.1 Matériaux et formulation du béton

Dans le but d'avoir le même béton la dalle D1 et les corps d'épreuves D2 et D3 utilisés pour la calibration de la vitesse, ont été fabriqués en même temps avec un béton commercialisé de norme *BPS NF EN 206-1* fabriqué en centrale et dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Caractéristiques normatives et techniques du béton

FORMULE DU BÉTON			
Libellé commercial		CXB C20/25 XC1 G2	
Désignation de la norme		BPS NF EN 206-1	
Classe d'exposition		XC1	
Classe de résistance		C20	
Classe granulaire / Dmax		G2 / 14	
Consistance		S3	
Classe de chlorure		CL040	
Composants	**Fournisseurs**	**Origine**	**Qtité (KG)**
SA 0/4 RLX	CEMEX	SALLES-SUR-GARONNE	847
GA 4/14 RLX	CEMEX	SALLES-SUR-GARONNE	984
CEM I 52,5 N CE CP2 NF	LAFA	MARTRES-TOLOSANE	258
Filler calcaire	MEAC	ST-BEAT	86
ISOFLEX 771	ISOL	/	1,72 (0,50%)
Eau d'apport	EAU	/	203
CARACTÉRISTIQUES NORMATIVES			
Eeff/(C+kA) maximal		0,65	
Liant équivalent mini NF EN 206-1 (KG/m^3)		280	
A/(A+C) maximal		0,3	
Classe de résistance minimale (Mpa)		20	
CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES			
Eau totale (Kg)		205	
Eau efficace (Kg)		180	
Liant équivalent (Kg/m^3)		280	
Eeff/(C+kA)		0,64	
À/(A+C) (%)		0,25	
Addition correcteur (Kg)		0	
Masse volumique (Kg/m^3)		2381	
Taux de chlorure (%)		0,02	
Temps de malaxage (s)		55	

4.2.1.2 Mise en œuvre

Le béton a été mis en place dans les moules en une seule couche (Figure 4.2) en appliquant une vibration normale durant 15 secondes. Après coulage nous avons recouvert les dalles d'un film en Polyane afin de limiter l'évaporation de l'eau de gâchage et favoriser l'hydratation. Nous avons également fabriqué des éprouvettes cylindriques de diamètre 11 cm et de hauteur 22 cm pour les essais de caractérisation du béton à l'état durci.

Figure 4.2: Coulage des corps d'épreuves D2 et D3

4.2.1.3 Conditionnement des corps d'épreuves

Après décoffrage, les corps d'épreuves ont été entreposés à l'extérieur à l'abri du soleil dans les mêmes conditions que la dalle D1 et recouverts d'une bâche en Polyane pour limiter l'évaporation d'eau pendant trois semaines.

Les corps d'épreuves D2 et D3 sont conditionnés à 2 états différents pendant 4 mois. D2 est mis à saturation dans un bac contenant de l'eau saturée à la chaux pour éviter la lixiviation du béton, en prenant soin de garder environ 2 cm du corps d'épreuve en dehors de l'eau, ce procédé permet d'éviter l'emprisonnement de l'air et de garantir ainsi une meilleure saturation (Figure 4.3). Le bac est recouvert d'une bâche en Polyane et d'un couvercle pour empêcher la perte d'eau par évaporation. Quant à D3, il est mis dans une étuve à température constante de 80°C pendant quatre mois avec un suivi de masse jusqu'à stabilisation.

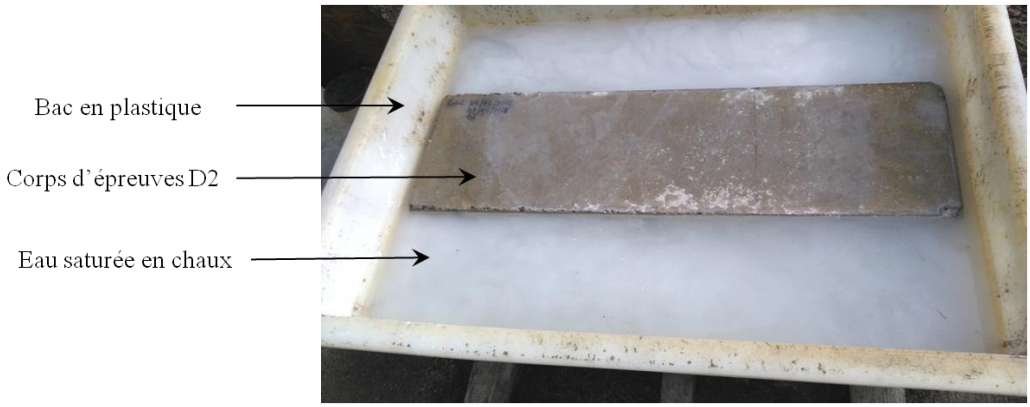


Figure 4.3: Mise à saturation en eau du corps d'épreuve D2

4.2.2 Dispositifs et méthodologie de calibration de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques pour l'estimation de la teneur en eau du béton

4.2.2.1 Présentation du système de mesure radar

Nous utilisons pour les mesures sur les corps d'épreuves et les carottes le système radar *SIR 30* GSSI® (Figure 4.4) présenté dans le chapitre précédent (3.6.2).

Figure 4.4: Représentation du radar SIR® 30, de gauche à droite, vue de face et vue d'arrière

Le système radar est utilisé avec deux procédés de mesures, autrement dit la mesure au dispositif à deux récepteurs sur corps d'épreuves (un émetteur et deux récepteurs fixés dans un boitier à des distances invariantes) (Figure 4.5), et la mesure en transmission sur carottes avec l'utilisation d'une antenne comme émetteur et une autre comme récepteur (Figure 4.6). Les antennes sont reliées à des boites contenant l'électronique de l'antenne via des câbles. Les paramètres d'acquisitions sont identiques afin de permettre la comparaison entre les résultats obtenus dans les deux procédés de mesures.

Figure 4.5 : Dispositif de mesure utilisé sur les corps d'épreuves

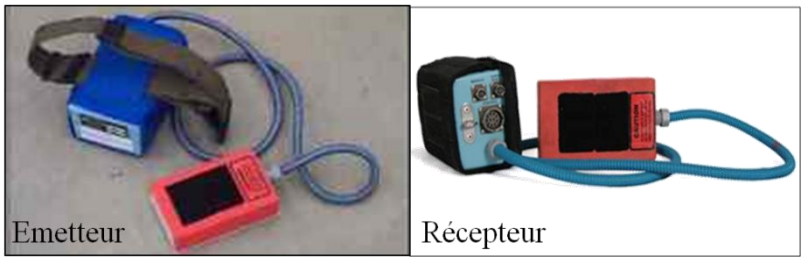
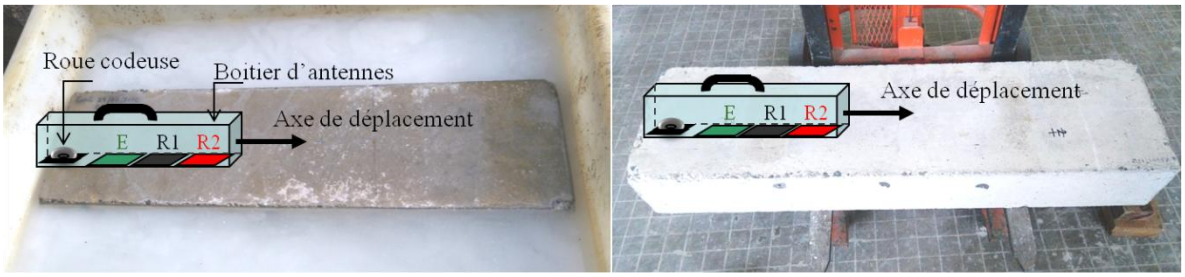


Figure 4.6: Antenne émettrice et réceptrice utilisées pour les mesures en transmission sur carottes

4.2.2.2 Calibration de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le béton par mesure radar en transmission en laboratoire

Dans cette partie nous allons décrire la méthode utilisée pour estimer la teneur en eau à partir de mesures radar. Pour cela nous allons établir une loi de calibration qui relie la vitesse de propagation des ondes EM dans le béton et le degré de saturation.

Une fois les états de conditionnement souhaités atteints pour D2 et D3, autrement dit état saturé (Sr≈100%) pour D2 et état sec (Sr≈0%) pour D3, nous avons effectué des mesures avec le dispositif radar bi-récepteur sur chaque corps d'épreuve (Figure 4.7). Ensuite, nous avons déterminé les vitesses de propagation des ondes EM du béton au voisinage des aciers à l'état sec et saturé en utilisant l'algorithme que nous avons développé.



Corps d'épreuve D2 à l'état saturé (dans un bac d'eau)

Corps d'épreuve D3 à l'état sec (à la sortie de l'étuve)

Figure 4.7: Conditionnement des corps d'épreuves, respectivement à l'état saturé (à gauche) et sec (à droite)

Par la suite, des prélèvements cylindriques ont été réalisés sur les deux corps d'épreuves par carottage sous l'eau (Figure 4.8).

Selon la norme française (NF EN 12504-1, 2000), le diamètre d'une carotte utilisée pour des essais mécaniques ou physiques doit être d'au moins 3 fois le diamètre du plus gros granulat du béton, de l'ordre de 20 mm dans le cas des ouvrages classiques du génie civil. Et l'élancement de la carotte cylindrique doit être égal à 2 fois son diamètre. En suivant les consignes de la norme, nous avons prélevé 3 carottes dans chaque corps d'épreuve (Figure 4.8), dont le diamètre est égal à 7,4 cm et d'une hauteur de 15 cm pour réaliser des mesures radar en transmission ainsi que des essais complémentaires.

Figure 4.8 : Carottage sous eau du corps d'épreuve D3

Afin d'adapter les mesures radar en transmission aux dimensions des carottes, nous utilisons 4 panneaux en bois de 1 m^2 en guise de support pour la carotte, ils ont été troués au centre avec

un diamètre de 8 cm pour accueillir la carotte. Ces panneaux ont été recouverts de feuilles adhésives en aluminium réfléchissantes pour servir d'écran et éviter que les ondes EM qui ne pénètrent pas dans la carotte soient perçues par le récepteur. (Figure 4.9 à droite).

La face latérale de chaque carotte a été également recouverte de feuilles adhésives en aluminium, ce revêtement permet, dans ce cas, de guider les ondes à travers la carotte de l'émetteur jusqu'au récepteur afin d'éviter une importante perte d'énergie (Figure 4.9).

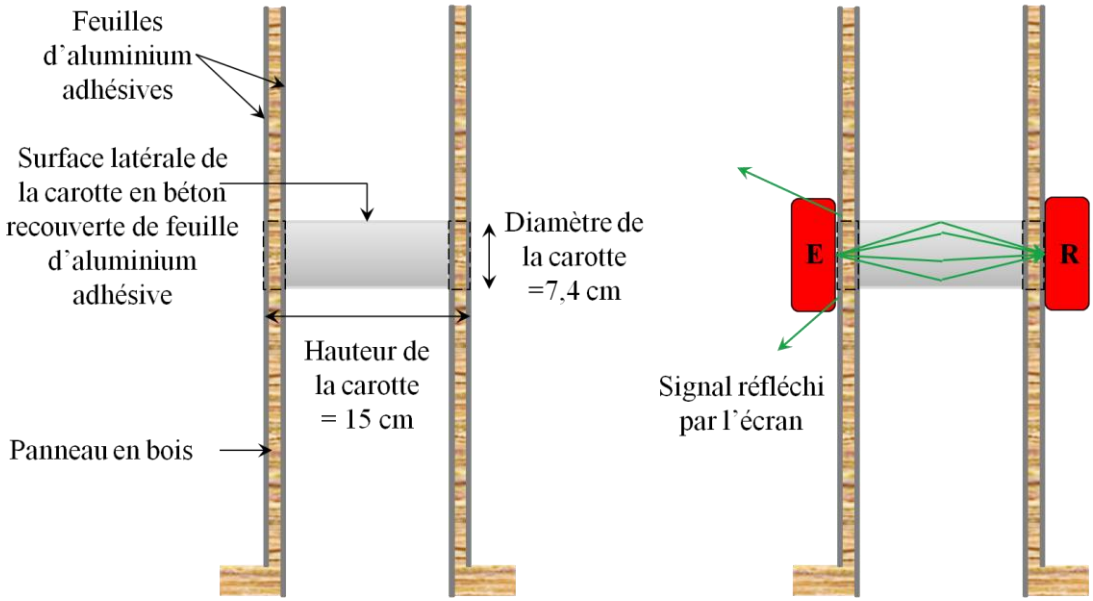


Figure 4.9 : Panneaux en bois comme support pour la carotte à gauche, à droite la mesure en transmission avec un emetteur (E) et un récepteur (R) sur une carotte en béton

deux panneaux sont disposés parallèles l'un par rapport à l'autre, distants de 15 cm environs permettant ainsi de positionner la carotte dans les compartiments conçus à cet effet (Figure 4.10).

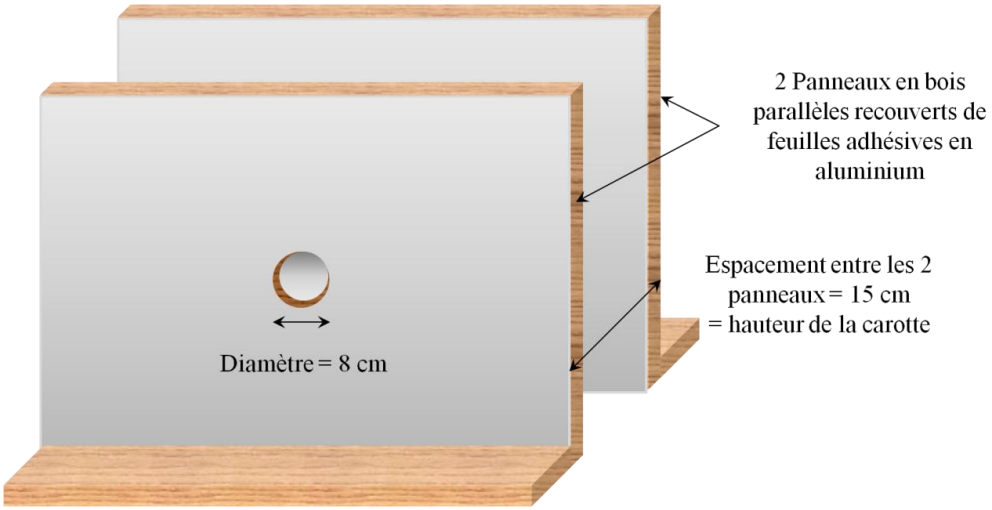


Figure 4.10 : Disposition des deux panneaux pour les mesures au radar en transmission

L'émetteur est positionné sur une des surfaces circulaires de la carotte et le récepteur sur l'autre, comme illustré dans le schéma de droite dans la Figure 4.9. Une mesure consiste à effectuer un nombre d'acquisitions en restant immobile dans cette position pendant quelques secondes. La longueur de la carotte étant connue, la mesure du temps de vol émetteur-récepteur permet de déterminer la vitesse de propagation des ondes EM dans le béton.

Comme nous le savons, les systèmes radar ne donnent pas l'instant d'émission du signal émis par l'antenne émettrice, il est donc impératif de recaler les signaux dans le temps à leur moment d'émission t_0, ce recalage sera fait sur des mesures effectuées dans l'air. Pour ça, on positionne deux autres panneaux parallèles l'un à l'autre en continuité des panneaux portants la carotte, on place dans le compartiment un tube vide, de même longueur que la carotte, recouvert de feuille d'aluminium adhésive. Ensuite, on déplace les antennes vers le tube vide pour faire des acquisitions dans l'air à la suite des acquisitions dans la carotte, sans interrompre l'enregistrement pour avoir le même moment d'émission pour les signaux enregistrés dans le béton que ceux enregistrés dans l'air.

L'instant d'émission du signal émis par l'antenne émettrice t_0 est alors calculé comme suit :

$$t_0 = \frac{h_{tube}}{v_{air}} - t_{pic\ air} \qquad \text{(eq. 4.1)}$$

Avec :

h_{tube} : la hauteur du tube identique à la hauteur de la carotte en béton égale à 15 cm, elle correspond à la distance parcourue par l'onde ;

v_{air} : la vitesse de propagation des ondes EM dans l'air, égale à 30 cm/ns ;

$t_{pic\ air}$: le temps d'arrivée du premier pic dans les signaux enregistrés dans l'air (Figure 4.11 en haut).

Par la suite, nous calculons la vitesse de propagation dans le béton :

$$v_{béton} = \frac{h_{carotte}}{t_{pic\ béton} + t_0} \qquad \text{(eq. 4.2)}$$

$h_{carotte}$: la hauteur de la carotte en béton égale à 15 cm ;

$t_{pic\ béton}$: le temps d'arrivée du premier pic dans les signaux enregistrés dans le béton (Figure 4.11 en bas).

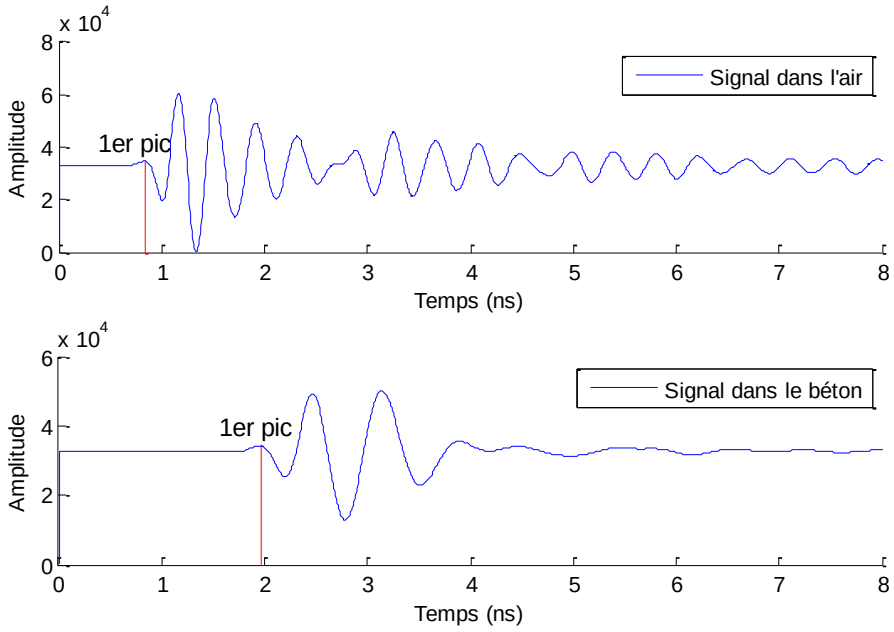


Figure 4.11: Temps d'arrivée du premier pic dans le signal enregistré dans l'air (en haut) et dans le béton (en bas)

4.2.3 Résultats de la calibration

Le tableau ci-dessous regroupe les résultats de l'ensemble des mesures effectuées sur les carottes et les corps d'épreuves pour les différents états de conditionnement.

En premier, nous remarquons que la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques diminue lorsque le degré de saturation augmente, en constatant que les vitesses déterminées pour les deux carottes et les corps d'épreuves sont quasiment identiques et cela quel que soit l'état de conditionnement (degré de saturation). Par la suite, on note que les écarts-types sont tous très faibles (≤ 0,09 cm/ns), cela témoigne de la répétabilité des mesures de vitesse en transmission sur les carottes. Ces faibles écarts-types traduisent aussi la bonne précision de la détermination du temps d'arrivée de l'onde dans les deux procédés de mesures.

Tableau 4.2: Résultat des mesures sur les carottes et sur les corps d'épreuves en fonction du degré de saturation (%)

		Degré de saturation Sr (%)									
Technique de mesure	**Nom**	**0**		**35**		**55**		**68**		**98**	
		Vitesse (cm/ns)	**Ecart type (cm/ns)**	**Vitesse (cm/ns)**	**Ecart type (cm/ns)**	**Vitesse (cm/ns)**	**Ecart type (cm/ns)**	**Vitesse (cm/ns)**	**Ecart type (cm/ns)**	**Vitesse (cm/ns)**	**Ecart type (cm/ns)**
Transmission	Carotte 1	13,23	0,00	11,16	0,06	10,34	0,08	10,05	0,05	9,20	0,02
	Carotte 2	13,14	0,09	11,22	0,07	10,32	0,00	10,21	0,00	9,22	0,04
Double récepteurs	Corps d'épreuve	13,27	0,07	/	/	/	/	/	/	9,00	0,06

La Figure 4.12 représente les vitesses de propagation des ondes électromagnétiques obtenues par mesures en transmission et par mesures au dispositif radar bi-récepteur, respectivement effectuées sur les carottes et les corps d'épreuves. Ces résultats nous ont permis de tracer une loi (linéaire) de calibration pour la carotte 1 et la carotte 2, respectivement :

$$v = -0{,}0408 \times Sr + 12{,}887 \qquad \text{(eq. 4.3)}$$

$$v = -0{,}0395 \times Sr + 12{,}844 \qquad \text{(eq. 4.4)}$$

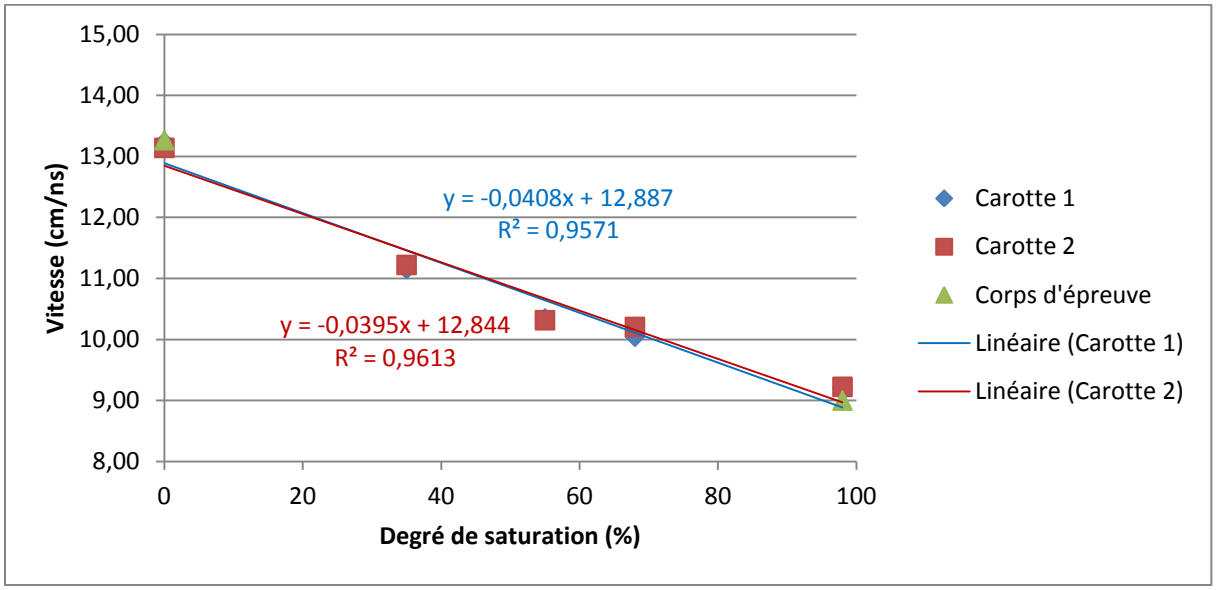


Figure 4.12 : Résultats des mesures effectuées sur les carottes et les corps d'épreuves – Vitesse de propagation des ondes électromagnétiques en fonction du degré de saturation

Les deux équations ci-dessus (eq. 4.3 et eq. 4.4) sont sensiblement similaires, cela signifie que le matériau des deux carottes est identique. De ce fait, les lois de calibration issues des mesures réalisées sur la carotte 1 et la carotte 2 peuvent être considérées comme identiques. Afin d'unifier ces deux lois, nous utiliserons une loi unique représentant la moyenne des deux équations, telle que :

$$v = -0{,}0402 \times Sr + 12{,}866 \qquad \text{(eq. 4.5)}$$

La teneur en eau volumique du béton (w) est calculée en fonction de la porosité des corps d'épreuves (égale à 17,3%) et du degré de saturation (Sr). Par conséquent, nous obtenons la loi reliant la vitesse de propagation des ondes dans le béton à la teneur en eau du béton. Celle-ci s'écrit :

$$v = -0{,}232 \times w + 12{,}866 \qquad \text{(eq. 4.6)}$$

La relation (eq. 4.6) permet d'estimer la teneur en eau du béton à partir de la mesure de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le béton.

L'application de ce procédé sur site va consister à faire un prélèvement sur l'ouvrage par carottage que l'on conditionnera suivant les deux états secs et saturés compte tenu de la linéarité de la loi de calibration. Ensuite il suffit d'effectuer des mesures en transmission sur les carottes pour ces deux états de conditionnement, pour établir la loi reliant vitesse et teneur

en eau. Cette loi de calibration permet donc de convertir la vitesse déterminée sur site avec le dispositif radar bi-récepteur, en teneur en eau volumique (Figure 4.13).

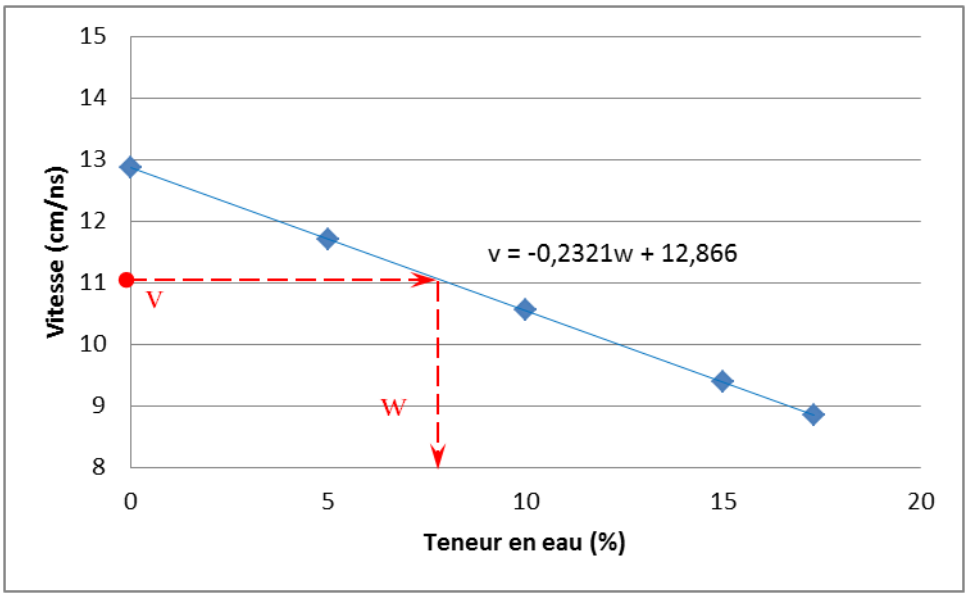


Figure 4.13: Loi reliant vitesse et teneur en eau volumique, estimation de la teneur en eau à partir de la vitesse mesurée sur site

Avec la loi de calibration, la teneur en eau estimée à partir de la vitesse déterminée par l'algorithme pour le corps d'épreuve à l'état saturé est égale à 16,95%. Tandis que sa valeur réelle, calculée avec le volume d'eau et le volume total de la dalle, est égale à 17,17% (Tableau 4.3).

Tableau 4.3 : Détermination de la teneur en eau réelle

Masse (kg)			**Volume (m3)**		**Teneur en eau volumique (%)**
Sèche	**Saturée**	**Eau**	**Eau**	**Dalle**	
110,22	118,72	8,5	0,0085	0,0495	17,17

4.3 MISE EN APPLICATION DE L'ALGORITHME SUR UNE MAQUETTE D'ÉCHELLE 1/1

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté en détail le fonctionnement de l'algorithme que nous avons développé. Cet algorithme permet de localiser dans le plan et en profondeur les armatures d'un élément en béton armé et de déterminer la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans la couche d'enrobage de chaque acier. Son fonctionnement est automatique et l'obtention des résultats s'effectue rapidement et sans aucun a priori sur le milieu ausculté (pas de nécessité d'estimer la vitesse de propagation en particulier).

La validation de l'algorithme a été réalisée sur une dalle test en béton armé dont les positions des armatures en surface et en profondeur sont connues. Nous avons montré que l'algorithme donne de bons résultats puisque l'erreur relative moyenne sur la profondeur moyenne des aciers de 4,2 cm ne dépasse pas 5 %.

Dans les paragraphes suivants, nous mettrons en application l'algorithme sur la dalle en béton armé (D1).

4.3.1 Présentation de la dalle maquette

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la maquette de dalle (D1) a été coulée en même temps et avec le même béton que les corps d'épreuves (D2 et D3), que nous avons utilisés pour la mise au point de la procédure de calibration de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques en vue de l'estimation de la teneur en eau du béton. Cette dalle a 3 m de coté pour une épaisseur de 15 cm. Elle est ferraillée avec un treillis soudé inférieur, et trois treillis soudés (ST 65 C) supérieurs (diamètre de 9 mm et mailles de 10x10 cm). Selon le plan d'exécution, les treillis supérieurs sont disposés à des profondeurs différentes, respectivement 2, 5 et 8 cm (Figure 4.14).

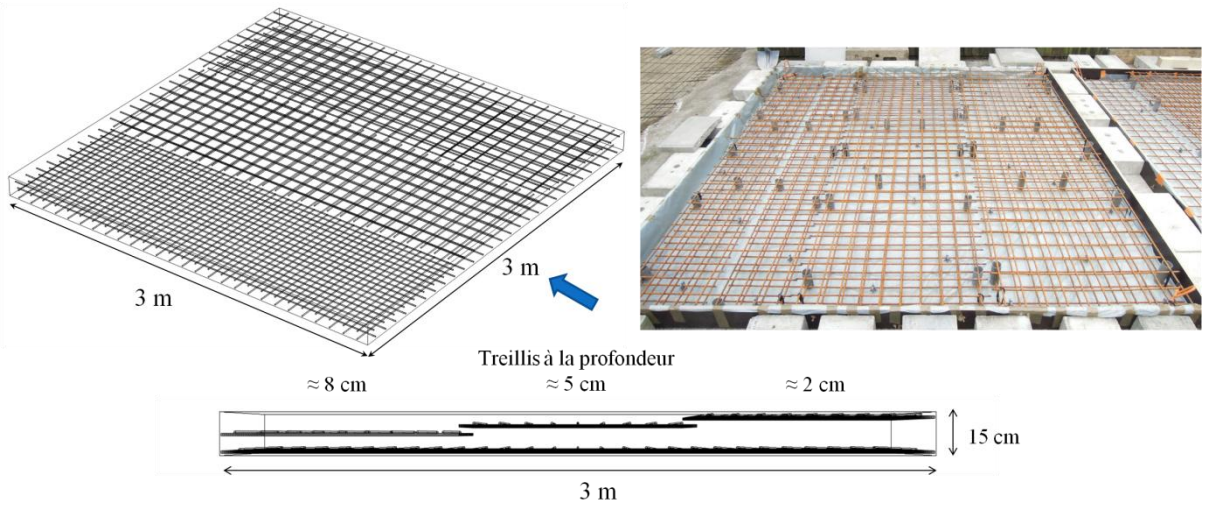


Figure 4.14 : Disposition et profondeurs du ferraillage de la maquette en béton armé avant coulage

La dalle (D1) est entreposée à l'extérieur du laboratoire, après coulage elle a été recouverte d'une bâche en Polyane pendant quelques jours pour minimiser la perte d'eau de gâchage par évaporation et de ce fait favoriser l'hydratation du béton.

4.3.2 Paramètres d'acquisitions et disposition des profils de mesures sur la maquette

Les acquisitions sur la maquette de dalle en béton armé ont été effectuées avec le système radar présenté précédemment dans le chapitre 3 (3.6.2), relié au dispositif contenant deux antennes qui a été fabriqué dans notre laboratoire (Figure 4.5).

Les paramètres d'acquisitions radar sont :

Tableau 4.4 : Paramètres de configuration du radar

Échantillonnage		***Range (ns)***
Horizontal (Scans/m)	***Vertical (Samples/scan)***	***Fenêtre d'écoute***
1000	512	8

Après l'installation et la mise en route du système radar, nous le laissons en fonctionnement une trentaine de minutes avant de commencer les acquisitions afin de garantir une bonne stabilité des signaux (temps de chauffe).

Les mesures ont été effectuées suivant des profils linéaires selon deux directions : longitudinale et transversale. Les profils réalisés suivant chaque direction sont parallèles entre

eux et espacés de 30 cm. Le premier profil longitudinal est distant de 35 cm du bord le plus proche et le premier profil transversal est distant de 31 cm du bord (Figure 4.15). Nous avons au total 18 profils longitudinaux et transversaux, toutes ces acquisitions ayant été faites le même jour. La température au moment des mesures était d'environ 24°C, avec un taux d'humidité relative d'environ 70 %.

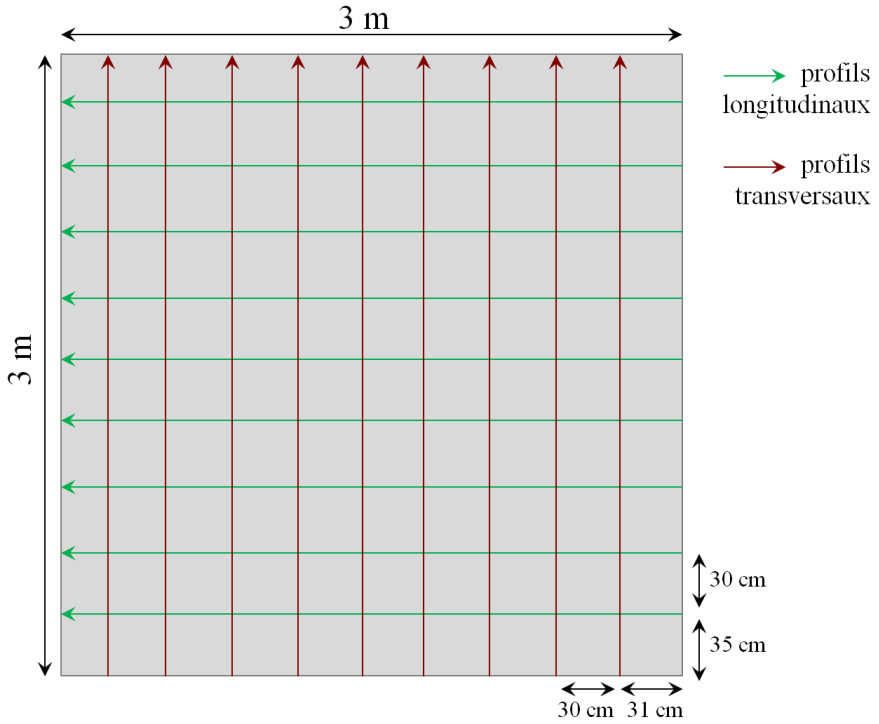


Figure 4.15 : Emplacement des profils de mesures longitudinaux et transversaux sur la maquette D1

4.3.3 Cartographie des aciers

Nous avons appliqué l'algorithme sur les signaux radar enregistrés pour chaque profil de mesures. Nous avons obtenu pour chaque profil le nombre d'aciers détectés, leurs positions dans le plan, leurs profondeurs et la vitesse moyenne de propagation des ondes électromagnétiques dans la couche d'enrobage de chaque acier. A titre d'exemple, dans le Tableau 4.5 sont représentés des résultats de l'algorithme sur le 1er profil longitudinal.

Tableau 4.5 : Résultats de l'algorithme sur le 1er profil longitudinal

N° acier	Position de l'acier		Vitesse (cm/ns)
	Surface (cm)	Profondeur (cm)	
1	13,9	2,4	10,2
2	23,9	2,6	10,1
3	33,4	2,4	9,8
4	43,3	2,6	10,2
5	53,4	2,6	10,6
6	63,4	2,5	10,4
7	73,7	2,3	11
8	83,5	2,1	10,9
9	93,9	4,7	9,5
10	103,3	4,8	9,7
11	112,9	5,1	9,9
12	123,8	5,4	10,2
13	133,3	5,4	10
14	143,6	5,2	9,7

N° acier	Position de l'acier		Vitesse (cm/ns)
	Surface (cm)	Profondeur (cm)	
15	153,4	5,7	10,1
16	163,1	6	10,3
17	173,5	5,8	10,1
18	183,6	5,9	10,3
19	193,2	8,2	9,6
20	204,1	9	10,3
21	213,4	9	10,3
22	223,5	8,5	9,7
23	234	9	10,2
24	243,1	9	10,2
25	253,2	8,6	9,9
26	263,2	8,9	10,3
27	273,9	8,9	10,6

En analysant les positions des aciers dans le plan, nous remarquons que l'espacement entre deux aciers successifs est très régulier et fait quasiment 10 cm (Figure 4.16), ce qui est conforme à la taille des mailles du treillis utilisé comme ferraillage de la maquette. En ce qui concerne les profondeurs des aciers, nous retrouvons la disposition des treillis en escaliers (Figure 4.17) comme dans le plan d'exécution de la maquette.

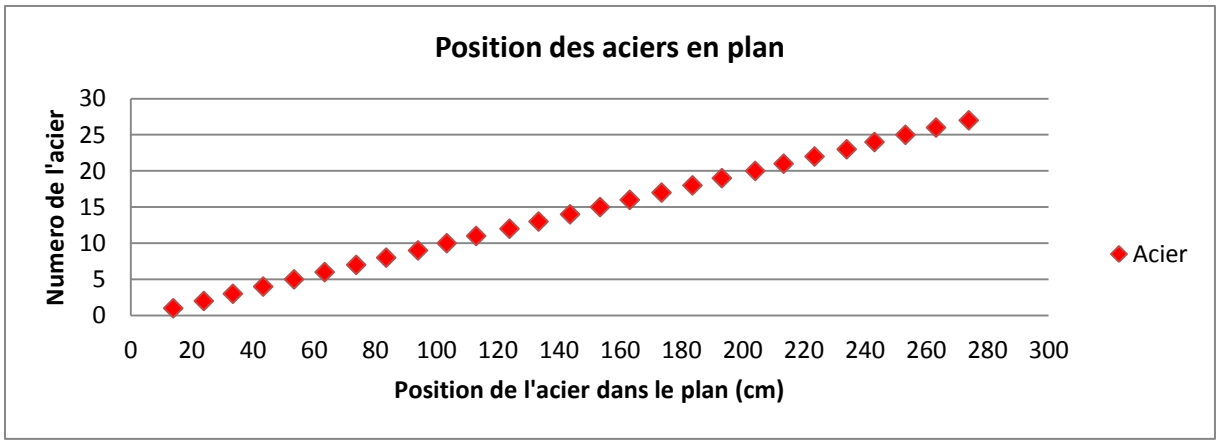


Figure 4.16 : Positions des aciers dans le plan - résultats du 1er profil longitudinal

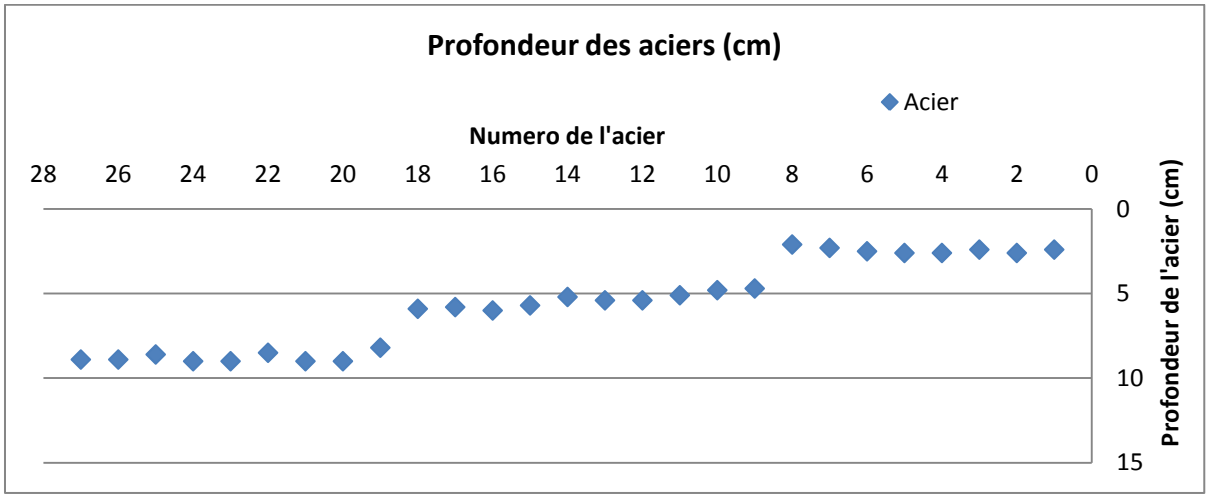


Figure 4.17 : Profondeurs des aciers - résultats du 1er profil longitudinal

Après avoir recueilli tous les résultats donnés par l'algorithme, nous construisons la cartographie des armatures dans le plan. Les aciers transversaux et longitudinaux sont représentés, respectivement, dans la Figure 4.18 et la Figure 4.19.

L'emplacement d'un acier dans la cartographie (* bleu pour le transversal et * rouge pour le longitudinal) est lié à la position du profil sur la dalle. Afin de suivre un tracé linéaire lors des mesures (représentée dans les figures par le trait pointillé noir), les profils ont été tracés sur la dalle avant de commencer les acquisitions. Ainsi, les coordonnées de début et de fin des profils correspondant respectivement, au début et à la fin des acquisitions sont connues. Ces coordonnées sont représentées par un cercle noir dans les cartographies.

Sur la Figure 4.18 et la Figure 4.19, nous remarquons que les aciers ne sont pas toujours rectilignes. Nous savons néanmoins que les espacements des aciers dans quelques mailles du treillis ne sont pas égaux à 10 cm, ce qui crée forcément un décalage sur la position de l'acier.

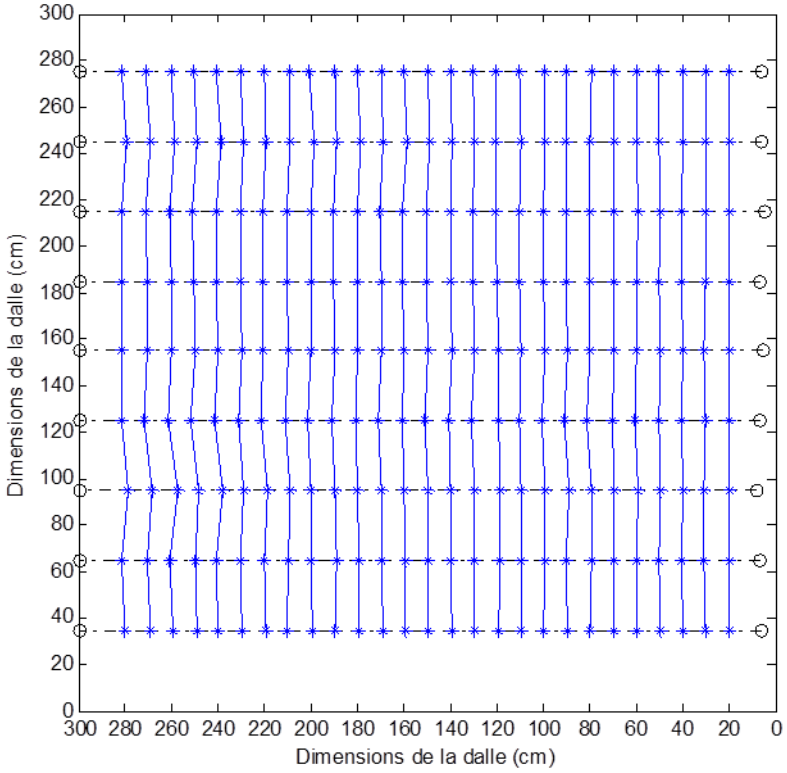


Figure 4.18 : Cartographie des armatures transversales

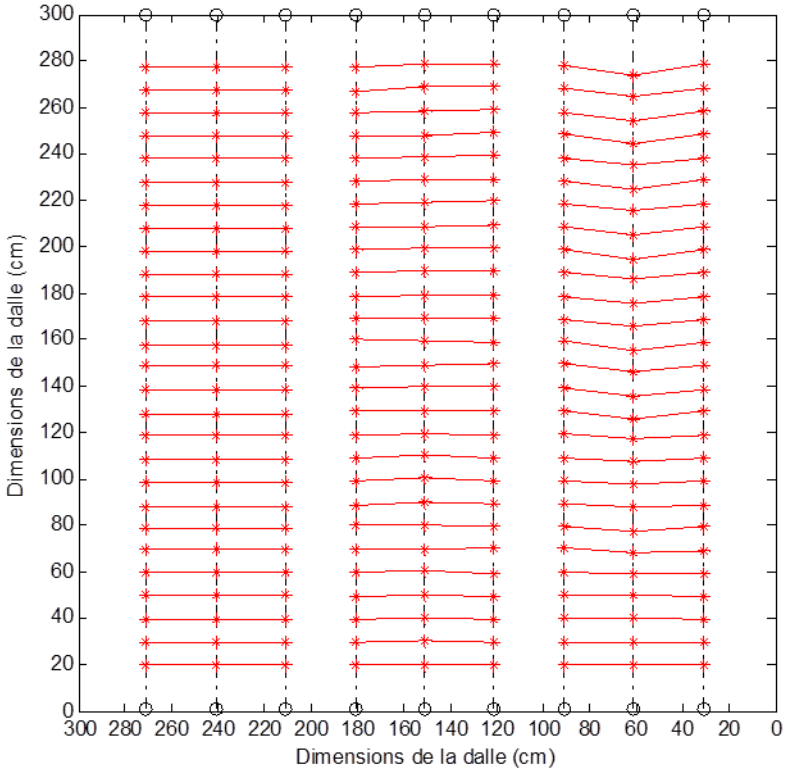


Figure 4.19 : Cartographie des armatures longitudinales

La superposition de la Figure 4.18 et de la Figure 4.19 constitue la cartographie des aciers du premier lit d'armatures de la dalle D1 (Figure 4.20). Cette cartographie renseigne sur la distribution globale du ferraillage dans la dalle, elle met en évidence les croisements entre les aciers longitudinaux et transversaux et permet de vérifier la conformité de la disposition des armatures par rapport aux plans de ferraillage.

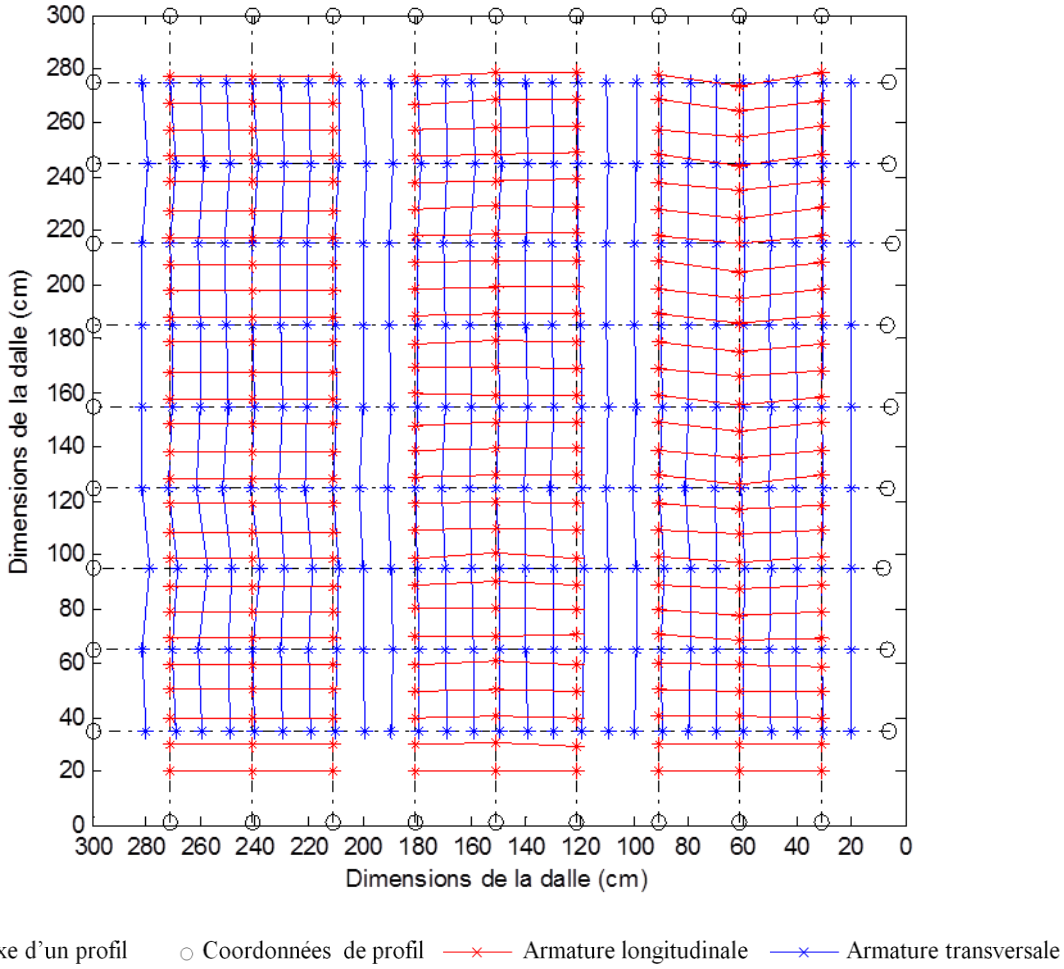


Figure 4.20 : Cartographie des aciers du premier lit d'armatures de la dalle D1

Comme pour les positions des aciers dans le plan, nous traçons les cartographies des profondeurs des aciers transversaux (Figure 4.21) et longitudinaux (Figure 4.22). En superposant ces deux cartographies, nous obtenons la Figure 4.23 représentant la cartographie des profondeurs des aciers du premier lit d'armatures de la dalle.

Dans la Figure 4.21, on remarque clairement l'ondulation du premier et du deuxième treillis (aciers transversaux) que l'on retrouve aussi dans la Figure 4.22 (aciers longitudinaux). Les ondulations sont provoquées d'une part par l'affaissement du treillis sous l'effet de son propre

poids avant le coulage, et d'autre part par le soulèvement du treillis au niveau des cales qui sont supposées le maintenir en place à la profondeur correspondante, probablement pendant le coulage.

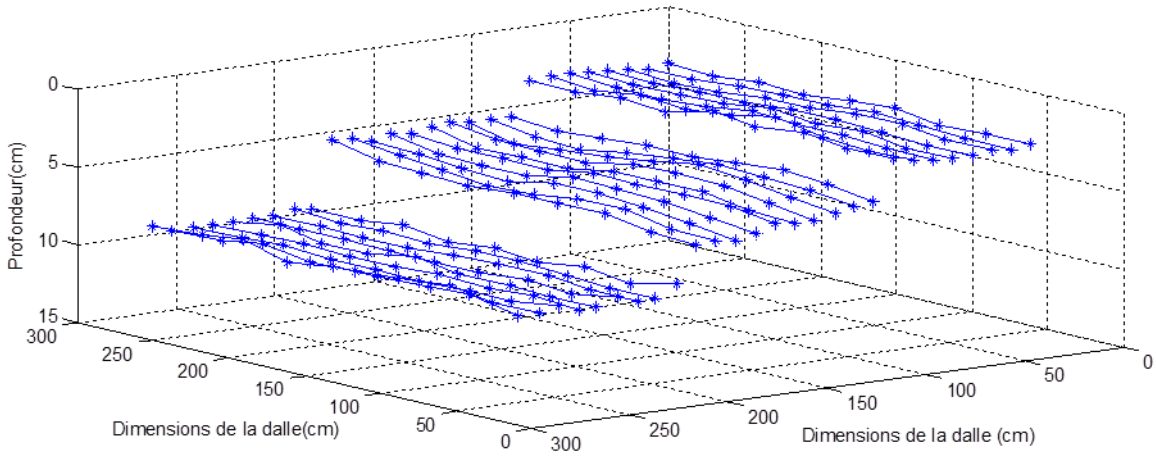


Figure 4.21 : Cartographie des profondeurs des armatures transversales de la dalle D1

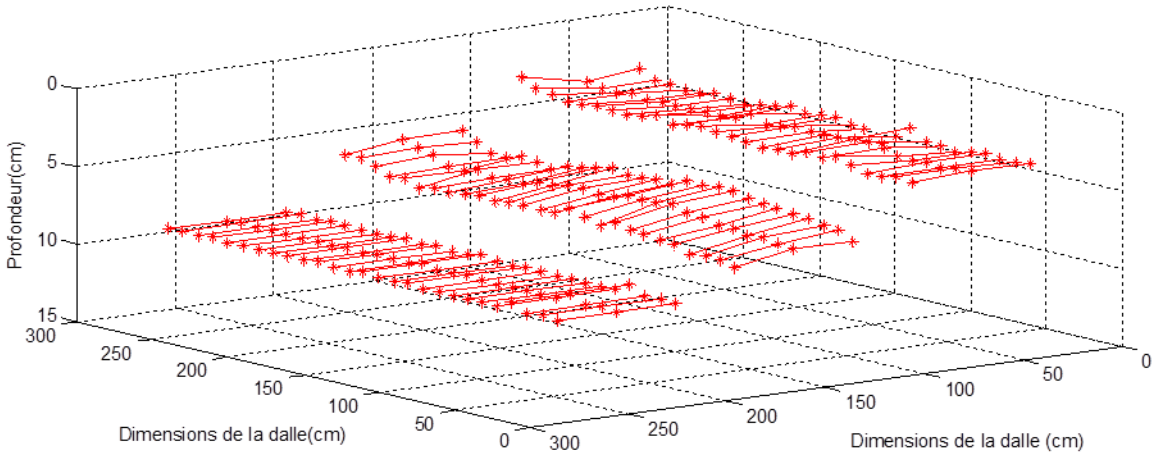


Figure 4.22 Cartographie des profondeurs des armatures longitudinales de la dalle D1

Dans la cartographie des profondeurs des aciers (Figure 4.23), nous avons noté la cohérence et la pertinence des résultats, car les aciers transversaux se superposent parfaitement sur les aciers transversaux. Cette cartographie permet d'avoir une vision de la disposition des armatures dans le volume de la dalle.

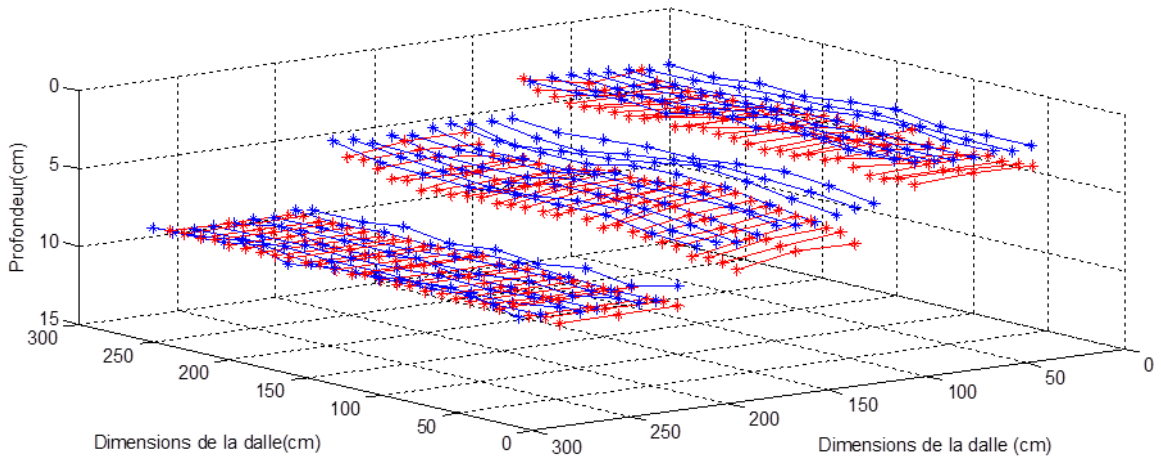


Figure 4.23 : Cartographie des profondeurs des armatures de la dalle D1

Une comparaison des profondeurs des aciers déterminées par l'algorithme et celles mesurées avec un Ferroscan Hilti® a été réalisée. Les profondeurs des aciers ont été mesurées par le Ferroscan en introduisant le diamètre des aciers (9 mm) et l'épaisseur de la dalle (15 cm). Les profils de mesures ont été effectués sur la dalle de 3 m de coté, leur emplacement est représenté dans la Figure 4.24.

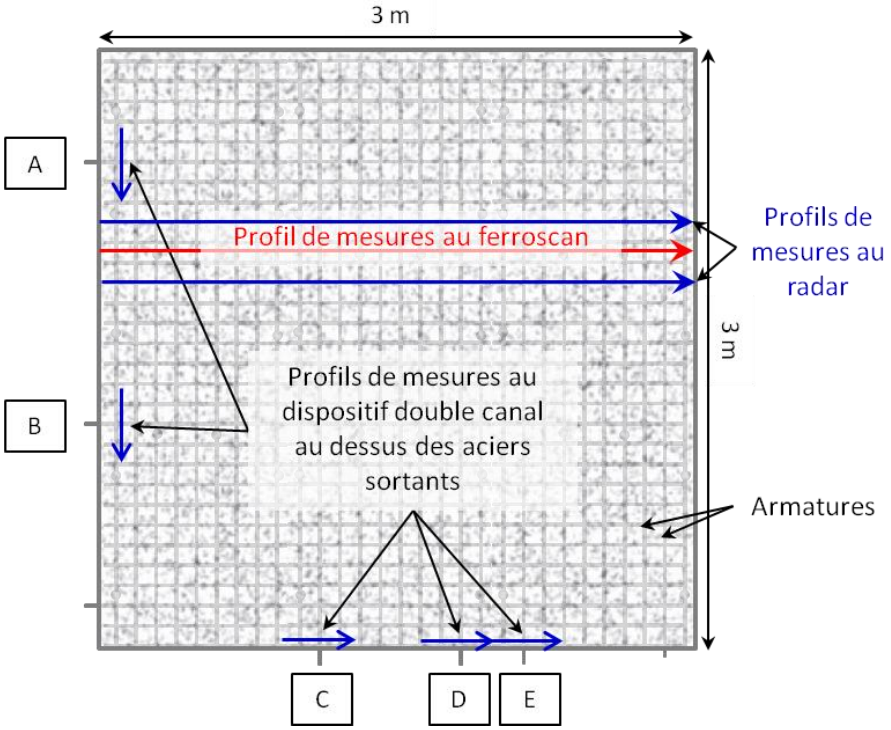


Figure 4.24 : Emplacement et dénomination des aciers sortants de la dalle – Dispositions des profils de mesures au radar et au Ferroscan

La Figure 4.25 représente l'ensemble des profondeurs obtenues par l'algorithme et par le Ferroscan pour chaque acier détecté (représentés par des points dans la Figure 4.25). Les profondeurs des aciers données par l'algorithme sont quasiment identiques et très proches de celles que l'on a mesurées au Ferroscan, à l'exception de l'acier N° 19. Nous remarquons aussi que les aciers N° 1, 2 et 10 ne sont pas perçus par le Ferroscan. Les aciers N° 28 et 29 ne sont pas détectés par le radar, car l'encombrement d'antennes ne le permet pas.

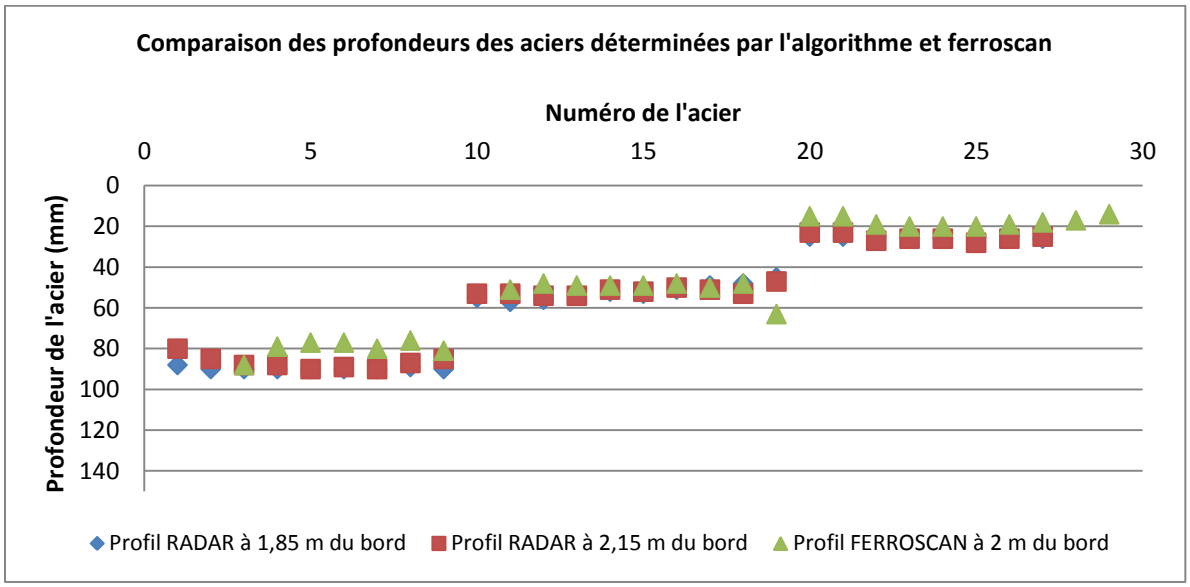


Figure 4.25 : Comparaison des profondeurs des aciers déterminées par l'algorithme sur des mesures radar et par le ferroscan

Pour compléter la comparaison entre les profondeurs des aciers déterminées par l'algorithme et celles mesurées par une autre technique, des acquisitions radar au niveau des aciers sortant de la dalle (A, B, C, D et E) ont été effectuées (Figure 4.24). Ces profils sont distants d'environ 10 cm du bord de la dalle. Les profondeurs réelles des aciers sortants ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse.

Les profondeurs de chaque acier sortant déterminées par l'algorithme et mesurées avec le pied à coulisse ont été reportées dans le Tableau 4.6. L'erreur absolue sur la profondeur de chaque acier est calculée et représentée sous forme d'écart (mm) dans le Tableau 4.6.

La valeur maximale de l'écart entre les profondeurs des aciers est égale à 2 mm, et sa valeur moyenne pour les 5 aciers (A à E) est égale à 1,4 mm.

La comparaison des profondeurs des aciers déterminées par l'algorithme par rapport aux profondeurs réelles nous a permis de vérifier la bonne performance et la précision de l'algorithme.

Tableau 4.6 : Profondeurs des aciers – réelles et calculées

	Profondeurs des aciers sortants de la dalle (cm)				
Acier	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**
Algorithme	7,9	8,0	5,4	5,2	1,82
réelle	7,8	7,9	5,2	5,1	1,6
Ecart (mm)	1	1	2	1	2

4.3.4 Cartographie des vitesses

La Figure 4.26 représente la cartographie de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques de la dalle D1. Celle-ci est construite en regroupant toutes les vitesses données par l'algorithme sur tous les profils de mesures. Comme pour les cartographies des positions des armatures dans la dalle, chaque valeur de vitesse obtenue possède ses propres coordonnées sur la dalle puisqu'elle est liée aux coordonnées du profil lui correspondant.

Sur la Figure 4.26 nous pouvons facilement distinguer les trois zones correspondant à l'emplacement des treillis disposés en escaliers, respectivement de droite à gauche, le treillis à 2 cm, le treillis à 5 cm et le treillis à 8 cm. Nous remarquons que dans la zone du treillis le moins profond les vitesses sont les plus élevées, en particulier au centre de cette zone, où les vitesses sont comprises entre [11,3 - 12,3] cm/ns. Pour les deux autres zones, les vitesses sont assez homogènes, 9,6 cm/ns dans la zone du treillis positionné à 5 cm, et 10,3 cm/ns dans la zone du treillis enfoui à 8 cm.

Nous verrons dans ce qui suit comment il est possible de convertir cette cartographie de vitesse en cartographie de teneur en eau.

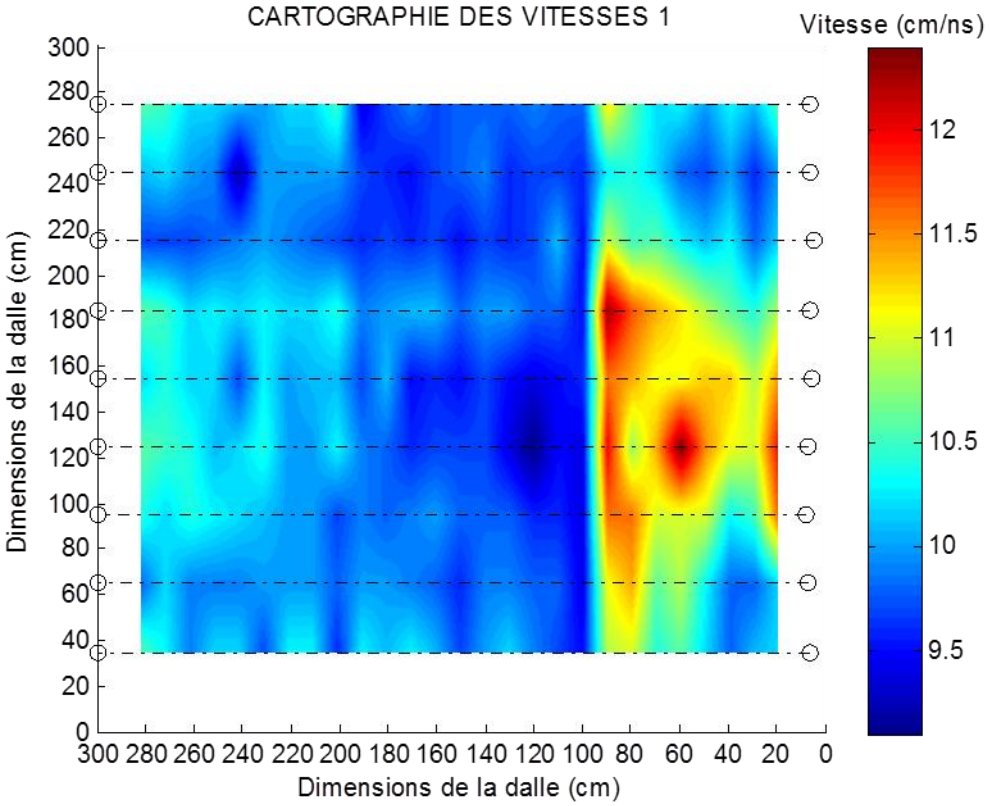


Figure 4.26 : Cartographie de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques (cm/ns) de la dalle D1

4.3.5 Cartographie des teneurs en eau

L'estimation de la teneur en eau du béton sur site est explicitée dans la première partie de ce chapitre consacré à la méthodologie de calibration de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques pour l'estimation de la teneur en eau du béton. La procédure consiste d'abord à établir une loi de calibration de la vitesse par des mesures radar en transmission sur une ou deux carottes prélevées de l'ouvrage, que l'on conditionne à deux différents degrés de saturation en eau (sec et saturé). Et enfin, à utiliser la loi inverse sur les vitesses mesurées sur la dalle D1 pour estimer la teneur en eau du béton.

La dalle à taille réelle (D1) a été fabriquée avec le même béton et en même temps que les corps d'épreuves (D2 et D3) utilisés dans la procédure de calibration. Ces trois éléments ont été conditionnés dans la même ambiance pendant la période de durcissement, ils possèdent donc la même porosité. Par conséquent, nous pouvons appliquer sur la maquette D1 la loi de calibration ci-dessous déduite pour les corps d'épreuve et démontrée au paragraphe 4.2.2.2.

$$v = -0{,}232 \times w + 12{,}866 \qquad \text{(eq. 4.6)}$$

$$w = -4{,}309 \times v + 55{,}435 \qquad \text{(eq. 4.7)}$$

La cartographie des teneurs en eau est tracée de la même façon que les cartographies précédentes, en se référant aux coordonnées de début et de fin des profils. Cette cartographie est représentée dans la Figure 4.27.

Le contraste des teneurs en eau dans la Figure 4.27 permet de distinguer nettement les trois zones correspondantes aux différentes profondeurs des treillis. Celles-ci se délimitent de 0 à 100 cm, de 100 à 200 cm et de 200 à 300 cm suivant la longueur de la dalle, respectivement du treillis le moins profond au treillis le plus profond.

On observe une très faible teneur en eau dans la partie centrale de la première zone qui correspond au treillis placé à environ 2 cm de profondeur. Cette faible teneur en eau vient du fait que la dalle était exposée au soleil provoquant ainsi l'évaporation de l'humidité contenue dans le béton. Au niveau des treillis placés à 5 cm et 8 cm, la teneur en eau est homogène, elle s'étale de 13 % à 14 % au niveau du treillis enfoui aux environ de 5 cm, et comprise entre 11 % et 13 % au-dessus du treillis à 8 cm. En comparant le contraste de la teneur en eau entre les trois zones relatives aux différentes profondeurs, nous constatons que le béton est plus humide à cœur qu'en surface.

Nous ne pouvons malheureusement pas pousser davantage les conclusions liées à la teneur en eau, puisque les valeurs réelles ne peuvent pas être contrôlées, les prélèvements étant impossibles tant que le projet ATALANTE n'est pas terminé. Mais on peut toutefois noter que l'échelle de variation de la teneur en eau du béton est en bon accord avec son jeune âge (coulage des dalles le 1er juin 2015) et les conditions de conservations de la maquette. Exposée à des températures minimale et maximale avoisinant, respectivement, 2°C et 30°C et à une humidité relative de 50 % à 80 %, avec une porosité du béton de 17,3 % on peut prévoir d'avoir un degré de saturation compris entre 60 % et 70 %, ce qui donne une teneur en eau d'environ 12 %.

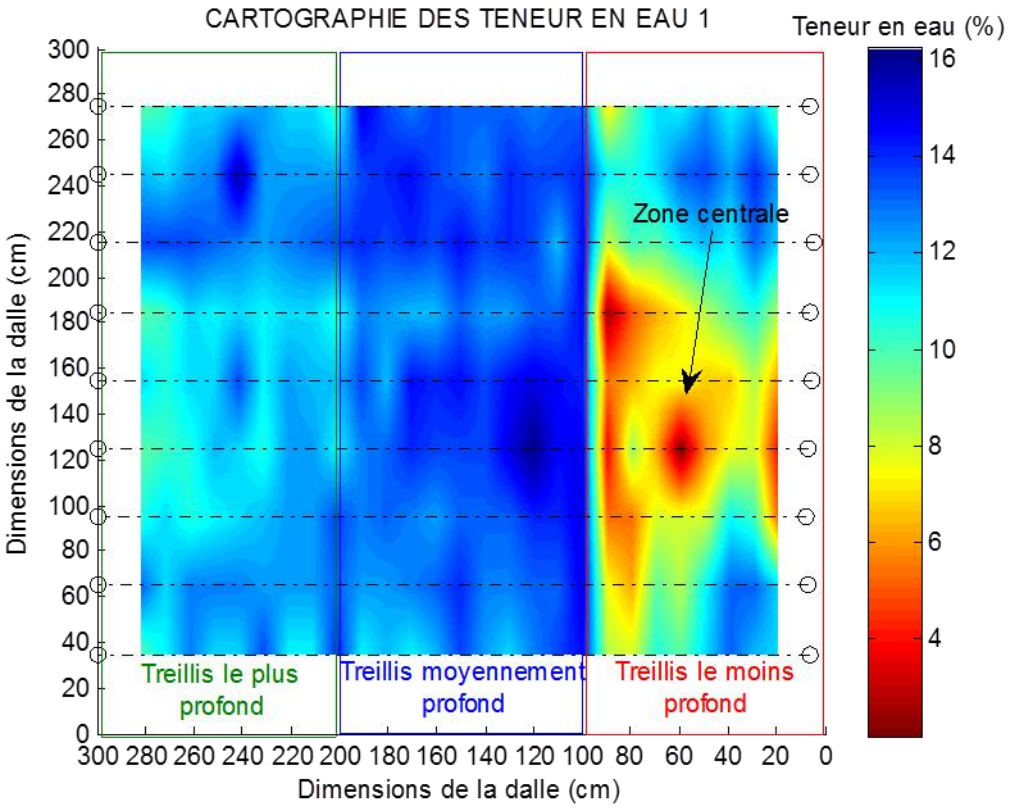


Figure 4.27 : Cartographie des teneurs en eau en (%) du béton de la dalle

4.4 CONCLUSION

Nous avons tout d'abord proposé dans ce chapitre une méthode de calibration de la vitesse de propagation des ondes radar pour l'estimation de la teneur en eau du béton sur site. Cette procédure consiste à déterminer la vitesse par des mesures radar en transmission sur des prélèvements pratiqués sur l'ouvrage, et à établir une loi de calibration de la vitesse en fonction du degré de saturation du béton. La loi de calibration est par la suite utilisée pour évaluer la teneur en eau du béton à partir de la vitesse mesurée sur l'ouvrage avec le dispositif radar bi-récepteur. Cette méthode est très simple, facile à mettre en œuvre et elle donne de très bons résultats.

Malgré le manque de référence pour la teneur en eau du béton de la maquette, les résultats obtenus par l'application de la loi de calibration de la vitesse semblent physiquement assez pertinents en termes d'ordre de grandeur.

La mise en application de l'algorithme sur la maquette de dalle à taille réelle nous a conduit à confirmer la capacité de l'algorithme, sa simplicité, sa rapidité d'exécution et sa pertinence quant aux résultats fournis. Concernant sa performance en termes de reconnaissance géométrique, l'algorithme donne des résultats très satisfaisants. La localisation des armatures dans la dalle en béton armé est d'une précision millimétrique, et la superposition des armatures longitudinales et transversales est nettement visible sur la cartographie des aciers conformément aux dispositions constructives.

4.5 RÉFÉRENCES

(NF EN 12504-1, 2000) NF EN 12504-1 « Essais pour béton dans les structures – Partie 1 : Carottes – Prélèvement, examen et essais en compression », Association Française de Normalisation (AFNOR), août 2000.

Conclusion générale et Perspectives

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

I. CONCLUSION GENERALE

Les travaux de recherche effectués dans cette thèse s'inscrivent dans une démarche de surveillance, de protection et de conservation des structures en béton armé.

Les travaux ont été réalisés dans le cadre du projet éco-industries ATALANTE, qui vise la mise au point d'un robot de diagnostic des bétons des ouvrages de bâtiment ou de génie civil. Notre participation dans ce projet porte sur le développement des outils de contrôle non destructif du béton armé et plus particulièrement pour cette thèse sur le positionnement des aciers et la mesure de la teneur en eau du béton d'enrobage.

Le radar étant l'un des outils de diagnostic et de contrôle non destructif dont devra être équipé le robot, nous nous sommes donc intéressés à son aptitude en termes de caractérisation physique et géométrique du béton armé.

Outre la nécessité d'un opérateur expert pour la bonne interprétation des données radar, bien connue dans le secteur du diagnostic et du contrôle non destructif, l'état de l'art sur l'application et l'utilisation du radar ont permis de mettre en évidence les limites de cet appareil de diagnostic, notamment en termes de procédures de mesures et de précision des résultats.

Parmi les difficultés les plus souvent relevées, on trouve la définition du temps zéro représentant le moment d'émission des ondes électromagnétiques (EM) par le radar et la difficulté d'une mesure précise de la vitesse de propagation des ondes EM dans le matériau. Ces deux paramètres étant essentiels, des alternatives sont alors utilisées afin d'aboutir à une caractérisation soit physique du matériau soit géométrique de la structure. Par exemple, pour l'application la plus courante, la mesure de la profondeur des armatures, les opérateurs ont

généralement recours à des logiciels mettant en œuvre des techniques de migration de type Kirchhoff, qui nécessitent une bonne connaissance de la vitesse de propagation des ondes dans le milieu. Pour connaître cette vitesse, il faut alors soit en faire la mesure d'ailleurs souvent impossible ou très imprécise avec les moyens usuels, soit en faire l'estimation par le biais du retour d'expérience. Cette estimation doit bien entendu être accompagnée d'un recalage en certains points particuliers par des essais destructifs afin de contrôler la profondeur des armatures. On voit bien que pour garantir aux résultats une précision acceptable, il est nécessaire d'avoir recours, soit à des mesures supplémentaires, soit à un nombre significatif d'essais destructifs qui sont susceptibles d'engendrer des coûts supplémentaires.

Suite aux nombreuses limites révélées lors de l'établissement de cet état de l'art sur la caractérisation du béton par mesures radar, nous avons proposé une solution permettant de localiser les armatures dans le béton et de déterminer simultanément la vitesse de façon précise, automatique et sans a priori.

La procédure de mesure que nous avons proposée est rapide et facile à mettre en œuvre. Celle-ci consiste à faire des mesures avec un dispositif radar double-récepteurs, simultanément et sans interrompre l'acquisition, sur le matériau et l'air. Les mesures en espace libre permettent de déterminer le temps zéro des impulsions EM et de ce fait rapporter les signaux dans le temps à leur moment d'émission.

Les données radar sont traitées par un algorithme que nous avons développé. Celui-ci permet de localiser les aciers du premier lit d'armatures d'éléments en béton armé et de déterminer la vitesse moyenne de propagation des ondes EM dans la couche d'enrobage. L'algorithme ne nécessite aucun a priori, son temps d'exécution sur des données radar pour un profil de mesures est estimé à quelques secondes (entre 5 s et 20 s selon la performance du processeur de la machine de calcul) avec une précision de localisation des armatures très satisfaisante, puisque l'erreur moyenne relative est inférieure à 4,5 %.

Afin d'exploiter les vitesses de propagation des ondes EM déterminées par l'algorithme pour la caractérisation physique du béton, nous avons proposé une calibration de la vitesse par des mesures radar en transmission sur carottes, pour estimer la teneur en eau volumique du béton. Celle-ci consiste à établir une loi de calibration reliant la vitesse et la teneur en eau sur des

prélèvements réalisés sur ouvrage, conditionnés à l'état sec et saturé. La loi de calibration est par la suite utilisée pour évaluer la teneur en eau du béton d'enrobage en différents points de l'ouvrage à partir des vitesses mesurées. Cette procédure est simple à mettre en œuvre et donne d'excellents résultats.

Les résultats fournis par l'algorithme peuvent être exploités pour construire des cartographies de positionnement des armatures et de teneur en eau volumique d'éléments en béton armé, comme des murs, des dalles ou piles de ponts. La cartographie de positionnement des armatures est utile pour la vérification de la conformité des dispositions constructives d'une structure par rapport aux plans d'exécution ou pour un re-calcul de la structure. La cartographie de la teneur en eau volumique du béton peut renseigner sur les zones de forte humidité et donc à risque vis-à-vis de certaines pathologies, en particulier la corrosion des armatures et d'y concentrer des mesures spécifiques de caractérisation de cette pathologie. Dans le cadre du projet ATALANTE cette cartographie pourra être comparée à celle fournie par les mesures de gradient de potentiel qui est le second objectif fixé au LMDC, afin d'en renforcer le diagnostic.

II. PERSPECTIVES

La première perspective dégagée de ces travaux de thèse concerne la détermination de la profondeur et la position dans le plan des aciers du second lit d'armatures. Il serait alors très intéressant de développer l'algorithme dans ce sens.

Une proposition d'un algorithme automatique pour la détermination du diamètre des armatures serait aussi pertinente. Cela permettrait de valoriser davantage le traitement que nous avons proposé dans cette thèse, notamment la cartographie de positionnement des armatures. Ainsi, une reconnaissance rapide du ferraillage dans une structure serait possible.

Un autre point qui paraît aussi très important concerne la distinction des aciers multiples. En effet, le ferraillage d'éléments en béton armé avec des aciers disposés en paquets est autorisé par les règlements, il est donc régulièrement pratiqué. En l'état actuel des systèmes et des traitements, un expert en traitement des signaux radar demeure nécessaire. L'utilisation d'antennes de plus haute fréquence et l'adaptation de l'algorithme constituent donc des perspectives intéressantes.

Enfin, dans le cadre d'une automatisation de la prise de mesure par un robot, il serait pertinent de réfléchir à une méthode permettant de rationaliser la circulation du robot afin de limiter le nombre de profils tout en ayant une cartographie du positionnement des aciers la plus précise possible. Un premier passage du robot, suivant un quadrillage à grandes mailles et suivant des directions différentes ou bien une circulation en spirale, pourraient être des solutions envisageables, mais dont la faisabilité doit être étudiée.

TITRE : Localisation automatique des aciers et caractérisation de la teneur en eau du béton armé par radar double-offset à grand rendement.

RÉSUMÉ

Les budgets destinés à l'entretien et à la réparation du patrimoine bâti étant très élevés, il est primordial de mettre en place des techniques fiables de suivi et de diagnostic des ouvrages pour réduire ces dépenses.

Il existe de nombreuses techniques de contrôle non destructif (CND) employant différentes technologies à des coûts plus ou moins abordables. Elles permettent la détermination des propriétés du matériau renseignant sur l'état de l'ouvrage, et la détection d'inclusions ou de défauts dans le béton. Ces techniques sont connues pour leur rapidité de mise en œuvre et leur grand rendement sur site, mais aussi par leur caractère non intrusif qui permet de limiter le nombre de prélèvements. Cela les rend pertinentes pour la surveillance et l'inspection du patrimoine bâti, puisqu'elles peuvent fournir des informations liées à l'état d'un ouvrage sans l'endommager.

Dans un ouvrage en béton armé, la couche d'enrobage des armatures est la plus sujette à de multiples agressions. C'est dans cette couche qu'ont lieu la majorité des réactions chimiques qui causent la dégradation de l'ouvrage, puisqu'avec la présence d'eau cet enrobage est considéré comme la zone de pénétration, de transfert et de fixation des agents agressifs présents dans l'environnement de l'ouvrage, favorisant par exemple la corrosion des armatures. La teneur en eau du béton est considérée comme un facteur très important dans le diagnostic des structures en béton armé, puisqu'elle conditionne le développement de la plupart des pathologies liées à la dégradation des structures affectant ainsi la durabilité du béton. La localisation avec précision des aciers de renforcement est également un élément primordial pour le diagnostic, mais également pour vérifier la conformité des dispositions constructives par rapport aux plans d'exécution.

Dans ces travaux de recherche, nous utilisons la technologie radar pour la caractérisation géométrique et physique des éléments en béton armé, cela par le développement d'un algorithme automatique, rapide et sans prérequis. Les objectifs de cette étude sont : de localiser en surface et en profondeur les aciers du premier lit d'armatures, et de déterminer la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le béton d'enrobage pour estimer sa teneur en eau.

Mots clés : CND, radar, béton, localisation des armatures, vitesse de propagation des ondes électromagnétiques, teneur en eau.