POLYPUBLIE

# Investigation des limites des contrôles non destructifs par ultrasons et par radar sur le béton

Younesse Rafkani

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

| | |
|---|---|
| **Date** | 2009 |
| **Type** | Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis<br>Mémoire de maîtrise/Master's thesis |
| **URL de PolyPublie**<br>PolyPublie URL | https://publications.polymtl.ca/8445/ |
| **Conditions d'utilisation**<br>Terms of use | © Tous droits réservés / All rights reserved |
| **Référence**<br>Citation | Rafkani, Y. (2009). Investigation des limites des contrôles non destructifs par ultrasons et par radar sur le béton [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/8445/ |

**Détails de la thèse**
Thesis details

| | |
|---|---|
| **Directeurs de recherche**<br>Advisors | Rachid Boukhili |
| **Programme**<br>Program | Non spécifié |

**Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal**
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal
https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

# INVESTIGATION DES LIMITES DES CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS PAR ULTRASONS ET PAR RADAR SUR LE BÉTON

YOUNESSE RAFKANI

DÉPARTEMENT GÉNIE MÉCANIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE MÉCANIQUE)

AOÛT 2009

© Younesse Rafkani, 2009.

Library and Archives Canada

Published Heritage Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et Archives Canada

Direction du Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

*Your file Votre référence*
*ISBN: 978-0-494-53922-4*
*Our file Notre référence*
*ISBN: 978-0-494-53922-4*

NOTICE:

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

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

AVIS:

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

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

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

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

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

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

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

# INVESTIGATION DES LIMITES DES CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS PAR ULTRASONS ET PAR RADAR SUR LE BÉTON

présenté par: RAFKANI Younesse

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. MUREITHI Njuki, Ph.D., président

M., BOUKHILI Rachid, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. VADEAN Aurelian, Doct., membre

# DÉDICACE

*C'est dans l'effort que l'on trouve la satisfaction et non dans la réussite. Un plein effort est une pleine victoire.*

Gandhi

Extrait des *Lettres à l'Ashram*

Je dédie ce travail à mes parents.

# REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier les Laboratoires d'Essai Mequaltech et plus particulièrement le président M. Robert Desautels et le directeur général M. Yvan Couture. Ils m'ont donné l'opportunité de réaliser cette maîtrise au sein de cette entreprise et m'ont donné les moyens de réussir ce travail.

Je remercie M. Rachid Boukhili, mon directeur de maîtrise pour son aide précieuse au niveau de l'organisation de mon temps et de la rédaction de ce mémoire. C'est grâce à son encadrement, son jugement et ses compétences dont il m'a fait bénéficier que ce travail a été mené à terme. Je remercie aussi MM. Mureithi et Vadean pour avoir accepté d'être membre du jury.

Mes remerciements s'adressent aux employés de Mequaltech et plus particulièrement à mon ami et employé, M. Gabriel Turcan pour son soutien. Un grand merci aussi à Jean-Luc, Nathalie, Love-Mary, Abderrezak, Hau, Stéphane et Mario pour leur bonne humeur et leur présence.

Enfin, je ne saurais terminer sans adresser mes affectueux remerciements à ma famille et à mes amis qui n'ont cessé de m'encourager et de me soutenir tout au long de mes études malgré la distance. Ils m'ont toujours encouragé à aller au bout des choses. Je vous témoigne ma profonde affection.

# RÉSUMÉ

L'utilisation des essais non destructifs sur le béton revêt une importance grandissante pour les gestionnaires de structures en béton. En effet, de nos jours, la politique adoptée va plus dans le sens de la réparation que de la reconstruction et les structures doivent être contrôlées sans être endommagées. Afin de prendre les mesures appropriées, les défauts et les détériorations doivent être correctement repérées et quantifiées. Dans ce contexte, le Radar et les ultrasons, deux méthodes d'auscultation phare, sont souvent utilisées. Le Radar consiste en la propagation d'ondes électromagnétiques et l'exploitation de leurs réflexions. Les ultrasons, quant' à eux, consistent en l'émission d'ondes ultrasonores et la réception des ondes transmises et/ou réfléchies. Ces deux techniques offrent beaucoup d'avantages comme leurs rapidités d'exécution et leurs larges capacités d'évaluation.

Cependant, les limites de ces dernières ne sont pas vraiment établies, notamment avec les meilleures résolutions qu'apportent les nouveaux appareillages. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette étude. Dans cette perspective, six dalles ont été conçues puis réalisées de dimensions 1 m x 1 m x 0,3 m. Chacune d'entre elles présente une configuration différente visant à tester les appareillages dans leurs limites. Les quatre premières testent les limites du Radar pour la détection des armatures et des conduits. Les deux dernières contiennent des défauts en polystyrène simulant le vide et des nids d'abeilles. Les défauts sont localisés à différentes profondeurs et ont différentes dimensions et les nids ont différents volumes.

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence de nombreuses limites du Radar et des ultrasons. Le Radar présente des limites par rapport à une trop grande proximité des armatures, la détection de défauts inclinés et la détection de nids d'abeilles. Les ultrasons présentent des limites pour l'estimation de l'épaisseur des défauts et la profondeur de défauts quand ils sont trop enfouis. Le marteau de Schmidt, outil indissociable des ultrasons a été introduit pour compléter les résultats. Il a été constaté que chaque outil ne donne pas un diagnostique suffisant. La

combinaison des techniques est primordiale. Ce travail a ainsi permis une meilleure compréhension des limites de ces appareillages et de ces techniques et ouvre ainsi la porte au début d'une expertise.

# ABSTRACT

Non destructive testing on concrete is getting an increasing role for the administrators of concrete structures. Indeed, presently, the adopted policy goes more to the direction of the repair than of the reconstruction. In addition, structures must be controlled without being damaged. To take the appropriate decisions, defects and deteriorations must be correctly tracked and quantified. In this context, Radar and ultrasounds, two methods of key auscultation, are often used. Radar consists of the distribution of electromagnetic waves and the exploitation of their reflections. The ultrasounds consist of the propagation of ultra-sound waves and the reception of the transmitted on waves. These two techniques offer many advantages in terms of their speeds of execution and their wide capacities. However, the limits of these techniques are not really established, particularly in light of the improved resolutions brought by new equipment. Within this context, six concrete slabs measuring 1 m x 1 m x 0.3 m were manufactured. Each of them presents a different configuration to test equipments to their limits. The first four were used to investigate the limits of Radar for the detection of rods and pipes. The last two contain defects in polystyrene feigning voids and also honeycomb stitches. The defaults are located at various depths and have various dimensions and the honeycomb stitches have different volumes.

The results allowed to bring to light numerous limits of the Radar and the ultrasounds. The Radar presents limits with regard to the proximity of the rods, the detection of oblique defects and the detection of honeycomb stitches. The ultrasounds present also limits for the estimation of the thickness of a defect and for the depth of defects when they are too large. The Schmidt hammer, a required tool of the ultrasounds, was introduced to complete the results. It was noticed that each tool does not give a sufficient diagnostic. The combination of techniques is then essential. Consequently, this work allowed a better understanding of the limits of these equipments and opens the door to the beginning of a new expertise.

# TABLE DES MATIÈRES

**DÉDICACE** ..... iv
**REMERCIEMENTS** ..... v
**RÉSUMÉ** ..... vi
**ABSTRACT** ..... viii
**TABLE DES MATIÈRES** ..... ix
**LISTE DES TABLEAUX** ..... xi
**LISTE DES FIGURES** ..... xiii
**LISTE DES ANNEXES** ..... xvii
**LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS** ..... xviii

**INTRODUCTION** ..... 1

**CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE** ..... 4
**1.1. Le béton, un matériau composite** ..... 4
1.1.1 Présentation générale ..... 4
1.1.2 Les différents types de béton ..... 6
**1.2. Les défauts et discontinuités du béton et les moyens de contrôle.** 7
1.2.1 Les différents défauts ..... 7
1.2.2 Les propriétés et les moyens de contrôle du béton ..... 10
**1.3. La méthode par Radar pénétrant** ..... 21
1.3.1 Principe fondamental ..... 21
1.3.2 Procédure expérimentale ..... 24
1.3.3 Avantages et limites du Radar ..... 28
**1.4. Les méthodes ultrasonores** ..... 29
1.4.1 Le test de vitesse d'impulsion et l'impulsion/Écho ..... 29
1.4.2 La méthode Impact/Echo ..... 40
1.4.3 Les méthodes combinées ..... 42

**CHAPITRE II : PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ..... 46**

**2.1 Méthodes expérimentales ..... 46**

2.2.1 Matériaux et fabrication des échantillons ..... 46

2.2.2 Discontinuités et défauts ..... 53

**2.2 Essais réalisés ..... 55**

2.2.1 Matériel utilisé ..... 55

2.2.2 Essais sur les armatures et conduits ..... 58

2.2.3 Essais sur les défauts et les nids d'abeilles ..... 60

**CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS ..... 63**

**3.1 Evaluations des paramètres pour la détection par le Radar ..... 63**

2.2.4 Détection des armatures ..... 63

3.1.1 Détection des défauts ..... 69

**3.2 Paramètres limites de détection des défauts par les ultrasons ..... 77**

3.2.1 Profondeur des défauts ..... 77

3.2.2 Épaisseur des défauts et détection des nids d'abeilles ..... 80

3.2.3 Taille et inclinaison des défauts ..... 84

**3.3 Analyse de combinaison des techniques et recommandations ..... 87**

3.3.1 Marteau de Schmidt ..... 87

3.3.2 Le Radar et les ultrasons ..... 88

3.3.3 Optimisation des combinaisons et procédure. ..... 96

**CONCLUSION ..... 101**

**RÉFÉRENCES ..... 103**

**ANNEXES ..... 110**

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Proportions typiques pour un mélange de 20 mm ..... 5
Tableau 1.2 Comparatif des différentes méthodes non destructives..... 19
Tableau 1.3 Comparaison des applications du Radar selon leurs fiabilités ..... 26
Tableau 1.4 Distances typiques minimales à partir de la surface pour la détection..... .....27
Tableau 1.5 Récapitulatif des avantages du Radar ..... 28
Tableau 1.6 Récapitulatif des désavantages du Radar ..... 29
Tableau 1.7 Effets de la température et du taux d'humidité sur la vitesse des impulsions ..... 36
Tableau 1.8 Effet de la dimension de l'échantillon sur la vitesse des impulsions . 37
Tableau 1.9 Différentes corrélations proposées par des chercheurs pour estimer la résistance à la compression ..... 45

Tableau 2.1 Formulation du béton des dalles ..... 47
Tableau 2.2 Caractéristiques du béton des dalles ..... 47
Tableau 2.3 Formulation du béton des nids d'abeilles..... 53
Tableau 2.4 Paramètres à tester des éléments présents dans la dalle 4 ..... 60

Tableau 3.1 Récapitulatif des résultats pour la détermination de la profondeur des deux défauts de la dalle 6 situés à une profondeur de 90 mm. ..... 80
Tableau 3.2 Détermination de la vitesse du son dans le polystyrène expansé. ..... 82
Tableau 3.3 Tableau récapitulatif de la détermination des épaisseurs des vides.... 82
Tableau 3.4 Mesure de la vitesse minimale des ultrasons passant par les nids d'abeilles. ..... 83
Tableau 3.5 Moyennes et écart-types des rebonds mesurés sur la Dalle 5. ..... 87
Tableau 3.6 Mesure des hauteurs des hyperboles pour des diamètres d'armatures différentes sur la Dalle 4. ..... 90

Tableau 3.7 Baisse relative des vitesses ultrasonores en présence des nids d'abeilles dans la Dalle 6. ..... 93

Tableau 3.8 Baisse relative des vitesses ultrasonore en présence des différentes tailles de défaut ..... 95

Tableau 3.9 Limites estimées du Radar, des ultrasons et du marteau de Schmidt ..... 96

# LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Coupe d'une dalle de béton ayant subit la propagation d'une fissure par gel et dégel de l'eau ..... 8
Figure 1.2 Réseau de fissurations provoqué par la réaction alcali-silice..... 9
Figure 1.3 Exemple de détériorations par nids d'abeilles ..... 10
Figure 1.4 Exemple d'essai de résistance à la compression sur le béton. ..... 12
Figure 1.5 Schéma des méthodes standards ASTM C 78 (a) et ASTM C 293 (b) ..... 12
Figure 1.6 Essai de carottage sur un échantillon de béton..... 13
Figure 1.7 Essai d'arrachement sur le béton..... 14
Figure 1.8 Réflexion de l'impulsion électromagnétique à l'interface entre les différents milieux et le signal reçu par l'antenne en raison des échos ..... 22
Figure 1.9 Radargramme mettant en relief les armatures, réalisées par le CONQUEST de Sensors & Software dans les laboratoires d'essais Mequaltech..... 23
Figure 1.10 Appareillage pour la réalisation d'un radargramme : CONQUEST de Sensors & Software dans les laboratoires d'essais Mequaltech. ..... 25
Figure 1.11 Les différentes ondes produites par un transducteur piézoélectrique ..... 30
Figure 1.12 Principe de fonctionnement du transducteur piézoélectrique..... 31
Figure 1.13 Schéma de réfraction et de réflexion selon le principe de Snell-Decartes..... 31
Figure 1.14 Les trois modes d'auscultation par la méthode ultrasonore sur le béton..... 33
Figure 1.15 Configuration ultrasonique pour la méthode indirecte. ..... 34
Figure 1.16 Graphique permettant de déterminer la vitesse d'impulsion comparant un béton sain à un béton altéré par la méthode indirecte..... 34
Figure 1.17 Schématisation du principe de l'appareillage à ultrasons..... 38

Figure 1.18 Exemple d'affichage d'appareil à ultrasons sur le béton ..... 38
Figure 1.19 Exemple de prise de mesures par la méthode semi-directe, réalisée dans les laboratoires d'essais Mequaltech (2009)..... 39
Figure 1.20 Schémas de fonctionnement de la méthode impact/écho..... 40
Figure 1.21 Instrumentation typique de la méthode impact/écho ..... 41
Figure 1.22 Marteau de Schmidt et appareillage ultrasonore typiques pour le béton. ..... 43
Figure 1.23 Courbes ISO-Resistance pour un béton de référence avec la méthode SonReb..... 44

Figure 2.1 Les six dalles expérimentales lors de la coulée à gauche lors de la cure à droite. ..... 46
Figure 2.2 Image de la dalle 1 témoin sous SolidWorks à gauche et vue du moule fabriqué à droite. ..... 49
Figure 2.3 Image de la dalle 2 Espacements à gauche sous SolidWorks et vue du moule fabriqué..... 50
Figure 2.4 Image de la Dalle 3 Superpositions à gauche sous SolidWorks et vue du moule fabriqué à droite. ..... 50
Figure 2.5 Image de la Dalle 4 différents diamètres sous SolidWorks et vue du moule fabriqué..... 51
Figure 2.6 Image de la Dalle 5 défauts sous SolidWorks à gauche et vue du moule fabriqué à droite. ..... 52
Figure 2.7 Image de la Dalle 6 défauts + nids d'abeilles sous SolidWorks à gauche et vue du moule fabriqué à droite. ..... 52
Figure 2.8 Nids d'abeilles placés dans la dalle 6 ..... 54
Figure 2.9 Les six types de plaques en polystyrène utilisé pour simuler les vides dans les dalles de béton..... 55
Figure 2.10 Appareillage utilisé pour les expériences : V-Meter Mark III de NDT James ..... 56
Figure 2.11 Marteau de Schmidt utilisé pour les expériences : marteau numérique, modèle W-D 1500 de NDT James ..... 57

Figure 2.12 Configuration des espacements entre les barres d'armatures dans la dalle 2 ..... 58
Figure 2.13 Configuration des armatures dans la dalle 3 ..... 59
Figure 2.14 Configuration de la disposition des défauts dans la dalle 5. ..... 61
Figure 2.15 Configuration de la disposition des défauts dans la dalle 6 et des nids d'abeilles. ..... 62

Figure 3.1 Radargramme de la dalle témoin à une profondeur de 6-7'' ..... 64
Figure 3.2 Radargramme de la dalle 2 à une profondeur de 6-7'' ..... 65
Figure 3.3 Suivi de la barre inclinée de 10° en fonction de la profondeur. ..... 66
Figure 3.4 Radargramme de la dalle 3 à une profondeur de 4-5''. ..... 67
Figure 3.5 Radargramme de la dalle 4 à une profondeur de 4-5''. ..... 68
Figure 3.6 Radargramme partiel de la dalle 4 (a) à 5-6'' et (b) à 7-8'' ..... 69
Figure 3.7 Radargramme de la dalle 4 à une profondeur de 5-6'' ..... 70
Figure 3.8 Radargramme de la dalle 4 à une profondeur de 5-6'' ..... 71
Figure 3.9 Radargramme de la dalle 5 à une profondeur de 7-8'' ..... 72
Figure 3.10 Radargramme de la dalle 5 à une profondeur de 10-11'' ..... 73
Figure 3.11 Radargramme de la dalle 6 à une profondeur de 3-4'' ..... 74
Figure 3.12 Radargramme de la dalle 6 à une profondeur de 5-6'' pour les défauts présents à proximité des armatures ..... 75
Figure 3.13 Radargramme de la dalle 6 à une profondeur de 5-6'' pour les défauts de dimensions différentes. ..... 76
Figure 3.14 Radargramme de la dalle 6 à une profondeur de 9-10''. ..... 76
Figure 3.15 Détection des vides par la méthode ultrasonore indirecte ..... 77
Figure 3.16 Courbe obtenue par la méthode indirecte pour la détermination de la profondeur du premier défaut dans la dalle 6. ..... 78
Figure 3.17 Courbe obtenue par la méthode indirecte pour la détermination de la profondeur du deuxième défaut dans la dalle 6. ..... 79
Figure 3.18 Méthode directe pour mesurer l'épaisseur d'un défaut ..... 81
Figure 3.19 Résultat des mesures de vitesse des ultrasons en présence de nids d'abeilles : vue de dessus. ..... 84

Figure 3.20 Résultat des mesures de vitesse des ultrasons en présence des défauts des différents tailles : vue de dessus. ..... 85
Figure 3.21 Principe de détection des défauts inclinés selon la méthode indirecte ... ..... 86
Figure 3.22 Courbe du temps de transit en fonction de la distance entre les transducteurs pour la détection du défaut incliné à 45°. ..... 86
Figure 3.23 Coupe transversale de la Dalle 4 présentant les différents diamètres d'armatures. ..... 89
Figure 3.24 Courbe présentant les hauteurs des hyperboles mesurées sur le radargramme en fonction des diamètres des armatures correspondantes ..... 90
Figure 3.25 Courbes du temps de transit en fonction de la distance entre les transducteurs dans la zone contenant le défaut incliné et dans une zone sans défaut. ..... 94
Figure 3.26 Schématisation du parcours des ondes en présence du défaut de dimensions 25 x 25 x 10 mm ..... 95

# LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Mise en plan des dalles expérimentales. ..... 110

Annexe B : Résultats des calculs pour la détermination de la profondeur des défauts ..... 116

Annexe C : Résultats du Marteau de Schmidt. ..... 117

# LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

| | |
|---|---|
| $\alpha$ | Angle d'inclinaison des défauts introduits dans la dalle 5. |
| $\delta$ | Angle de l'apex pour le test d'arrachement sur le béton. |
| $\varepsilon$ | Constante diélectrique d'un milieu. |
| $\varepsilon_{rA}$ | Constante diélectrique relative du milieu A. |
| $\varepsilon_{rB}$ | Constante diélectrique relative du milieu B. |
| $\eta_A$ | Impédances des ondes électromagnétiques dans le milieu A. |
| $\eta_B$ | Impédances des ondes électromagnétiques dans le milieu B. |
| $\theta_1$ | Angle d'incidence d'une onde ultrasonore par rapport à la normale dans le milieu 1. |
| $\theta_1$ | Angle d'incidence d'une onde ultrasonore par rapport à la normale dans le milieu 2. |
| $\lambda_{oe}$ | Longueur d'onde des ondes électromagnétiques. |
| $\mu_0$ | Perméabilité magnétique dans l'air. |
| $\mu_{A,B}$ | Coefficient de réflexion des ondes électromagnétiques à l'interface A/B. |
| d | Diamètre de la tête de tige pour le test d'arrachement sur le béton. |
| D | Diamètre intérieur de la tige pour le test d'arrachement sur le béton. |
| $e_b$ | Épaisseur du béton auquel on soustrait l'épaisseur du vide. |
| $e_d$ | Épaisseur de la dalle. |
| $e_i$ | Indice du vide dans le béton. |

| | |
|---|---|
| $e_v$ | Épaisseur du polystyrène assimilé au vide. |
| $\square_0$ | Constante diélectrique dans l'espace. |
| $f_{oe}$ | Fréquence des ondes électromagnétiques. |
| $h_t$ | Longueur de la tige pour le test d'arrachement sur le béton. |
| L | Longueur d'un échantillon |
| n | Indice de porosité dans le béton. |
| p | Profondeur des défauts. |
| $p_m$ | Profondeur mesurée du défaut. |
| $p_r$ | Profondeur réelle du défaut. |
| $R_{us}$ | Coefficient de réflexion des ondes ultrasonores. |
| R | Rebond donné par le marteau de Schmidt. |
| S | Résistance à la compression du béton. |
| $t_t$ | Temps pris par les ondes ultrasonores pour traverser la dalle 5. |
| T | Temps pris par les ondes ultrasonores pour traverser un échantillon. |
| $v_v$ | Vitesse des ondes ultrasonores dans le défaut. |
| V | Vitesse des ondes ultrasonores dans un milieu. |
| V1 | Vitesse des ondes ultrasonores dans le milieu 1. |
| V2 | Vitesse des ondes ultrasonores dans le milieu 2. |
| $V_{ciment}$ | Volume de ciment introduit dans un échantillon de béton. |
| $V_{granulats}$ | Volume de granulats introduit dans un échantillon de béton. |
| $V_{sable}$ | Volume de sable introduit dans un échantillon de béton. |
| $V_{vide}$ | Volume de ciment présent dans un échantillon de béton. |

| | |
|---|---|
| $X_0$ | Distance entre les deux transducteurs à ultrasons marquant un changement de pente sur la courbe du temps de transit en fonction de la distance. |
| $Z_1$ | Impédance des ondes ultrasonores dans le milieu 1. |
| $Z_2$ | Impédance des ondes ultrasonores dans le milieu 2. |

# INTRODUCTION

*Contexte*

Les différentes structures en béton ainsi que de nombreux patrimoines bâtis après la Seconde guerre mondiale et les grandes années de construction des années 60 sont assujettis à une détérioration pouvant affecter leur durabilité et leur sécurité. L'approche faite par rapport à l'ampleur des dommages, privilégie la maintenance sur la durée de service prévue de l'ouvrage plutôt que de nouvelles constructions. L'état des ouvrages devient de plus en plus un enjeu majeur, notamment pour les constructions faites en béton. [1].

Afin de garantir la sécurité des biens et des personnes et dans un souci de durabilité, les exploitants ont mis en œuvre des matériaux de plus en plus performants face à leur environnement et avec des meilleures propriétés mécaniques. Cependant, leurs résistances à l'usure et à la fatigue restent encore méconnues. Ainsi, il est essentiel de développer des outils permettant d'évaluer l'état de ces matériaux. Pour une durée de vie d'un ouvrage, on recherche à prévoir les dépenses de maintenance nécessaires, d'où le besoin d'une évaluation continue. Dans ce contexte d'importance d'évaluation des états des ouvrages, les contrôles non destructifs s'affirment comme étant des moyens très précieux pour suivre l'évolution des structures. Afin que les réparations soient optimales, les défauts et les détériorations doivent être correctement identifiés. Les contrôles non destructifs peuvent s'avérer ainsi très utiles, notamment pour les défauts présents en profondeur. Cependant, ces moyens de diagnostique ont le désavantage d'apporter des difficultés d'interprétation dans les données recueillies [2] et l'évaluation des propriétés structurales demeure difficile car le choix de la bonne technique n'est pas toujours facile.

*Fondement du problème*

Les évaluations non destructives sont très variées et chacune d'entres elles se basent sur des principes de fonctionnement bien différents. La vitesse de propagation d'une onde ou encore la dureté vont apporter des informations permettant d'interpréter les

propriétés mécaniques d'une structure et de la contrôler. Cependant, les interprétations ne sont pas faciles et peuvent avoir un réel impact sur les décisions prises. En effet, elles indiquent l'état d'une structure et les conséquences des résolutions sont importantes autant d'un point de vue économique que d'un point de vue sécuritaire. Ainsi, il est important d'étudier les limites de détection et d'interprétation des contrôles non destructifs.

*Objectifs de l'étude*

Les objectifs de l'étude sont :

- Évaluer les limites de détection des contrôles par ultrasons et par Radar.
- Optimiser la combinaison des contrôles pour améliorer l'interprétation

*Champ de l'étude*

Ce travail se concentre sur les limites des contrôles ultrasonores et du contrôle par Radar sur le béton. Les essais seront conduits sur des bétons de dureté standard allant de 20 à 60 MPa. L'étude se concentrera sur la détection des défauts et d'armatures.

*Limitations de l'étude*

L'interprétation et le rôle humain jouent un rôle fondamental dans cette étude et elle doit faire appel à un excellent jugement. La manipulation des équipements doit être réalisée de manière optimale selon des procédures normées.

*Importance de l'étude*

Les analyses chimiques ou mécaniques sur les échantillons fournissent des données directement exploitables pour l'évaluation du matériau de l'ouvrage. Cependant, les limites techniques et économiques justifient souvent le recours aux techniques de contrôle non destructives. Celles-ci, en effet, basées sur des principes géophysiques, sont, pour certaines, d'une mise en œuvre légère et rapide. Elles sont souvent économiquement avantageuses et pratiques ce qui les rend adaptées à la prise de mesure *in situ*. De plus, pour quelques unes d'entre elles, la prise de mesures peut se

faire en continu sur l'ensemble de l'ouvrage, sur de grandes dimensions. Cette caractéristique de globalité des mesures les rend particulièrement intéressantes, au regard des essais en laboratoire, ponctuels par définition. Les résultats de ces investigations sont le plus souvent présentés sous la forme de planches graphiques : coupes, cartes d'anomalies et profils de mesures interprétés. L'estimation de la résistance à la compression est de ±25% en utilisant le contrôle par Radar et de ±20% par contrôle ultrasonore [3] [4]. Enfin, il est important de voir les limites des moyens de contrôle d'un point de vue orientation, épaisseur, superposition dans le sens de l'épaisseur de la structure et le type de défaut ainsi que l'estimation de la résistance du béton.

Ce mémoire est constitué de trois chapitres. Le premier expose une revue critique de la littérature en revenant sur le béton puis sur les différents défauts pouvant exister et enfin sur les différents essais existants. Nous reviendrons particulièrement sur le contrôle par Radar et par ultrasons. Ensuite, le second chapitre présentera le programme expérimental, avec les matériaux utilisés et les essais effectués. Enfin, le troisième chapitre présentera les résultats des essais ainsi que les discussions en respectant les objectifs fixés ainsi que les perspectives possibles.

# CHAPITRE I

# REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

## 1.1. Le béton, un matériau composite

### 1.1.1 Présentation générale

**Composition du béton**

Le béton est un matériau de construction composite. C'est le mélange de pierres et de sable maintenus ensemble par un liant constitué de ciment qui fait prise par hydratation avec de l'eau, on dit qu'il est hydraulique. Le mélange sable et liant est appelé mortier. [5] Lors du durcissement du liant, le béton devient très dur comme de la pierre. La réaction chimique qui permet au béton de faire prise est lente : à peine 50% de la résistance finale au bout de 7 jours. La valeur prise comme référence dans les calculs est celle obtenue à 28 jours (80% de la résistance finale).
Le béton se distingue des autres matériaux de construction de par son excellente résistance à la compression et peut être renforcé par des armatures en aciers si des contraintes de tractions sont imposées ; on l'appelle alors le béton armé. [6]

Les composants principaux du béton et leurs proportions sont :

- Le ciment : 7% à 17%

Le ciment est composé de calcaire argileux et de poudre de chaux. Le plus couramment utilisé est dit ciment de Portland.

- De l'eau : 15 à 20%

L'eau, nécessaire pour l'hydratation, doit être propre, fraîche et ne pas contenir d'impuretés. L'eau potable est celle recommandée pour faire du béton.

- Des granulats 78% à 63%

Ils sont issus directement d'une rivière ou bien concassés lorsqu'ils proviennent d'une carrière.

- Adjuvants chimiques (si nécessaire)

Ajoutés en faibles quantités, les adjuvants permettent une meilleure fluidité, une accélération ou un ralentissement de la prise ou encore une meilleure imperméabilité.

- Pâte (eau + ciment) : 22% à 37% [7].

Le béton peut être classé en 3 groupes en fonction de sa masse volumique :

- Le béton léger : ρ entre 800 et 2000 kg/m$^3$
- Le béton classique : ρ entre 2000 et 2600 kg/m$^3$
- Le béton lourd : ρ supérieur à 2600 kg/m$^3$

**Fabrication du béton**

La fabrication du béton est relativement basique. Afin d'obtenir les caractéristiques mécaniques désirées, il faut jouer sur les proportions des constituants du béton. Généralement, le béton a une résistance à la compression allant de 15 MPa à 50 MPa dépendant de l'utilisation de ce dernier. En effet, par exemple, le béton coulé sur les routes a typiquement une résistance de l'ordre de 15 à 25 MPa alors que des colonnes de grandes structures ont une résistance de 40 à 50 MPa. Les proportions typiques du ciment, du sable, des granulats et le ratio d'eau/ciment pour quelques résistances sont données dans le tableau 1.1. [8]

**Tableau 1 Proportions typiques pour un mélange de 20 mm**

| Résistance | Proportions du mélange | | | Ratio Eau/ciment |
|---|---|---|---|---|
| | Ciment | Sable | Granulats | |
| 15 MPa | 1 | 2.5 | 4 | 0.60 |
| 20 MPa | 1 | 2 | 3 | 0.55 |
| 25 MPa | 1 | 2 | 2.5 | 0.5 |

Lors de la fabrication du béton, différents paramètres doivent être pris en compte : les propriétés mécaniques du béton dans son état plastique, la méthode de placement, les conditions d'utilisations et la résistance à la compression.

### 1.1.2 Les différents types de béton

Il existe trois grandes familles de béton : le béton bitumineux, le béton armé et le béton précontraint. Nous reviendrons sur les deux derniers, les plus pertinents pour notre étude et les plus courants.

#### Le béton armé

Le béton présente une résistance à la compression relativement élevé. Cependant, sa résistance à la flexion et à la traction est très mauvaise. Afin de compenser cette fragilité, on incorpore au sein du béton des armatures en acier qui pourront reprendre les contraintes de tractions. C'est ce qu'on appelle le béton armé. Les armatures utilisées sont faites en acier haute adhérence (HA) permettant le transfert de charge. Il existe deux types de renforcement : les barres crénelées et les treillis d'aciers à mailles soudées. [9]

La fabrication du béton armé passe par quatre grandes étapes :

- La réalisation du coffrage en bois ou en métal, où sera coulé le béton.
- La mise en place des armatures dans le coffrage
- La coulée du béton et le « serrage » dans le coffrage
- Le démoulage lors du durcissement final du béton.

#### Le béton précontraint

Le béton précontraint est un béton armé auquel on applique une compression artificielle et permanente. Cela va permettre de conserver un béton comprimé lorsque des forces extérieures vont appliquer des contraintes de tractions.
Il existe trois moyens de précontraindre le béton :

- Par gonflement de vérins prenant appui sur des culées fixes : On place entre le béton et les culées des vérins dont le raccourcissement va comprimer le béton. On maintient cette compression à l'aide de cales.
- Par précontrainte post-tension : A l'aide de vérin, on applique une tension sur des câbles d'acier logés dans des conduits. L'effort appliqué pour tendre ces câbles va dans l'autre sens comprimer le béton. Une fois ancrée dans le béton, la compression est conservée.
- La précontrainte prétension : Cela consiste à tendre les armatures avant la coulée du béton. Ensuite, une fois le béton durci, on relâche cette tension. Les armatures vont alors se raccourcir, appliquant ainsi une compression sur le béton. [10]

## 1.2. Les défauts et discontinuités du béton et les moyens de contrôle

### 1.2.1 Les différents défauts

Les défauts présents dans le béton peuvent avoir de nombreuses origines et peuvent être répertoriés selon différentes classes. Nous reviendrons sur les plus courants, à commencer par la fissuration.

**La fissuration**

La fissuration est le défaut le plus courant rencontré dans le béton. Les fissures peuvent être très préjudiciables à un ouvrage car elles donnent un accès à l'air et à l'humidité qui peut provoquer une oxydation des armatures et endommager le béton. La fissuration peut apparaître à deux moments :

Avant le durcissement du béton. La fissuration provoquée par le mouvement du béton et peut se générer pour trois raisons principales :

- Les conditions ensoleillés et venteuses

- La tendance du béton à suivre les lignes des armatures alors qu'il est plastique.
- Un mouvement du coffrage

Après le durcissement du béton, la fissuration peut être due aux contraintes appliquées, l'évaporation de l'excédent d'eau présent dans le béton, etc.

**Les autres discontinuités**

Beaucoup d'autres phénomènes peuvent provoquer la fissuration du béton. Les principaux sont les suivants :

- Le gel et le dégel de l'eau présente dans le béton. En période hivernale, l'eau présente dans les porosités du béton va se transformer en glace. Le béton ne pouvant pas résister à ces augmentations de volume, une fissuration va apparaître suivit d'un écaillage et des zones de délaminations dans le béton. La propagation de la fissure est montrée sur la coupe d'une dalle de béton de la figure 1.1. [11].

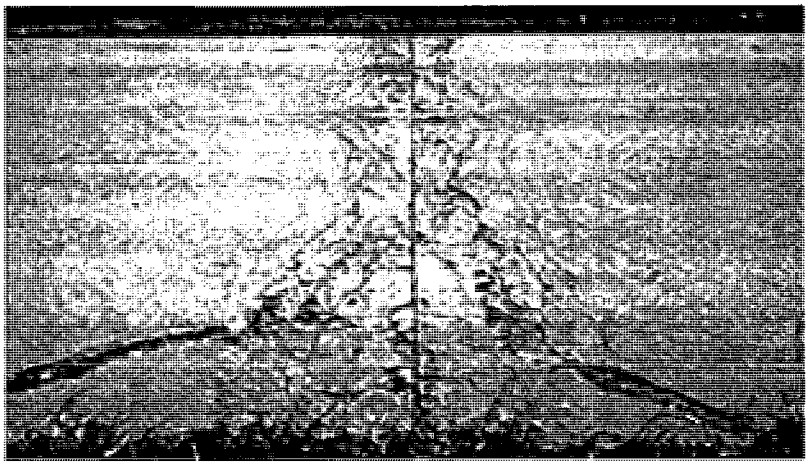


**Figure 1.1 Coupe d'une dalle de béton ayant subit la propagation d'une fissure par gel et dégel de l'eau. [11]**

- La réaction alcali-silice. Les constituants minéraux actifs de certains agrégats vont réagir avec les hydroxydes alcalins présents dans le béton pour donner un gel prenant beaucoup plus de volume. Cela va provoquer un réseau de fissures comme montrés sur la figure 1.2. [12]

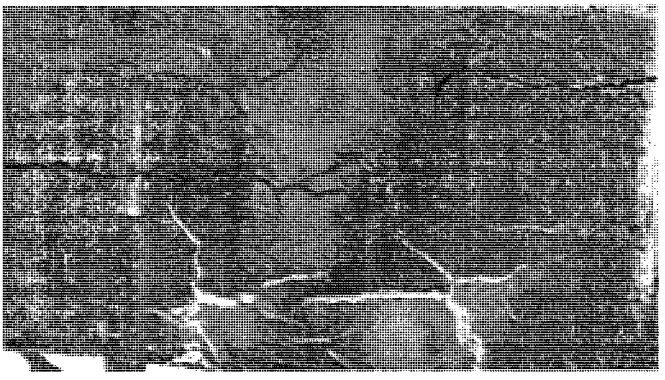


**Figure 1.2 Réseau de fissurations provoqué par la réaction alcali-silice. [11]**

- La corrosion des armatures. Lors de l'attaque des armatures par l'eau, la rouille va occuper plus de place que l'acier. Cela va ainsi induire des contraintes internes provoquant une fissuration. Cela va aussi entraîner une perte de transfert de charge entre les armatures et le béton, le rendant beaucoup plus sensible aux forces de traction. [13]

- Les nids d'abeilles apparaissent lorsqu'il n'y a pas suffisamment de particules fines et que les espaces entre les granulats les plus gros ne sont pas complètement comblés par le mortier. [14].
  Les nids d'abeilles créent alors un passage privilégié à l'infiltration d'eau et aggrave ainsi le phénomène de gel/dégel et réduit les propriétés mécaniques du béton.

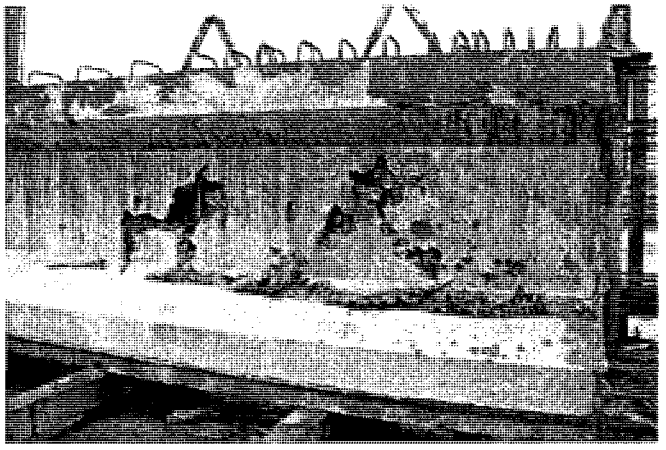


**Figure 1.3 Exemple de détériorations par nids d'abeilles. [15]**

### 1.2.2 Les propriétés et les moyens de contrôle du béton

#### Les propriétés du béton

Lorsqu'il est à l'état plastique, deux paramètres importants sont à contrôler : La faisabilité et la cohésion du béton. La faisabilité consiste en la capacité des éléments constituants le béton de se mélanger pour donner son aspect fini. Les conditions de fabrication, de densité et d'humidité jouent des rôles primordiaux et peuvent affecter les propriétés du béton. La cohésion mesure la capacité du béton à se maintenir, face au surplus d'eau, ou au contraire un manque d'eau ou encore à la ségrégation de granulats. [16]. A l'état durci, les propriétés les plus importantes sont la durabilité et la résistance du béton. En effet, on va souhaiter principalement que le béton résiste à l'usure afin de protéger les armatures du béton armé et éviter les fissurations. Ensuite, la résistance à la compression est la deuxième propriété à contrôler. Ces deux propriétés sont complètement dépendantes du taux d'humidité, des densités, de la quantité d'eau présente dans le béton ou encore du type de ciment. Il faut ainsi contrôler différents paramètres sur des structures déjà existantes:

- L'homogénéité du béton
- La densité et la résistance mécanique
- La localisation des armatures et leurs tailles
- Les détériorations dues à la corrosion sur les structures

- La présence de fissures, de vides, manque de contact avec les armatures, la délamination, et d'autres détériorations. [17]

Différentes propriétés sont à contrôler sur le béton. Trois types de contrôles sont alors portés sur le béton :

- Des contrôles permettant aux concepteurs de pouvoir faire les ajustements nécessaires afin d'assurer des matériaux d'apport acceptable.
- Des contrôles permettant de vérifier que le béton possède les propriétés correspondantes aux spécifications du cahier des charges.
- Des contrôles sur le béton lorsqu'un doute est émis sur la fiabilité d'un béton âgé, endommagé ou encore détérioré. [18]

La partie suivante présente ainsi les différents types de contrôle existants.

**Les contrôles destructifs**

Les essais de compression permettent de déterminer la résistance du béton. Ils sont réalisés dans les conditions standards en laboratoire. Ces essais sont utilisés lors de la conception du mélange afin d'évaluer les proportions des différents constituants pour avoir la résistance désirée ou pour contrôler la qualité d'un béton *in situ*. On réalise alors des cylindres ou des cubes en béton en fonction de la norme utilisé. La norme C 39 régit par l'ASTM utilise des échantillons cylindriques moulés comme montré sur la figure 1.4. [19]

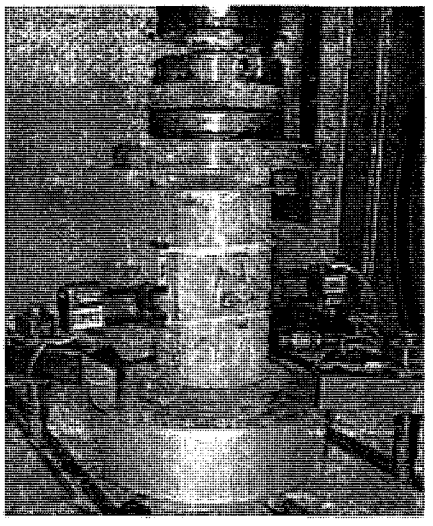


**Figure 1.4 Exemple d'essai de résistance à la compression sur le béton. [20]**

Les essais de tractions sont aussi utilisés pour contrôler. Par contre, ces tests sont beaucoup moins fréquents car le béton n'est pas conçu pour être sollicité en traction. Ces essais permettent plus d'évaluer les barres d'armatures du béton armé. Cette information va permettre cependant d'évaluer à quel chargement correspond l'amorçage de fissures même si elles apparaissent plus communément à cause des gradients de températures [19].

Les essais de flexion permettent de donner une information sur la résistance à la flexion du béton. Lors de la conception des chaussées par exemple, différents calculs de flexions sont réalisés afin de déterminer les proportions des éléments constituants le béton. Cette méthode est standardisée par l'ASTM C 78 pour le chargement trois points et l'ASTM C 293 pour le chargement quatre points comme le montre la figure 1.5. [21] [22] [23]

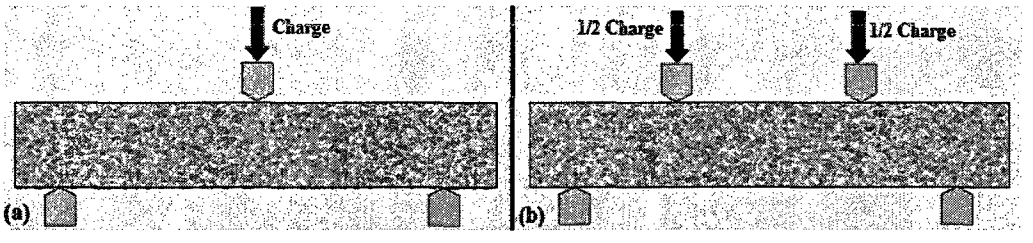



**Figure 1.5 Schéma des méthodes standards ASTM C 78 (a) et ASTM C 293 (b) [23]**

Les essais de carottage permettent d'établir des diagnostiques sur l'état du béton et présentent donc un caractère indispensable. Le principe est relativement basique. Il consiste à réaliser l'extraction d'une carotte de béton en réalisant un prélèvement par perçage comme il est montré sur la figure 1.6. Le carottage permet une inspection visuelle du béton en profondeur. Ensuite, cette dernière peut être couplée avec une estimation de la résistance. Le carottage peut donner aussi des informations très utiles pour la détection de détériorations non visibles. Enfin, il peut aussi permettre d'évaluer la densité, l'absorption d'eau ou encore l'expansion des réactions alcali-silice et différentes analyses chimiques peuvent être effectuées comme le taux de chlorure, de sulfate, le pH ou encore le ratio ciment/eau. Le carottage est standardisé dans la majorité des pays comme l'ASTM C 42 aux Etats-Unis ou encore au Canada. [24]

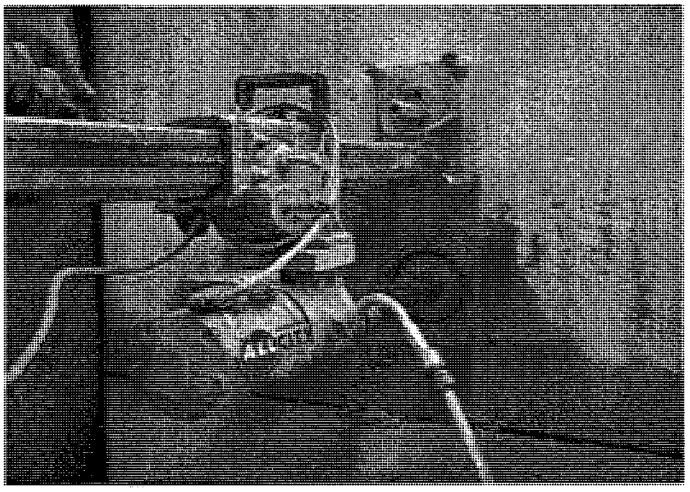


**Figure 1.6 Essai de carottage sur un échantillon de béton [25]**

**Les contrôles semi-destructifs**

On appelle un test semi-destructif lorsqu'il est la transition entre un test destructif et non destructif. En effet, il est en partie destructif car il va mener à l'endommagement partiel d'une structure mais suffisamment localisée pour ne pas causer de perte dans la performance du béton et est facilement réparable.

La sonde de Windsor est connue comme étant le meilleur moyen de réaliser un essai de résistance à la pénétration. Le principe est de mesurer la résistance à la pénétration d'une sonde de 8 cm (3.1 pouces) de longueur et de 6.5 mm de diamètre (0.25 pouce). La profondeur de la pénétration permet alors de donner une indication de la résistance à la compression du béton de masse. La sonde doit être cependant étalonnée en fonction de la taille des granulats et du type de béton. Cette méthode reste semi-destructive car le trou crée par la sonde est facilement réparable. [26]

Le test d'arrachement ou de « pull-out » est aussi un essai très utilisé pour mesurer la résistance intérieure du béton de masse. Il mesure la force nécessaire pour réaliser l'extraction d'une tige en acier normalisée élargie par une tête à son extrémité, encastrée dans le béton comme le montre la figure 1.7. En utilisant une relation préétablie, il est possible d'estimer la résistance à la compression du béton. [27]

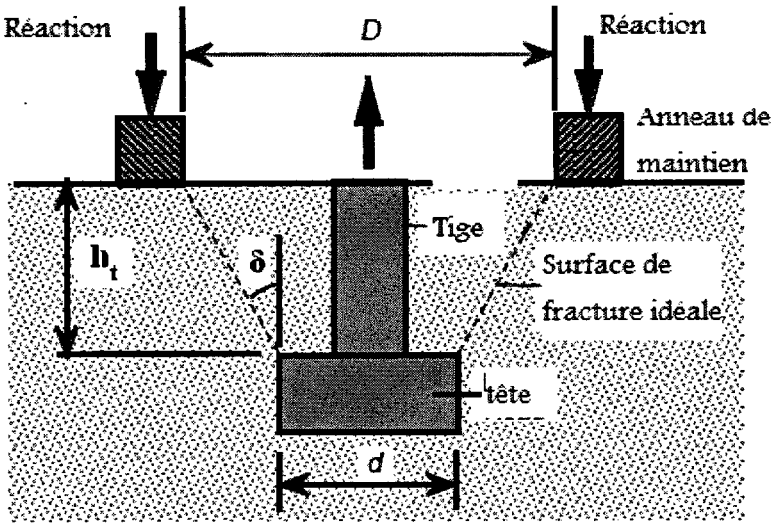



**Figure 1.7 Essai d'arrachement sur le béton. [27]**

L'anneau de maintien transmet la force de réaction au béton. La contrainte est contrôlée par le diamètre intérieur de l'anneau (D), le diamètre de la tête (d) ; la longueur de la tige ($h_t$). [28]

L'angle d'apex (2δ) est donné par la relation suivant :

$$2\delta = 2\tan^{-1}\frac{D-d}{2h} \tag{1.1}$$

Le test d'arrachement est très utilisé pour décider si des activités critiques comme des post-tensions ou encore la finition pour la protection contre le froid peuvent être entreprises.

Deux types de tests d'arrachement existent :

- Le test danois, où la tige est placée lors de la construction. Cela donne une bonne indication de la résistance à la compression au niveau de la surface
- Le test d'arrachement anglais consiste en le perçage d'un trou et l'insertion d'une fixation qui est arrachée.

Le test d'adhésion consiste à attacher une plaque en résine d'époxy puis de mesurer la force nécessaire pour arracher la plaque. Malgré les cicatrices formées, cet essai nous donne une indication de la résistance à la traction en surface qui peut être corrélé à la résistance à la compression. [29]

**Les contrôles non-destructifs**

En raison des contraintes des contrôles destructives, de nombreux tests non destructifs ont été développés. Certaines propriétés du béton peuvent être liées à la résistance ou encore donnent des informations sur le bon état d'une structure. Les différents tests non destructifs sont décrits brièvement ci-dessous. Les tests semi-destructifs sont aussi pris en compte dans cette partie car ils sont généralement assimilés à des tests non destructifs. On répertorie différentes classes de contrôles non destructifs selon les procédés mis en jeu pour réaliser la prise de données. On classe ces essais selon 6 classes présentées ci-dessous :

1. L'inspection visuelle

L'inspection visuelle est le test non destructif le plus simple et le plus facile à mettre en œuvre. Le but de l'inspection visuelle est de détecter les défauts et les dommages apparaissant en surface. Cependant, l'accès à la surface d'étude doit être possible et les décisions sont étroitement liées à la vigilance de l'inspecteur. On peut utiliser de nombreux outils comme des endoscopes afin de contrôler avec plus de précision des structures. [30]

2. L'essai de résistance à la pénétration

Ce test consiste en la mesure de la profondeur de pénétration d'une sonde en alliage durci. Cette profondeur fournit une indication sur la résistance du béton à la compression grâce à des corrélations entre le type d'agrégats et la profondeur de pénétration. [31]

3. L'essai de rebondissement

L'essai de rebondissement a pour but de mesurer la dureté superficielle du béton en appliquant le rebond d'une masse élastique appelée marteau de Schmidt. Le rebond va apporter un indice sclérométrique mesuré sur une échelle que l'on peu corréler de manière empirique avec la résistance. [32]

4. Les essais d'arrachement ou d'adhésion

- Essai d'arrachement

L'essai d'arrachement consiste en la mesure de la force nécessaire pour extraire une tige en acier spécialement profilé. La force nécessaire peut être corrélée à la résistance à la compression.

- Essai d'adhésion

L'essai d'adhésion consiste en la mesure de la force nécessaire pour arracher une plaque de résine époxy du béton. De même que pour le test d'arrachement, une

corrélation peut être faite pour déterminer la résistance à la compression. Dans les deux cas, ce sont des tests semi-destructifs car ils peuvent entraîner une détérioration du béton. [27] [33].

5. Les essais d'auscultation

- Essai par Radar

La méthode utilisant le Radar (Radio Detecting And Ranging) consiste en l'émission d'ondes radio (de 0.5 à 2GHz) dans le béton. Lors du changement de caractéristiques électriques, à la rencontre d'un objet ou encore d'un changement de milieu, une partie de l'énergie est réfléchie (écho) et le reste continue avec une nouvelle vitesse. L'écho est intercepté par l'antenne réceptrice. Les signaux reçus vont alors permettre de tracer un profil du matériau testé à l'aide d'un transducteur combiné avec un enregistreur graphique à balayage. [18]

- Essais par ultrasons

*Vitesse d'impulsions ultrasoniques* : Cet essai consiste en la mesure de la vitesse de propagation d'impulsions ultrasoniques émises par un transducteur dans le béton. Les vibrations vont être réfléchies lors du changement de phases et le transducteur récepteur placé à une distance connue va pouvoir les recevoir. Cette méthode est idéale pour déterminer l'homogénéité du béton.

*Echo d'impulsions ultrasoniques* : Cet essai consiste en l'émission d'ondes ultrasonores dans le béton et celles réfléchies sont détectées par un accéléromètre. Le signal est alors intégré pour être observé par un oscilloscope. [34]

- Émission acoustique

Cet essai consiste en la détection des ondes ultrasonores générées par l'activité de la structure et la présence de fissures. La détection est généralement réalisée par des capteurs de type piézo-électrique placés au contact de celle-ci.

6. Les essais électriques et électromagnétiques

- Mesures des demi-potentiels électriques

Cette méthode consiste en la mesure de potentiels électriques des barres de renforcement du béton en acier par rapport à une électrode de référence. Cela donne une indication sur la probabilité de corrosion des armatures.

- Le détecteur d'armatures

La présence d'armatures en acier perturbe le champ magnétique. Une sonde en surface va détecter une perturbation du champ lors de la présence de renforcement.

7. Les essais thermographiques

- Méthode thermographique

Cet essai consiste en la détection, par une caméra, des variations de radiations infrarouges à la surface du béton. Les gradients thermiques vont varier en fonction de la température entre le béton sain et détérioré. Ainsi, les délaminations dans les surfaces du béton peuvent être détectés.

8. Les essais radioactifs

- La radiographie Gamma

Cet essai consiste en l'émission de rayonnements radioactifs à travers le béton. Les radiations vont être atténuées par la matière traversée et une plaque photographique de Rayons X va être placée sur la face arrière. La densité et l'épaisseur peut être alors déterminée par l'atténuation.

Ces différents essais non destructifs ne sont pas exhaustifs et, ici ne sont présentés que les plus courants. Voici le tableau 1.2. récapitule les méthodes présentées précédemment :

**Tableau 1.2 Comparatif des différentes méthodes non destructives**

| Technique | Principe | Applications | Avantages | Inconvénients |
|---|---|---|---|---|
| L'inspection visuelle | Examen visuel de l'aspect extérieur | Obtenir des informations sur les dégradations visibles | Fournit des informations utiles sur les causes des dégradations et leur étendue. | Aucune information sur les dégradations internes. Des contrôles complémentaires sont requis. |
| résistance à la pénétration | Mesure de profondeur de pénétration d'une sonde | Estimation de la résistance à la compression et de l'uniformité du béton | Facile d'utilisation et opérable *in situ* | Endommage légèrement la surface et nécessite une épaisseur minimale de pénétration |
| Scléromètre | Mesure de la dureté des surfaces | Estimation de la résistance à la compression, de l'uniformité et la qualité du béton | Peu coûteuse, résultats rapides. | Affectés par les conditions des surfaces. Nécessite un recalage pour obtenir une estimation acceptable de la résistance en compression |
| Arrachement/ adhésion | Mesure de la force nécessaire pour extraire une tige d'acier ou une plaque époxy | Estimation de la résistance à la compression et à la traction du béton. | Mesure rapide de la résistance avec une bonne estimation. | L'installation doit être faite durant l'étape de construction et n'indique que des informations sur la qualité en surface |
| Émission acoustique | Détection du bruit émis par une structure sous contraintes | Contrôle des structures métalliques. Contrôle des câbles. Contrôle de l' endommagement du béton | Peu coûteuse Auscultation de structures de grandes dimensions. | Méthode passive : les défauts doivent évoluer pour être détectés. Détection localisée. |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Radar | Mesure du temps de propagation des ondes électromagnétiques ou de leur atténuation dans le béton | Auscultation des structures et chaussées | Facile à utiliser. Auscultation rapide et de grandes surfaces. Mise en évidence des zones dégradées. | Sensible à l'humidité. Le traitement des données nécessite un personnel très qualifié. |
| Ultrasons -ultrasons -Pulse-Echo | Émission de rayons gamma et mesure d'atténuation | Estimation de la qualité et l'uniformité du béton. Localisation des vides et des fissures | Essai relativement simple | Manque de précision. Analyse des résultats par une personne qualifiée. L'humidité et la présence de renforts peuvent affecter les résultats |
| Demi-potentiels électriques | Mesure de la résistivité, du potentiel d'électrode. | Déterminer la probabilité de corrosion dans une structure | Peu coûteuse, qualification Normale requise | Fournit uniquement la probabilité de corrosion et non son importance. Affectée par la teneur en eau et en chlorures et la température. |
| Détecteur d'armatures | Générer un champ magnétique et en mesurer l'intensité | Localisation et détermination de la profondeur des armatures Détection de ruptures de câbles | Peu coûteuse | Imprécise et inefficace dans les zones très fortement armées. Qualification minimale requise. |
| Radiographie | Le rayon X est plus ou moins atténué selon qu'il traverse le béton ou l'acier. Impression d'un film radiographique | Localisation des fissures internes vides et variation de la densité et la composition du béton. Localisation des tiges de renforcement | Les défauts internes peuvent être détectés. | L'intensité de la radiation ne peut pas être ajustée. Personnel Hautement qualifié. Deux surfaces Opposées doivent être accessibles. |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Thermographie infrarouge | Mesure du champ de température à la surface d'un ouvrage | Auscultation des structures et chaussées. | Essai rapide. Auscultation de grandes surfaces Cartographie détaillée de la surface d'une structure. Mise en évidence des réseaux de fissures. | Sensible aux conditions climatiques. L'exploitation des images nécessite beaucoup de corrections. |

## 1.3. La méthode par Radar pénétrant

### 1.3.1 Principe fondamental

Le Radar pénétrant est analogue à la technique ultrasonore. Cependant, le principe est basé sur la propagation d'ondes électromagnétiques et non des ondes de contraintes. C'est la propagation des ondes à travers des matériaux de différentes constantes diélectriques. Plus la différence entre ces constantes sera élevée, plus il y aura réflexion de l'énergie électromagnétique. Les premières applications du Radar dans le domaine du génie civil étaient pour sonder les conduits enterrés et les réservoirs. Ensuite, l'usage de cette technique s'est étendu à bien d'autres applications :

- La détermination de l'épaisseur d'une structure
- La localisation de vides ou de détériorations...
- La localisation de barres de renforcement

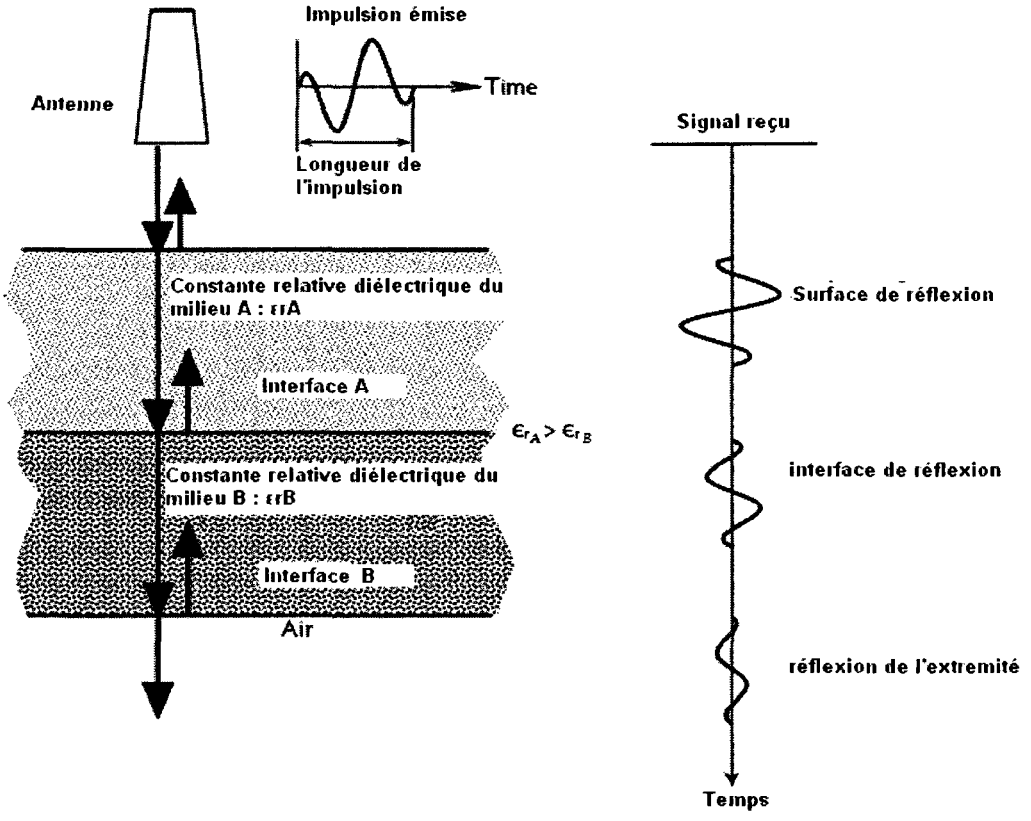



**Figure 1.8 Réflexion de l'impulsion électromagnétique à l'interface entre les différents milieux et le signal reçu par l'antenne en raison des échos. [31]**

Le Radar va émettre une impulsion électromagnétique qui va se propager dans le milieu ausculté. A l'interface de deux milieux présentant des constantes diélectriques différentes, une partie de l'énergie émise par la source sera réfléchie et l'autre poursuivra son chemin comme le montre la figure 1.8. [35]. Les réflexions sont alors enregistrées par le récepteur pendant un intervalle donné. Un radargramme est constitué créant un profil de la structure avec la possibilité de se déplacer en profondeur comme le montre l'exemple type de la figure 1.9.

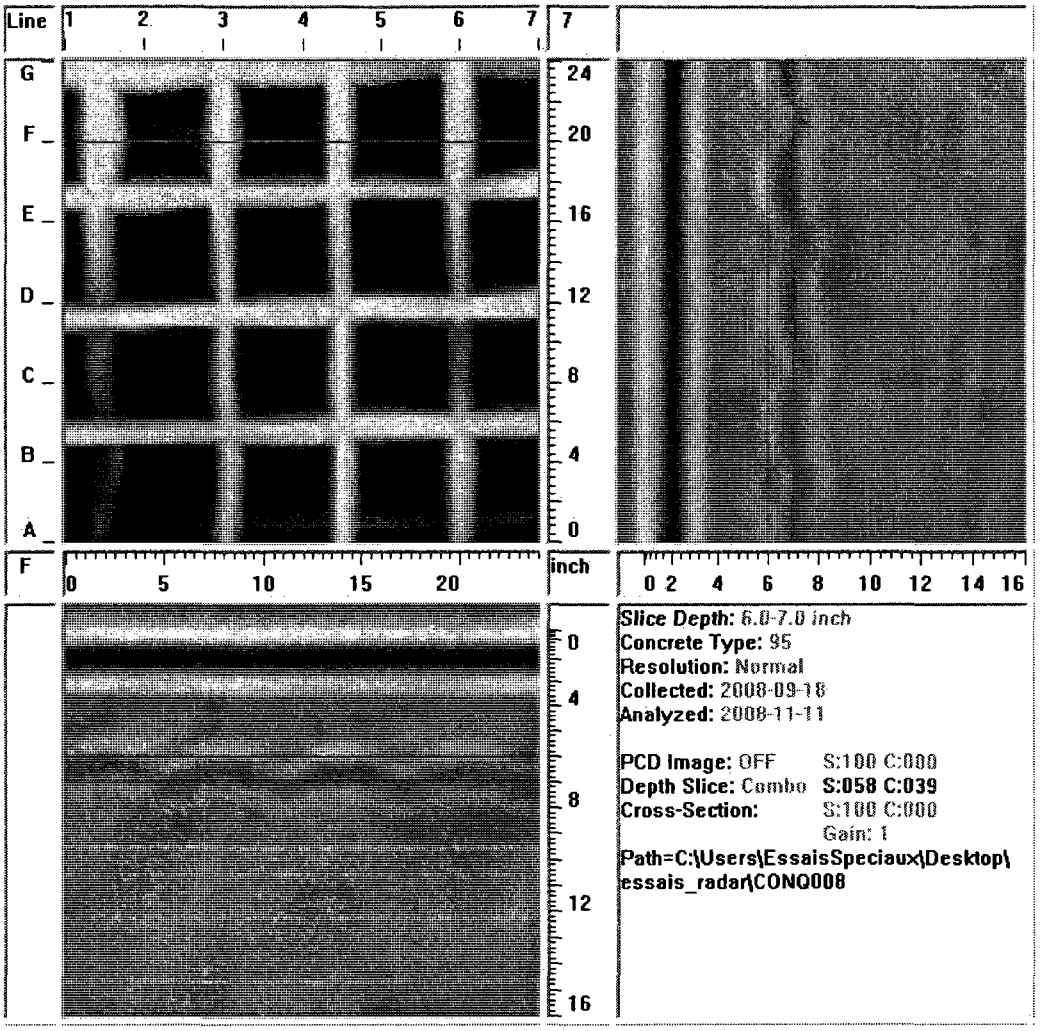



**Figure 1.9 Radargramme mettant en relief les armatures, réalisées par le CONQUEST de Sensors & Software dans les laboratoires d'essais Mequaltech**

L'intensité de l'énergie réfléchie et celle de l'énergie incidente sont liées par la relation suivante :

$$\mu_{A,B} = \frac{ER}{EI} = \frac{\eta_A - \eta_B}{\eta_A + \eta_B} = \frac{\left(\sqrt{\varepsilon_{rA}} - \sqrt{\varepsilon_{rB}}\right)}{\left(\sqrt{\varepsilon_{rA}} + \sqrt{\varepsilon_{rB}}\right)} \tag{1.2}$$

Où

$\mu_{A,B}$ Est le coefficient de réflexion à l'interface.

$\eta_A / \eta_B$ Sont les impédances en ohms des ondes des milieux A et B.

$\varepsilon_{rA} / \varepsilon_{rB}$ Sont les constantes diélectriques relatives des milieux A et B.

Avec l'impédance pour un milieu non-métallique donné par la formule suivante :

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}} \tag{1.3}$$

Et

$$\varepsilon_{rA} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{1.4}$$

Où

$\mu_0$ Est la perméabilité magnétique de l'air ($4\pi \times 10^{-7}$ Henry/mètre).

$\varepsilon$ Est la constante diélectrique du milieu en Farad/mètre.

$\varepsilon_0$ Est la constante diélectrique dans l'espace ($8{,}87 \times 10^{-12}$ Farad/mètre).

La valeur typique de la permittivité relative dans le béton ($\varepsilon_r$) est approximativement entre 5 et 12, dépendant en premier du taux d'humidité et de la fréquence du signal. Cela donne des vitesses allant de 134 à 87 m/s [36]. On notera que les métaux sont des réflecteurs parfaits car leurs impédances sont nulles. [37]

### 1.3.2 Procédure expérimentale

#### Applications typiques

Le Radar trouve des applications dans de nombreux domaines. Il est souvent utilisé par exemple sur des sites archéologiques ou encore pour des recherches géologiques sur des roches ou différentes sortes de sols. Dans les applications du génie civil, le Radar est souvent utilisé pour balayer une surface de béton désirée à l'étude afin de réaliser un profil de cette dernière car il s'avère être un outil rapide et facile d'utilisation. Pour ce faire, on maintien une antenne émettrice et une autre réceptrice

à une distance constante alors qu'on déplace le Radar le long d'une ligne définie comme le montre la figure 1.10. Typiquement, le Radar est utilisé à une fréquence allant de 0.5 à 2 GHz. Lors de l'utilisation, les antennes doivent être le plus perpendiculaires possibles afin de limiter les interférences avec le signal transmis.

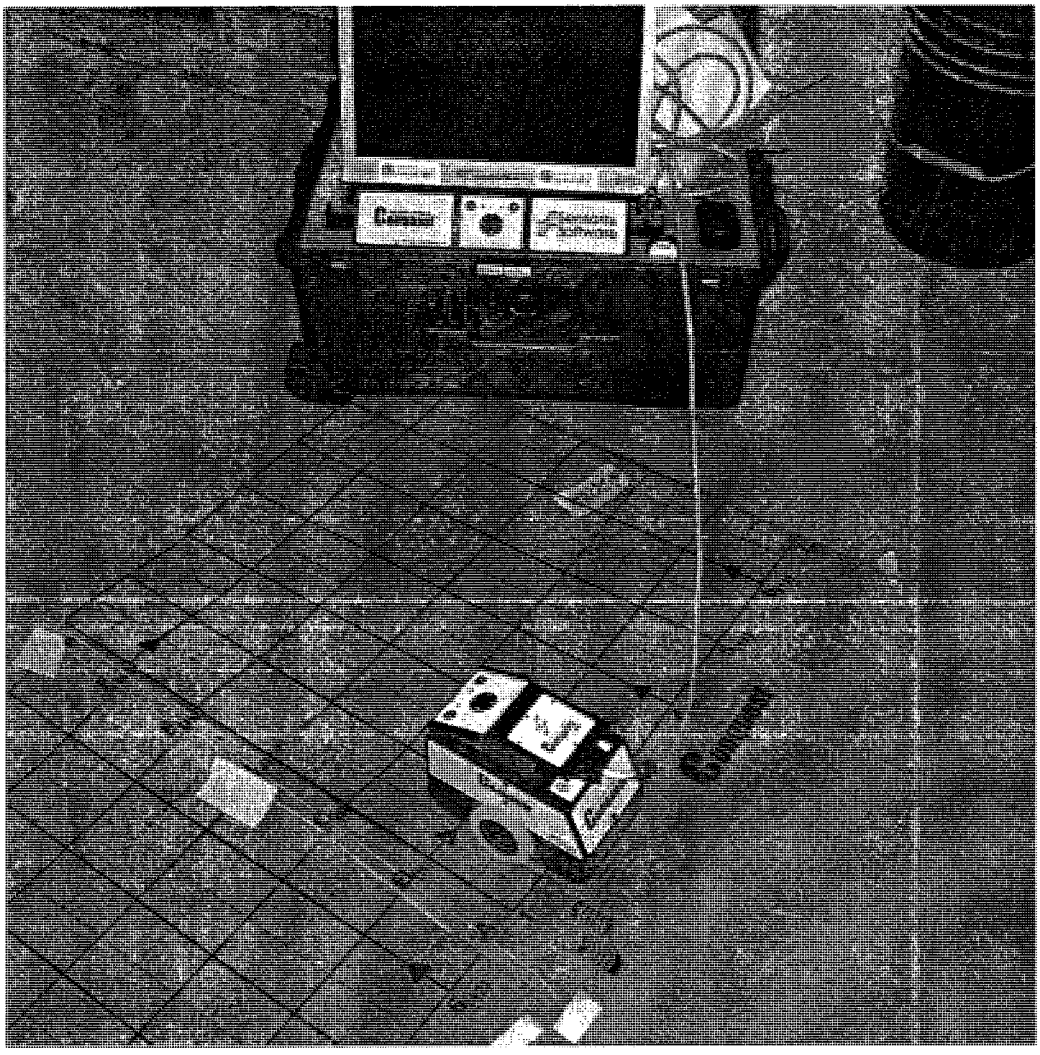


**Figure 1.10 Appareillage pour la réalisation d'un radargramme : CONQUEST de Sensors & Software dans les laboratoires d'essais Mequaltech.**

Le Radar est capable de détecter un grand nombre de paramètres dans le béton. Le tableau 1.3 compare, en fonction de leur fiabilité, les principales applications du béton.

**Tableau 1.3 Comparaison des applications du Radar selon leurs fiabilités [36]**

| Applications | Degré de fiabilité |
|---|---|
| | |
| Estimation de l'épaisseur d'éléments à partir de la surface | ******* |
| Localisation d'armatures et estimation de la profondeur | ******* |
| Détermination des principales caractéristiques de construction | ****** |
| Localisation des variations d'humidité | ***** |
| Localisation des vides | **** |
| Dimensions des vides | *** |
| Localisation des fissures | ** |
| Estimation du diamètre des barres d'armatures | * |

**Interprétation des données**

Différents paramètres et facteurs doivent être connu par la personne qui interprète les données apportées lors de l'auscultation du Radar :

- Il est important de savoir que les formes hyperboliques peuvent représenter des points de réflexion.
- La vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans un béton humide est réduite.
- Les ondes électromagnétiques émises dans un béton humide sont plus facilement atténuée.
- Les ondes ne peuvent pas pénétrer dans de nombreux conducteurs comme les métaux ou encore l'eau salée
- Le Radar ne permet pas de détecter les régions proches de la surface en raison de la taille de l'onde. [38] [39]

Revenons maintenant sur un point important présenté précédemment comme un des paramètres qu'il faut connaître : la distance minimale de détection. Elle est égale à $\lambda/3$, valeur proportionnelle à sa vitesse de propagation, selon la relation suivante :

$$v_{oe} = f_{oe} \times \lambda_{oe} \quad (1.5)$$

Avec $v_{oe}$ : vitesse de propagation de l'onde électromagnétique

$f_{oe}$ : fréquence utilisée

$\lambda_{oe}$ : longueur d'onde des ondes électromagnétiques

Les distances de la surface typiques sont données pour différentes fréquences et différentes constantes diélectriques.

**Tableau 1.4 Distances typiques minimales à partir de la surface pour la détection. [37]**

| Fréquence de l'antenne (MHz) | Distance minimale de détection (cm) : λ/3 | | |
|---|---|---|---|
| | ε = 6 Béton sec | ε = 9 | ε = 12 béton humide |
| 500 | 25 | 20 | 18 |
| 900 | 13.5 | 11 | 10 |
| 1000 | 12 | 10 | 9 |
| 1500 | 8 | 7 | 6 |

Ce tableau montre ainsi que plus la fréquence est basse, plus la distance minimale de détection sera grande. Cependant, on note une perte de résolution. Il est ainsi important d'adapter la fréquence pour rechercher un compromis entre résolution et pouvoir de pénétration. Une attention particulière a été donnée sur la compréhension des propriétés diélectriques du béton afin de mieux interpréter et d'estimer les résultats apportés par une auscultation. De nombreuses études ont été menées sur les effets de matériaux caractéristiques, de l'humidité et du taux de chlorure. Elles ont confirmées que l'humidité influe beaucoup sur la permittivité relative et la conductivité [40]. De nombreuses tentatives de modélisation analytiques ont été entreprises mais restent très limitées en raison de la complexité du système.

### 1.3.3 Avantages et limites du Radar

**Avantages**

Le Radar est un outil fréquemment utilisé comme essai non destructif pour de grandes structures comme des ponts ou encore des routes car c'est un moyen facile et rapide d'ausculter des ouvrages. Le Radar est aussi un outil très puissant car il peut donner une pseudo-image qui peut être facilement convertie en profondeur et des données précises allant jusqu'au centimètre. De plus, il répond aux objets métalliques et non métalliques et va être capable de détecter des hétérogénéités, une porosité, ou encore des délaminations caractérisées par une différence de densité [37]. Enfin, mis à part une grande variété d'applications, le Radar va être beaucoup moins handicapant vis-à-vis de son environnement d'opération. En effet, l'antenne émettrice n'est pas en contact avec le sol donc, la perturbation due à la circulation est très réduite. Le tableau 1.5, ci-dessous, est récapitulatif des différents avantages du Radar.

**Tableau 1.5 Récapitulatif des avantages du Radar [37]**

| Avantages |
|---|
| Possibilité d'ausculter rapidement et efficacement de larges surfaces |
| Ne nécessite pas de couplant |
| Essai complètement non destructif |
| Profil de la structure immédiat sous la forme d'un radargramme |
| Possibilité d'enregistrement des signaux et des radargrammes |
| Sensible aux changements de matériau et aux caractéristiques mécaniques incluant le taux d'humidité |
| Ne nécessite pas de mesures de sécurité par rapport à l'émission des ondes |
| Les équipements sont portables |

**Limites**

L'un des principaux défauts que l'on peut relever sur le Radar est l'imprécision. D'une part, les auscultations au Radar peuvent parfois donner des résultats erronés. Par exemple, occasionnellement, le Radar va détecter des délaminations alors qu'il

s'agit de béton sain. D'autre part, en raison de grandes réflexions, dues notamment aux armatures, cela peut empêcher l'observation de défauts. En effet, lorsque deux défauts sont assez voisins, l'arrivée des réflexions dans un intervalle très proche peut limiter la capacité à les distinguer. Ces différentes constatations nous poussent ainsi dans l'idée que le Radar doit être accompagné d'autres méthodes complémentaires pour établir un diagnostique complet et confirmer des hypothèses.

**Tableau 1.6 Récapitulatif des désavantages du Radar [37]**

| Désavantages |
|---|
| Equipement spécialisé nécessaire pour l'auscultation |
| L'interprétation des radargrammes est parfois difficile et demande de l'expérience |
| Un compromis est souvent nécessaire entre la résolution et la pénétration |
| Les ondes ne peuvent pas pénétrer le métal ou d'autres matériaux très conducteurs |
| Les performances peuvent être affectées par différentes caractéristiques des matériaux |
| Cette technique est encore méconnue de l'industrie |

## 1.4. Les méthodes ultrasonores

### 1.4.1 Le test de vitesse d'impulsion et l'impulsion/Écho

**Théorie de la propagation d'onde et principe fondamental**

La méthode de la vitesse d'impulsion a été utilisée avec succès pour évaluer la qualité du béton depuis plus de 60 ans. Cette méthode peut être utilisée pour détecter des changements dans la structure interne du béton, mettant en évidence la présence de détériorations, de fissures ou encore d'autres défauts. Cette technique permet aussi d'évaluer les caractéristiques mécaniques et physiques du béton telles que le module d'Young, le coefficient de poisson, la résistance à la compression et l'épaisseur du béton. [18]

**Théorie de la propagation d'ondes**

Lorsqu'un milieu solide est perturbé par une un chargement vibratoire, trois types d'ondes sont crées : les ondes longitudinales ou de compression, transversales ou de cisaillement et les ondes de surface ou de Rayleigh (Figure 1.11)

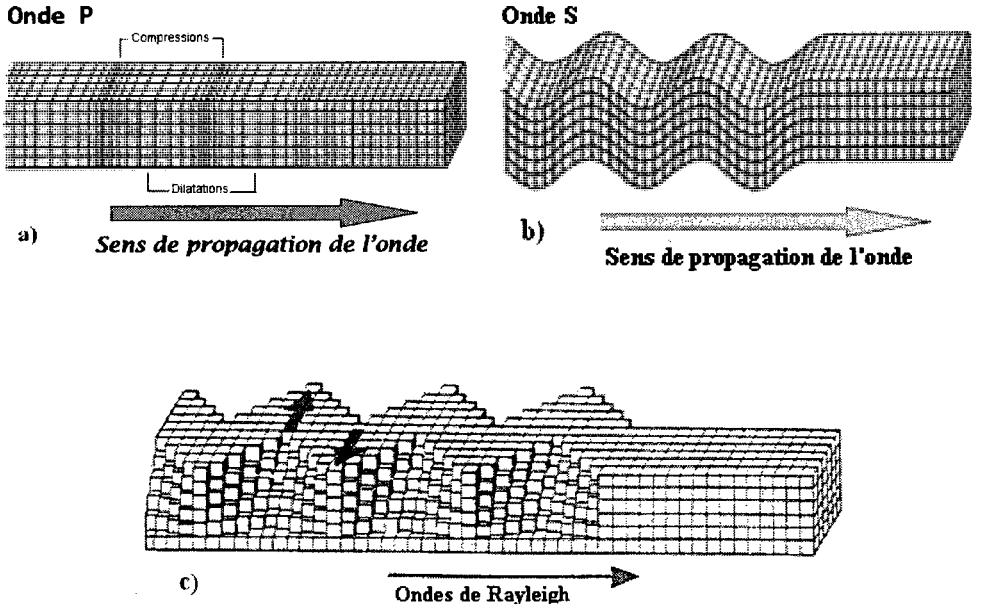



**Figure 1.11 Les différentes ondes produites par un transducteur piézoélectrique.**

a) **Ondes longitudinales ou de compression : ondes P**
b) **Ondes transversales ou de cisaillement : ondes S**
c) **Ondes de surface ou de Rayleigh**

Le déplacement de ces ondes, de proche en proche, est analogue à celui des ondes sonores dans l'air. On note que les ondes longitudinales sont celles qui voyagent le plus rapidement dans la matière. Leurs vitesses sont déterminées par les aux propriétés élastiques du milieu traversé. Ces dernières peuvent être ainsi estimées.

**Principe fondamental**

Le principe consiste en l'émission d'impulsions ultrasonores crée par un transducteur électro-acoustique (Figure 1.12) que l'on va propager dans le béton en le maintenant en contact par un couplant au béton.

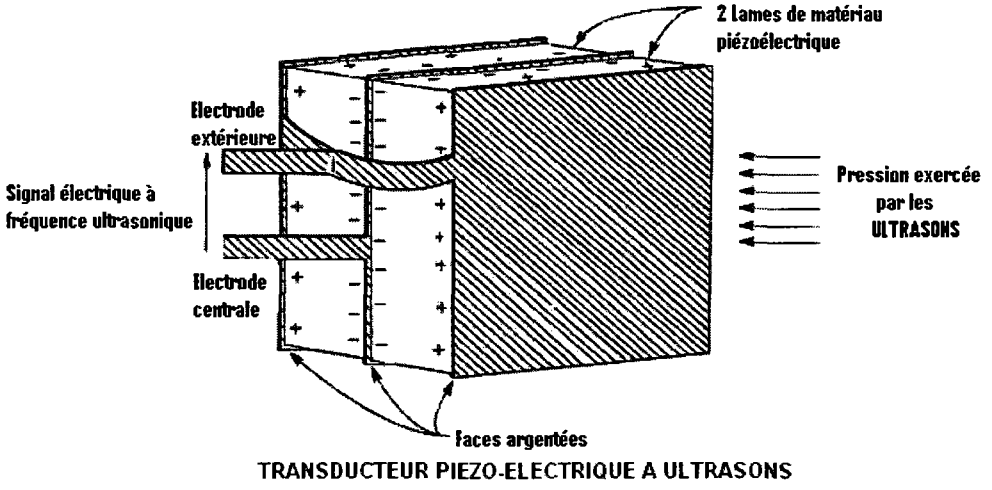



**Figure 1.12 Principe de fonctionnement du transducteur piézoélectrique. [41]**

Lors de l'émission de ces ondes, on notera de nombreuses réflexions quand on changera de phase (figure 1.13). Les premières ondes à atteindre le transducteur sont les ondes longitudinales qui sont alors converties en signal électrique.

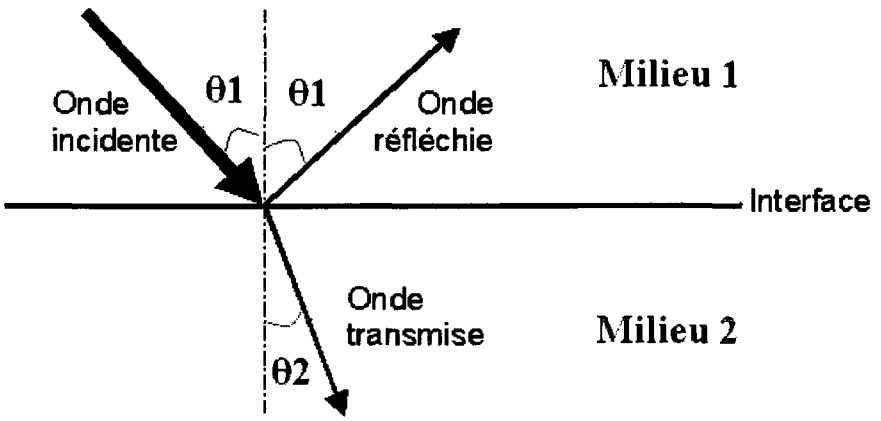



**Figure 1.13 Schéma de réfraction et de réflexion selon le principe de Snell-Decartes**

Lors d'un changement de milieu, il va y avoir un changement d'impédance menant à une réflexion et à une réfraction régit par les formules suivantes respectivement :

Coefficient de réflexion :

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{1.6}$$

Où

$Z_2$ est l'impédance du milieu 2 montré sur la figure 1.13

$Z_1$ est l'impédance du milieu 1

Et la loi de Snell-Descartes

$$sin\theta_1 V_2 = \sin\theta_2 V_1 \tag{1.7}$$

Où

$\theta_1$ est l'angle de l'onde incidente par rapport à la normale sur la figure 1.13

$\theta_2$ est l'angle de l'onde réfractée par rapport à la normale

$V_1$ est la vélocité de l'onde dans le milieu 1

$V_2$ est la vélocité de l'onde dans le milieu 2

Le temps pris pour voyager dans le béton est ainsi déterminé et la vitesse des ondes longitudinales en découle selon la relation suivante :

$$V = L/T \tag{1.8}$$

Où

V est la vitesse des ondes longitudinales.

L est la longueur de l'échantillon traversé.

T est le temps pris pour traverser l'échantillon.

Cependant, parfois, les deux côtés du béton ne sont pas accessibles ainsi, il existe trois types d'arrangement pour déterminer la vitesse de l'impulsion dans le béton comme le montre la figure 1.14. Les trois arrangements sont possibles car le béton est un milieu hétérogène, plein de discontinuités, engendrant beaucoup de dispersion. Même si l'émetteur et le récepteur ne sont pas face-à-face, on pourra quand même capter une partie du signal.

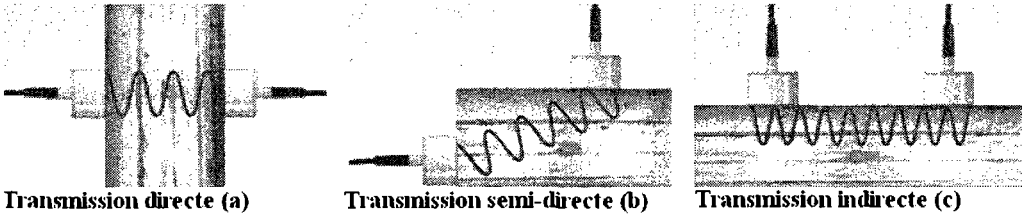



**Figure 1.14 Les trois modes d'auscultation par la méthode ultrasonore sur le béton. [46]**

Voici une représentation schématique des 3 possibilités d'arrangement :

- (a) La transmission où les transducteurs sont face à face

La transmission directe est la plus précise car les ondes longitudinales vont directement traverser le béton sur l'épaisseur.

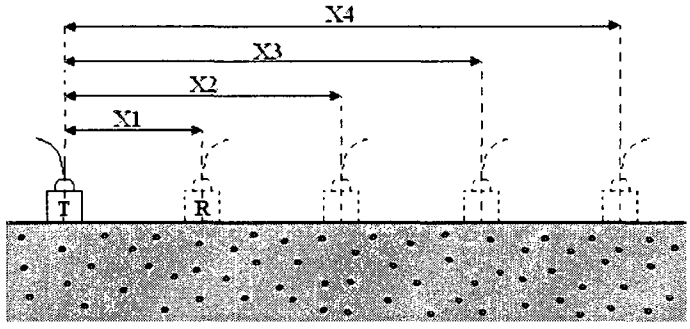
- (b) La transmission semi-directe où les faces sont adjacentes

La transmission semi-directe est moins précise que la précédente mais est généralement suffisante considérant la distance typique entre les deux transducteurs.

- (c) La transmission indirecte où les transducteurs sont sur la même face [41] [42].

La transmission indirecte est la moins précise des 3 arrangements. En effet, l'amplitude d'un signal reçu ne représente que 2 à 3% de celui de la transmission directe. Elle ne s'utilise généralement que quand une seule surface est accessible. Cette méthode est utile pour déterminer la profondeur d'une fissure en surface ou encore évaluer la qualité du béton en surface qui n'est cependant pas caractéristique du béton. [43]. Pour cette méthode, il est préférable de faire une série de mesures à

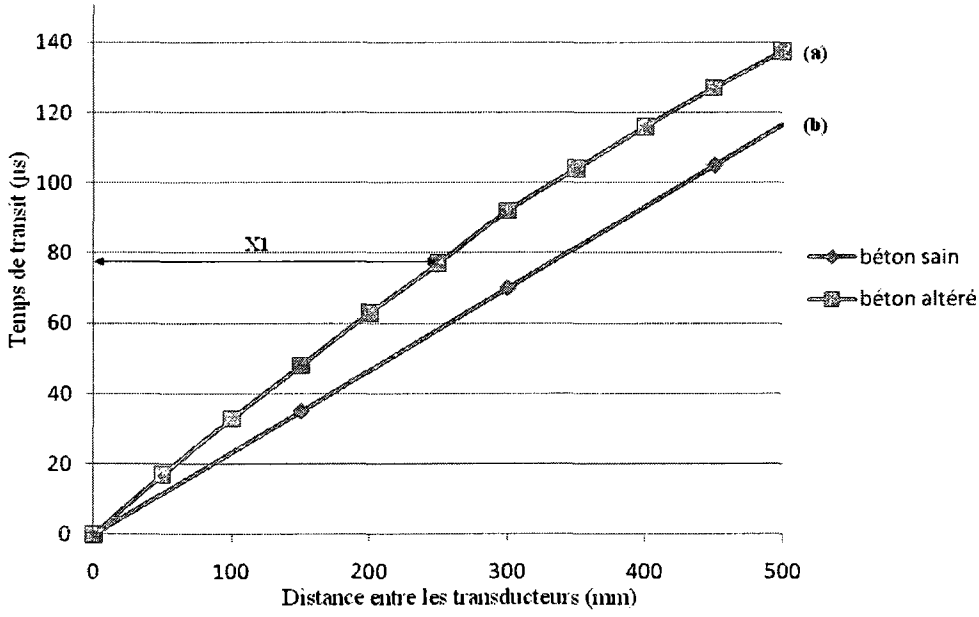
des distances connues entre les transducteurs pour éliminer l'incertitude liée à la longueur de la voie de transmission comme le montre la figure 1.15. On trace alors la vitesse en fonction de la distance entre le transducteur émetteur et le transducteur récepteur comme le montre la figure 1.16. Cette dernière compare les résultats apportés par un béton en surface de mauvaise qualité et un béton homogène [44].




T : transmetteur émettant l'onde

R : récepteur

**Figure 1.15 Configuration ultrasonique pour la méthode indirecte.**




(a) Courbe pour un béton ayant une moins bonne qualité dans la partie surfacique
(b) Courbe pour un béton homogène

**Figure 1.16 Graphique permettant de déterminer la vitesse d'impulsion comparant un béton sain à un béton altéré par la méthode indirecte.**

**Facteurs influençant les résultats**

Lors de la prise de mesures des vitesses d'impulsion, il est essentiel que les données recueillies soient stables et qu'elles soient caractéristiques des propriétés intrinsèques du béton. Cependant, inévitablement, d'autres facteurs indépendants doivent être pris en compte car ils affectent aussi les lectures. [45]
Les facteurs peuvent être classés en deux grandes familles :

- Les facteurs relatifs aux propriétés du béton
- Les facteurs indépendants des propriétés du béton (les conditions de tests)

**Les facteurs relatifs aux propriétés du béton** [18]

Différents paramètres relatifs aux propriétés peuvent influencer la vitesse des impulsions. Voici les principaux :

La taille, le type et le taux d'agrégats dans le béton:
D'une part, pour un béton ayant la même résistance à la compression mais pas le même type d'agrégats, la vitesse de l'impulsion peut être différente. Ainsi, afin de réaliser les bonnes corrélations, il est important de connaître la composition du béton. D'autre part, plus le taux d'agrégats est élevé, plus la vitesse de l'impulsion sera grande.

Le ratio eau/ciment et les mélanges:
La vitesse des impulsions va être réduite avec l'augmentation du ratio car la densité du béton va dès lors baisser. De plus, les mélanges vont influencer la vitesse des impulsions de la même manière qu'ils influencent le degré d'hydratation.

**Les facteurs indépendants des propriétés du béton**

En dehors des facteurs propres au béton, d'autres paramètres peuvent influencer la vitesse des ultrasons. Voici les principaux :

Le taux d'humidité:

Le taux d'humidité peut influencer la vitesse d'une manière chimique et physique. La présence d'eau dans les vides présents dans le béton par exemple. Afin de corriger ces effets, des corrélations peuvent être faites comme le montre le tableau 1.7.

La température du béton :

Entre 10°C et 30°C, la température n'affecte pas la vitesse des impulsions. Cependant, dès qu'on sort de cette gamme, il est nécessaire de réaliser des corrélations en reprenant le tableau 1.7 utilisé aussi pour le taux d'humidité.

**Tableau 1.7 Effets de la température et du taux d'humidité sur la vitesse des impulsions. [44]**

| Température °C (°F) | Correction (en pourcentage) | |
|---|---|---|
| | Béton sec | Béton saturé en eau |
| 60 (140) | +5 | +4.0 |
| 40 (104) | +2 | +1.7 |
| 20 (68) | 0 | 0.0 |
| 0 (32) | -0.5 | -1.0 |
| -4 (<25) | -1.5 | -7.5 |

Forme et taille de l'échantillon :

La dimension est la forme de l'échantillon sont indépendants de la vitesse des impulsions. Cependant, une dimension latérale minimale est nécessaire en dessous de laquelle la vitesse sera réduite. Pour que la vitesse ne soit pas affectée, le rapport de la longueur d'onde sur la dimension latérale doit être inférieur à 1. Le tableau 1.8 indique la relation entre la vitesse et des impulsions et la dimension minimale nécessaire.

**Tableau 1.8 Effet de la dimension de l'échantillon sur la vitesse des impulsions**

| Fréquence du transducteur | Vitesse de l'impulsion dans le béton (km/s) | | |
|---|---|---|---|
| | 3.5 | 4.0 | 4.5 |
| | Dimension minimale latérale permissible | | |
| kHz | mm | mm | Mm |
| 24 | 146 | 167 | 188 |
| 54 | 65 | 74 | 83 |
| 82 | 43 | 49 | 55 |
| 150 | 23 | 27 | 30 |

Effet des barres de renforcement :

Les barres de renforcement augmentent la vitesse des impulsions, quand elles sont proches du parcours que prennent les impulsions. En effet, les impulsions peuvent voyager dans l'acier à une vitesse deux fois supérieure à celle dans le béton. Cette influence est spécialement grande quand l'armature est parallèle à la direction de propagation de l'impulsion contrairement au cas où elle est perpendiculaire. Il est ainsi préférable de ne pas émettre les impulsions dans des zones proches d'armatures car les temps de transit peuvent être erronés car accélérés.

Longueur de parcours des ondes :

Elle doit être suffisamment grande pour permettre de ne pas prendre en compte l'aspect hétérogène du béton. On considère généralement que l'effet est négligeable quand cette dernière est supérieure à 100 mm pour une taille d'agrégat de 20 mm et supérieure à 150 mm pour une taille d'agrégat de 40 mm.

**Instrumentation**

Les appareils consistent principalement en un générateur d'impulsion, un émetteur et un récepteur. Une fois l'impulsion émise, le transducteur receveur va détecter l'impulsion transmise et une mesure du temps de voyage à travers le béton sera effectuée avec précision. Le diagramme schématique du montage est présenté ci-dessous dans la figure 1.17.

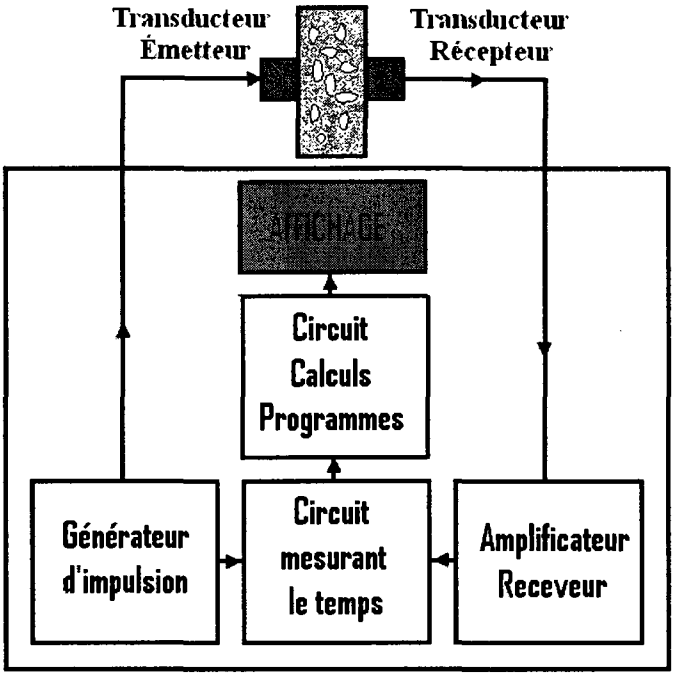



**Figure 1.17 Schématisation du principe de l'appareillage à ultrasons**

Pour transmettre ou recevoir l'impulsion, il faut utiliser un couplant afin d'éviter d'avoir de l'air entre le transducteur et le béton. Il doit alors être étalé de la manière la plus fine possible afin de ne pas affecter les mesures. Il existe différentes sortes de couplant tels que de la graisse, du savon liquide...mais la vaseline s'avère être beaucoup plus efficace.

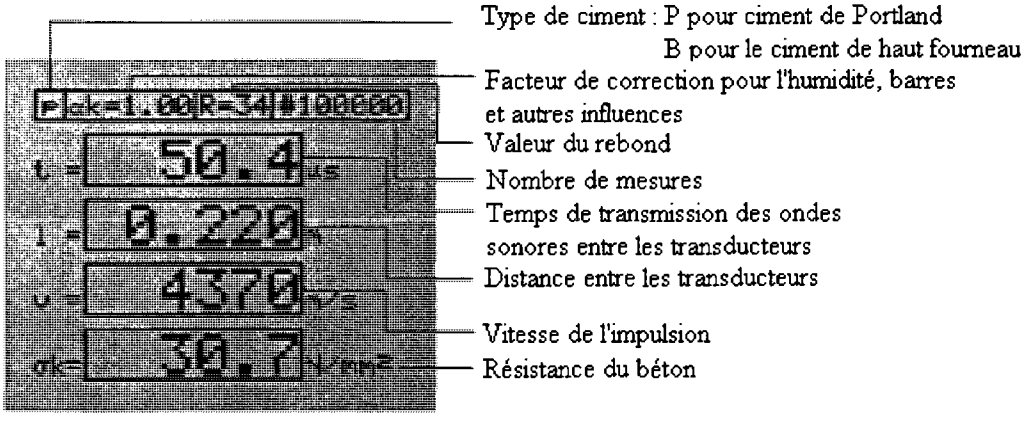



**Figure 1.18 Exemple d'affichage d'appareil à ultrasons sur le béton. [46]**

Les différents appareillages existants sur le marché sont généralement capables de mesurer et corréler la résistance à la compression à des mesures de résistance standards. Ils vont servir à identifier des nids d'abeilles, des vides, des gels, des fissures et d'autres conditions hétérogènes. La figure 1.18 donne un exemple typique d'affichage que l'on peut avoir en parallèle des oscillogrammes et la figure 1.19 montre un exemple de configuration utilisant la méthode semi-directe présentée précédemment. Les transducteurs existants ont une fréquence s'étalant sur une gamme allant de 24kHz à 150kHz, les fréquences les plus courantes pour le béton. Lors d'une analyse, il faut utiliser un couplant permettant le passage des ondes à la sortie du transducteur vers le béton sans passage par l'air. Les appareils déjà existants donnent maintenant une résistance à la compression plus précise car elle est corrélée avec la valeur du rebond donnée par le marteau de Schmidt que nous développerons dans une des parties suivantes [47].

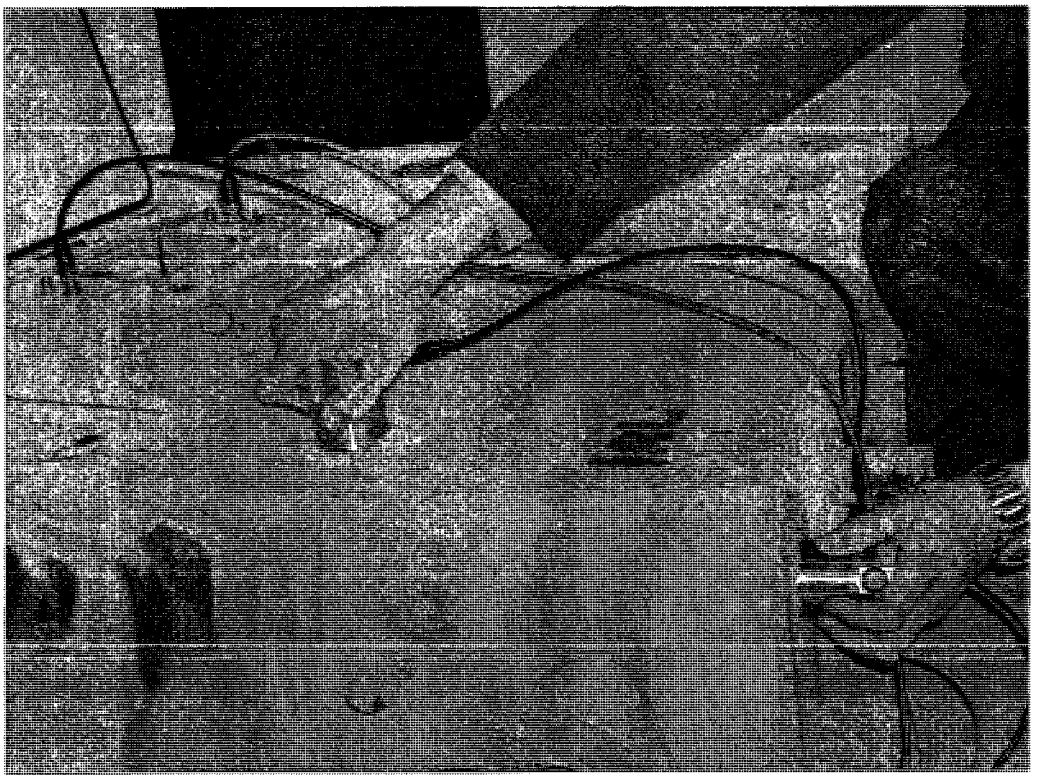


**Figure 1.19 Exemple de prise de mesures par la méthode semi-directe, réalisée dans les laboratoires d'essais Mequaltech (2009).**

### 1.4.2 La méthode Impact/Echo

**Principe**

L'impact/écho est une méthode très utile pour la détection de défauts en ayant qu'une seule face de la structure accessible.

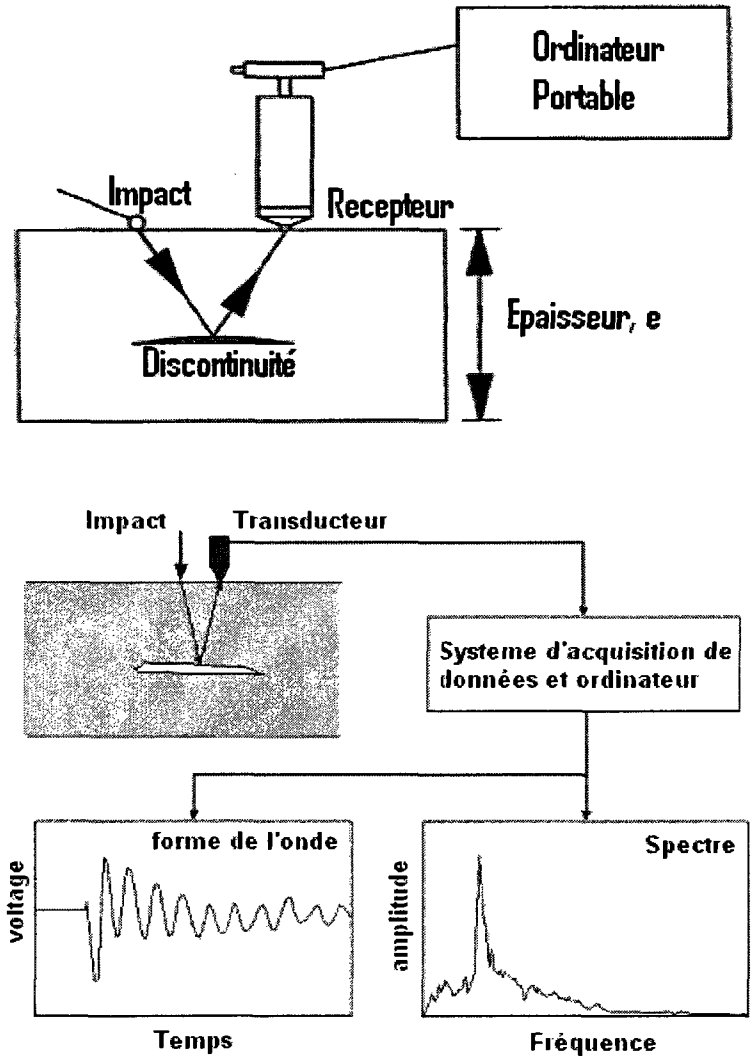



**Figure 1.20 Schémas de fonctionnement de la méthode impact/écho. [48] [49]**

Le principe est basé sur la création d'un court impact mécanique à la surface du béton crée par de petites billes d'acier, permettant la formation d'ondes de contrainte à travers le béton. Ces ondes sont ensuite réfléchies aux interfaces internes et aux

frontières du matériau pour revenir à la surface du béton. L'impulsion se propage dans le béton sous forme de deux types d'ondes sphériques : longitudinales et de cisaillement auxquelles s'ajoutent des ondes de Rayleigh partant de l'impact et se propageant en surface. La mesure du temps pris entre l'émission d'une impulsion et la réception de son écho permet de déterminer la profondeur d'un défaut connaissant le temps de transit et la vitesse du son dans le béton. Le retour des ondes génère alors un déplacement, mesuré par un transducteur placé à une distance d'environ 50 mm (2 pouces) de la source puis enregistré par un oscilloscope numérique comme l'illustre la figure 1.20 [48].

**Instrumentation et applications**

L'appareillage pour l'impact/écho consiste en trois composants principaux : une source créant l'impact, un transducteur et un oscilloscope numérique ou un analyseur en sortie comme le montre la figure 1.21. L'équipement pour cet essai est très utile pour les auscultations *in situ* du béton et a le grand avantage de ne nécessiter qu'une seule face de la structure. De plus, la détection des défauts s'accompagne aussi de la détermination de leurs profondeurs.

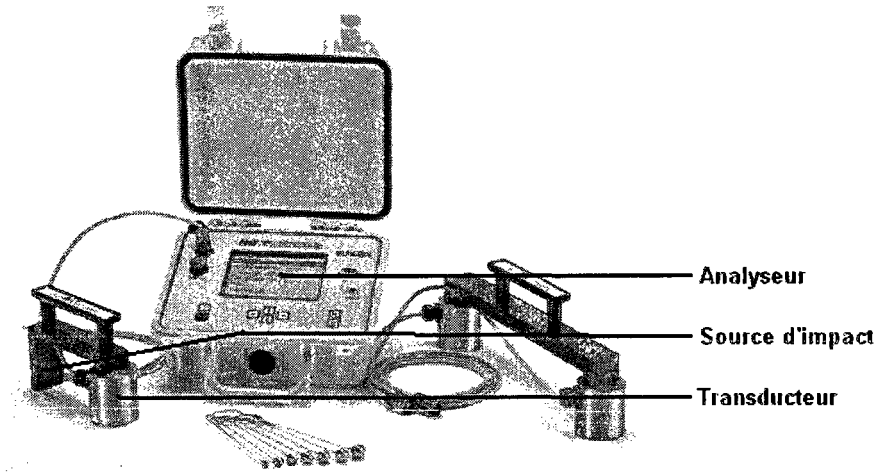



**Figure 1.21 Instrumentation typique de la méthode impact/écho. [47]**

La méthode impact/écho est utilisée avec succès pour l'évaluation de structures en béton. Depuis les années 1970, cette méthode a été un réussite pour l'évaluation des dalles, des colonnes et des murs faits en béton. Le temps de voyage de l'onde permet principalement de détecter les discontinuités partielles ou totales. Parmi les discontinuités, on peut énumérer les vides, les zones fragiles du béton, les irrégularités ou encore les fissures. Cette technique permet aussi de mesurer les épaisseurs car les ondes vont voyager jusqu'à la base de la dalle et être réfléchies. Cependant, on notera que l'exploitation des résultats nécessite une certaine expertise, notamment pour l'interprétation du spectre des fréquences affichant de nombreux pics [49].

### 1.4.3 Les méthodes combinées

#### Combinaison avec la méthode de rebondissement

Parmi les essais non destructifs, la combinaison de la méthode de rebondissement et la technique de mesure de vitesse d'impulsions ultrasonores est largement utilisée ; faisant appel à un appareillage ultrasonore pour le béton et un marteau de Schmidt comme le montre la figure 1.22. En effet, la détermination de la résistance à la compression du béton est un bon indice de la qualité du béton et ces deux méthodes peuvent la donner [51]. Il existe des corrélations entre la vitesse des ultrasons et la valeur du rebond pour de nombreux grades et type de béton. Cela permet ainsi de donner une bonne indication sur la résistance *in situ.* [44]. Ces méthodes, étant influencées dans des modes différents et/ou opposés de par certains paramètres fondamentaux, permettent d'avoir des résultats avec moins de dispersion lorsqu'elles sont combinées. Par exemple l'augmentation du taux d'humidité va accroître la vitesse des ultrasons mais va donner une valeur de rebond plus petite [51].

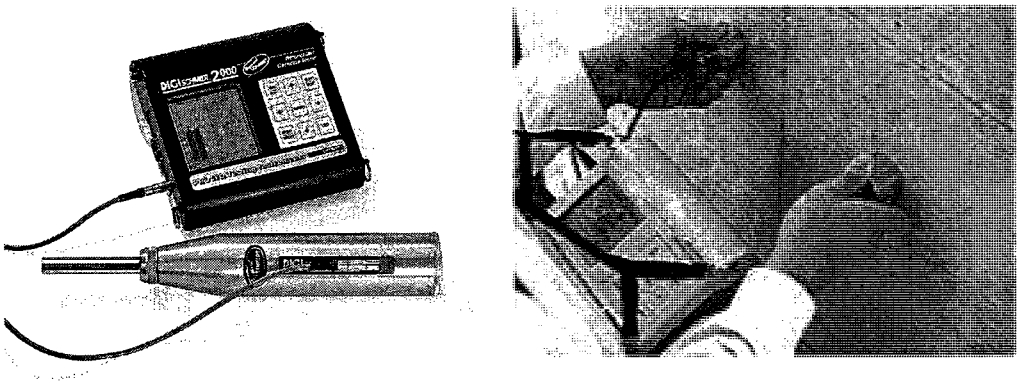


**Figure 1.22 Marteau de Schmidt et appareillage ultrasonore typiques pour le béton. [46] [52]**

### Courbes et relations

Un exemple classique de la combinaison de ces deux techniques est la méthode SonReb, développée principalement par les comités techniques 7 NDT et 43 CND du RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux). Elle propose une relation générale entre la résistance à la compression du béton, la valeur du rebond et la vitesse des ultrasons représentée sur la figure 1.23 [53].

Ainsi, la combinaison de ces deux techniques permet de réduire les effets de :

(i) La taille des agrégats
(ii) Le taux et le type de ciment
(iii) Le ratio eau/ciment
(iv) Le taux d'humidité

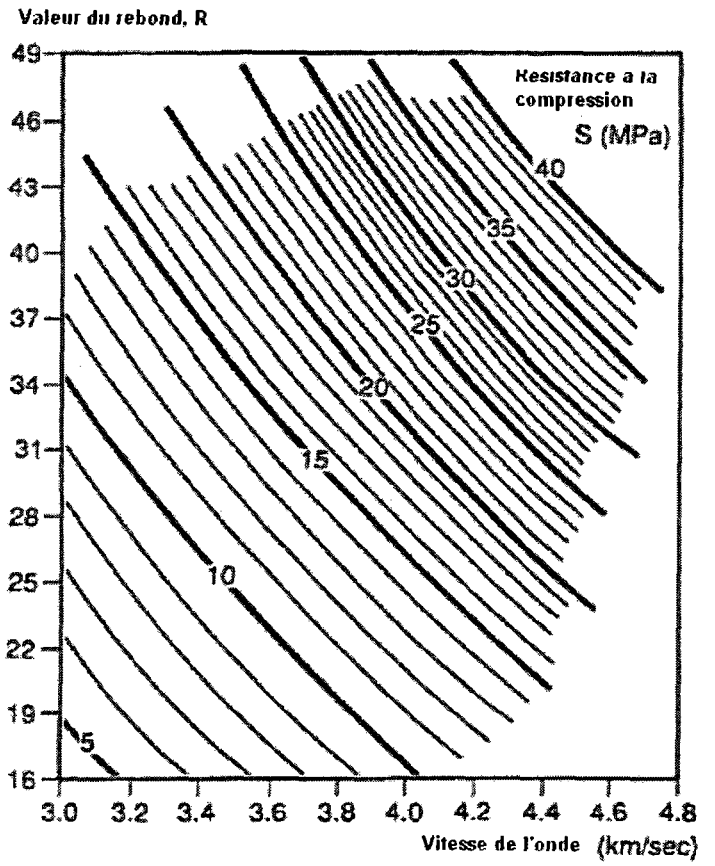



**Figure 1.23 Courbes ISO-Resistance pour un béton de référence avec la méthode SonReb. [53]**

Une série de coefficients de correction ont été développés pour des différents types de béton afin d'augmenter la précision des estimations :

- Cc - coefficient d'influence du type de ciment.
- Cd - coefficient d'influence du taux de ciment.
- Ca - coefficient d'influence du type d'agrégats.
- Cg - coefficient d'influence des plus petits agrégats.
- Co - coefficient d'influence de la taille maximale d'agrégats.

La résistance est alors estimée à :

- 10-14% de précision avec des carottages et quand la composition est connue.
- 15-20% avec seulement la composition. [44]

Afin de tracer les courbes vitesse-valeur du rebond, on considère du béton classique. Soit 60% à 70% du volume est occupé par les agrégats et le reste par le ciment, les petits vides...Il est vivement conseillé de développer une relation de corrélation et même parfois essentiel pour l'estimation de la résistance. Cependant, lorsqu'il existe une corrélation, les résultats donnent une alternative réaliste aux essais destructifs [53] [54]. De nombreuses corrélations ont été suggérées par différents chercheurs pour estimer la résistance à la compression du béton comme le montre le tableau 1.9.

**Tableau 1.9 Différentes corrélations proposées par des chercheurs pour estimer la résistance à la compression [53]**

| *Chercheurs* | *Equation* |
|---|---|
| McLeod | $S = k_0 + k_1 R + k_2 V$ |
| Di Maio, et al | |
| Tanigawa, et al | |
| Knaze et Beno | $S = a_0 + a_1 R + a_2 R^2$ |
| | $S = b_0 + b_1 V + b_2 V^2$ |
| Bellander | $S = k_0 + k_1 R^3 + k_2 V$ |
| Weibinga | $\log_e S = k_0 + k_1 R + k_2 V$ |
| Shah | |
| Tanigawa | |
| Schickert | $S = k_0 R^n V^m$ |
| Samarin, et al | $S = k_0 + k_1 R + k_2 V^4$ |
| Tanigawa et al | $S = V(a_0 + a_1 R + a_2 R^2 + a_3 R^3)$ |

Avec

S : La résistance à la compression

R : la valeur du rebond donné par le marteau de Schmidt

V : vitesse des ondes ultrasonores

# CHAPITRE II

# PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

## 2.1 Méthodes expérimentales

### 2.2.1 Matériaux et fabrication des échantillons

**Formulation et propriétés des bétons**

Six dalles ont été coulées de dimensions 1 m x 1 m x 0,30 m, montrées sur la figure 2.1 afin de tester différents paramètres par des méthodes non-destructives.

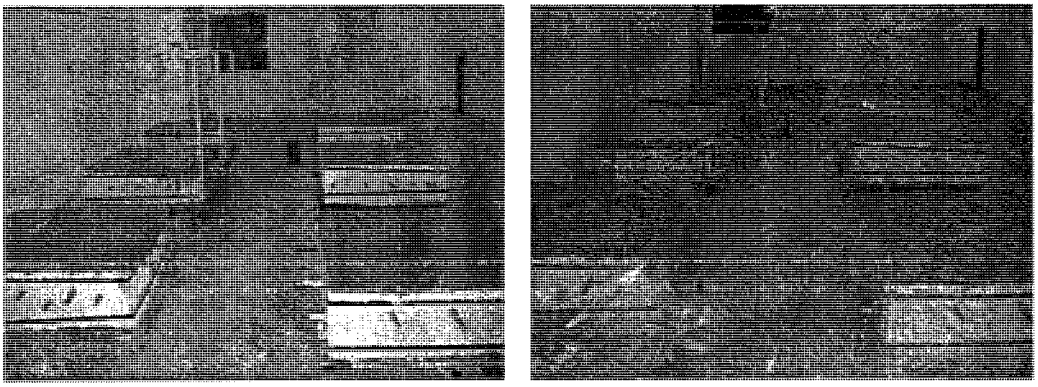


**Figure 2.1 Les six dalles expérimentales lors de la coulée à gauche lors de la cure à droite.**

Les différents constituants ont les provenances suivantes :

- Ciment –GU – LAFARGE CANADA INC. M2165, Montréal
- Ajout cimentaire-CV classe F – Separation Tech. Canada Titan, Toronto – CV Belledune
- Eau – Aqueduc ---EAU
- Pierre -14mm –Carrières St-Dominique Ltée, St-Dominique
- Sable – Sable –Sablière Arsenault, Ste-Angèle
- Adjuvant – Réducteur d'eau – Pozzolith 210 –BASF Const Chem Can, Ltd, Brampton
- Superplastifiant : Conchem$^{md}$ SPN – SKW-MBT construction chemicals

Elles sont toutes fabriquées avec la même formulation du béton indiqué sur le tableau 2.1 ci-dessous :

**Tableau 2.1 Formulation du béton des dalles**

| | Dalles | | |
|---|---|---|---|
| | quantité | densité | Volume (%) |
| Ciment (kg) | 71,4 | 3,150 | 7,63 |
| Ajout cimentaire (kg) | 15,6 | 2,500 | 1,99 |
| Eau (kg) | 47,9 | 1,000 | 15,93 |
| Pierre -14mm (kg) | 125,4 | 2,731 | 15,26 |
| Pierre -20mm (kg) | 188,1 | 2,729 | 22,89 |
| Sable fin (kg) | 279 | 2,680 | 34,51 |
| Adjuvants (ml) | 156,6 | 1,000 | 0,07 |
| Superplastifiant (ml) | 714 | 1,050 | 0,23 |
| Volume d'air : 1,5% | | | 1,49 |
| Total / Dalle | 728 kg | 2,418 | 100% |
| Rapport Eau/Liants | | 0,55 | |

Après on réalise une cure de 10 jours, où il est important d'hydrater le béton afin d'éviter les fissurations, comme le montre la figure 2.1, amenant ainsi à une maturation totale de 28 jours des 6 dalles expérimentales. Elles sont conservées à une température ambiante moyenne de 18,4°C et un taux d'humidité de 20%. Les essais de compression ont été effectués 28 jours après le coulage du béton et résultent de la moyenne de 3 échantillons. On a alors aussi les caractéristiques suivantes relevées lors de la coulée et après la maturation comme indiquées dans le tableau 2.2.

**Tableau 2.2 Caractéristiques du béton des dalles**

| | Dalle 1 | Dalle 2 | Dalle 3 | Dalle 4 | Dalle 5 | Dalle 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Affaissement (mm) | 85 | 90 | 90 | 100 | 150 | 140 |
| Résistance à la compression (MPa) | 32,8 | 33,3 | 32,5 | 32,6 | 32,2 | 32,7 |

**Rappels des objectifs des dalles**

Les objectifs initiaux de l'étude sont :

- Évaluer les limites de détection des contrôles par ultrasons et par Radar.
- Optimiser la combinaison des contrôles pour améliorer l'interprétation

Afin de répondre à ces objectifs, Six dalles sont coulées et nommées Dalle 1, Dalle 2, Dalle 3, Dalle 4, Dalle 5 et Dalle 6. Chacune d'elles est armée selon différentes configuration et elles vont permettre de tester une ou plusieurs limites du Radar et des ultrasons que l'on veut évaluer. Voici ainsi un descriptifs des informations et des limites des appareillages que vont nous donner chaque dalle :

Dalle 1 : Dalle témoin

Elle n'est pas utile pour la recherche des limites à proprement dit. Néanmoins, elle va servir de référence par rapport aux autres dalles.

Dalle 2 : Dalle espacement d'armatures

Elle va servir à voir la capacité de détection et de distinction des armatures en fonction de leurs proximités.

Dalle 3 : Dalle superpositions d'armatures

Elle va servir à voir la capacité de détection et de distinction des armatures en fonction de la proximité de leurs superpositions.

Dalle 4 : dalle différents diamètres

Elle va servir à voir la capacité à faire la différence entre les différents diamètres d'armatures et d'autres conduits.

Dalle 5 : dalle défauts

Elle va servir à déterminer la capacité de détection de défauts, assimilés à des vides, en fonction de leurs profondeurs, leurs épaisseurs et leurs inclinaisons.

Dalle 6 : dalle défauts + nids d'abeilles

Elle va servir à déterminer la capacité de détection de défauts en fonction de leurs proximités avec les armatures, en fonction de leurs tailles et aussi la présence de nids d'abeilles.

**Configurations des dalles de béton**

Les dalles ont tout d'abord été conçues sur le logiciel SolidWorks comme le montreront les différentes figures présentant les configurations avant leurs fabrications.

a) Dalle 1

La Dalle 1 est la dalle témoin. Elle a une configuration standard et contient uniquement les barres d'armatures de 20 mm de diamètre. Elle sert de référence aux autres dalles car elle ne comprend pas de défauts ni de mise en place particulière comme le montre les figures 2.2.

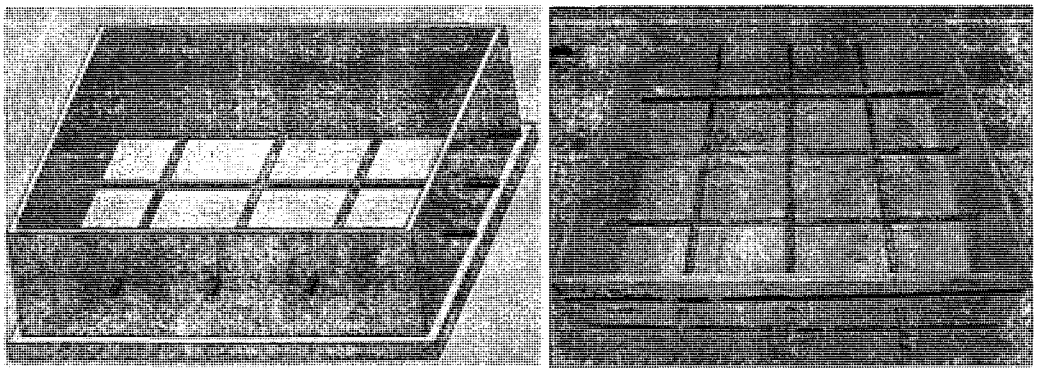


**Figure 2.2 Image de la dalle 1 témoin sous SolidWorks à gauche et vue du moule fabriqué à droite.**

b) Dalle 2

La dalle 2 contient des armatures de 20 mm de diamètre placées à des espacements variables ainsi qu'une armature de 10 mm de diamètre incliné avec un angle de 10° partant de la base du coffrage comme le montre les figures 2.3.

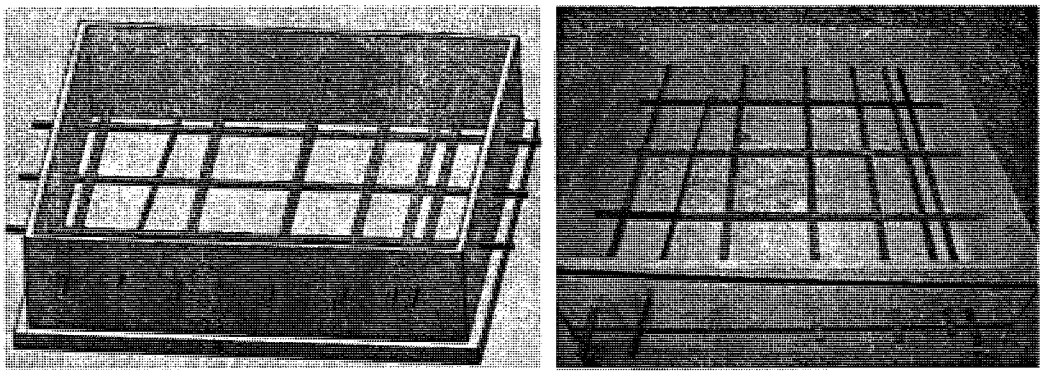


**Figure 2.3 Image de la dalle 2 Espacements à gauche sous SolidWorks et vue du moule fabriqué.**

c) Dalle 3

La Dalle 3 contient des armatures de 20 mm de diamètre superposées avec différentes profondeurs et différents espacements entre elles comme le montre les figures 2.4.

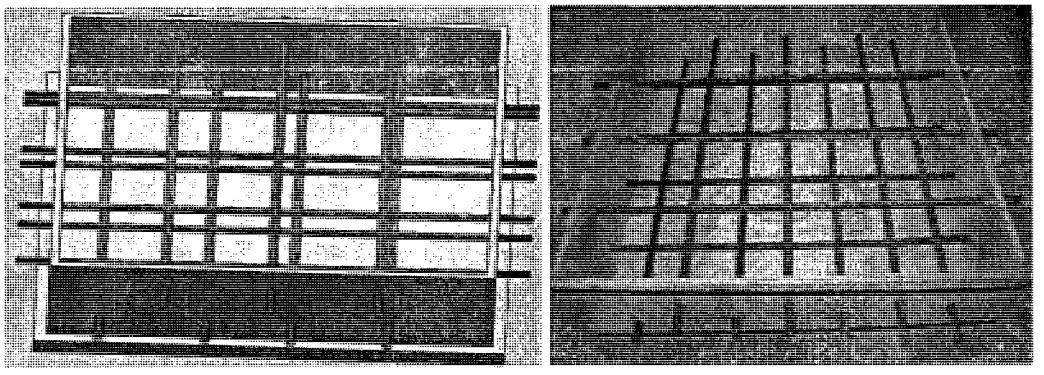


**Figure 2.4 Image de la Dalle 3 Superpositions à gauche sous SolidWorks et vue du moule fabriqué à droite.**

d) Dalle 4

La Dalle 4 contient :

- Des armatures de différents diamètres : 30 mm, 20 mm et 10 mm.
- Deux conduits en PVC généralement utilisés pour faire passer du câblage électrique. L'un est disposé de manière horizontale, l'autre est incliné avec un angle de 5° partant de la base du coffrage.

- Un grand conduit métallique de 50 mm de diamètre en acier inoxydable 304 traversant le coffrage.
- Une barre complètement corrodée de 15 mm de diamètre
- Une barre de 10 mm de diamètre qui a la moitié de sa longueur saine et l'autre corrodée (figures 2.5).

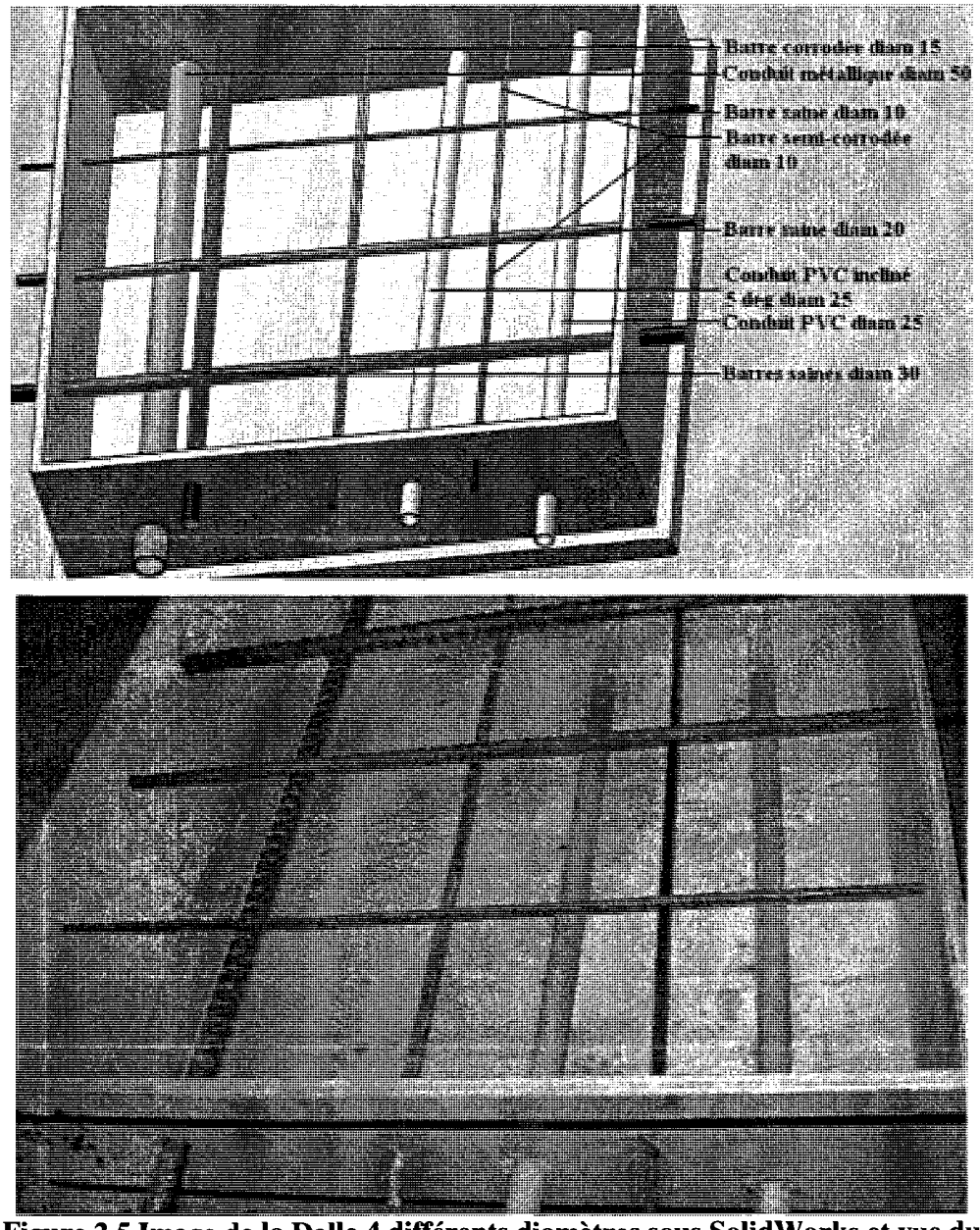



**Figure 2.5 Image de la Dalle 4 différents diamètres sous SolidWorks et vue du moule fabriqué.**

e) Dalle 5

La dalle 5 contient des défauts en polystyrène expansé simulant des vides. Ils ont 3 épaisseurs différentes : 5 mm, 10 mm et 25 mm disposés à différentes profondeurs et à des inclinaisons différentes. Cette dalle présente aussi un treillis avec des espacements de 150 mm (6 pouces) et des tiges de 3mm de diamètre. (Figure 2.6).

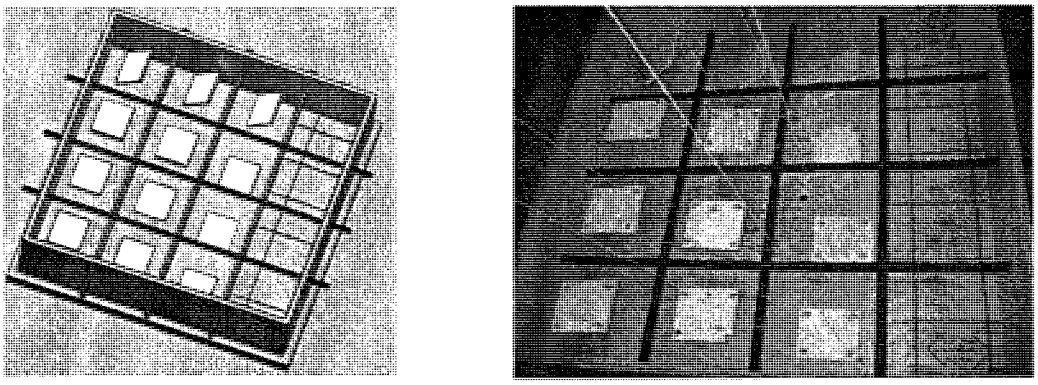


**Figure 2.6 Image de la Dalle 5 défauts sous SolidWorks à gauche et vue du moule fabriqué à droite.**

f) Dalle 6

La dalle 6 contient trois nids d'abeilles de dimensions 100 x 100 x 50 mm, 50 x 50 x 100 mm et 25 x 25 x 70 mm disposées à hauteur des armatures. On a aussi des défauts d'épaisseur 10 mm disposés à proximité d'armatures, en superposition du passage des armatures et enfin des défauts de dimensions 100 x 75 x 75 mm, 100 x 50 x 50 mm et 100 x 25 x 25 mm montrés sur les figures 2.7.

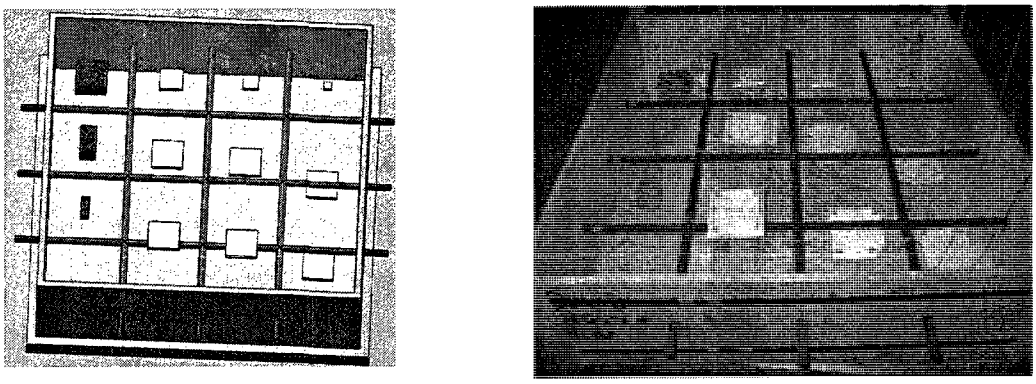


**Figure 2.7 Image de la Dalle 6 défauts + nids d'abeilles sous SolidWorks à gauche et vue du moule fabriqué à droite.**

### 2.2.2 Discontinuités et défauts

**Les nids d'abeilles**

Les nids d'abeilles étant un problème fréquemment rencontré dans le béton et pouvant avoir des conséquences catastrophiques, il est important de les ausculter. Ainsi, 3 nids d'abeilles ont été introduits dans la dalle 6. Ces nids ont été conçus avant la coulée des dalles. Il est nécessaire qu'ils soient fabriqués avec le même type de béton pour ne pas avoir de différences liées à leurs natures lors de l'auscultation. Cependant, les constituants doivent être introduits à des proportions différentes. En effet, on va utiliser beaucoup plus de gros granulats de 20 mm de diamètre et une faible proportion de sable. Ainsi, on aura beaucoup de vides emprisonnés et donc plus de porosité. Le résultat s'apparentera à des nids d'abeilles comme le montre la figure 2.8. La formulation du béton utilisé pour créer les nids d'abeilles est présentée dans le tableau 2.3.

**Tableau 2.3 Formulation du béton des nids d'abeilles**

| | Nid d'abeilles 10 x 10 x 5 $cm^3$ | Nid d'abeilles 10 x 5 x 5 $cm^3$ | Nid d'abeilles 8 x 5 x 2,5 $cm^3$ |
|---|---|---|---|
| Volume ($cm^3$) | 500 | 250 | 100 |
| Ciment (g) | 100 | 40 | 20 |
| Gros granulat (g) | 800 | 270 | 160 |
| Sable (kg) | 230 | 70 | 46 |
| Eau (g) | 130 | 20 | 14 |
| Rapport granulats/sable (%) | 3,5 | 3,8 | 3,5 |
| Indice des vides (%) | 0,84 | 0,83 | 0,83 |
| Porosité (%) | 46 | 45 | 45 |

On a les masses volumiques suivantes :

- Ciment : 3,150 g/ $cm^3$
- Gros granulats : 2,729 g/ $cm^3$
- Sable : 2,680 g/ $cm^3$
- Eau : 1 g/ $cm^3$

L'indice des vides, $e_i$ est déterminé par le calcul suivant :

$$e_i = \frac{V_{vide}}{V_{ciment} + V_{sable} + V_{granulats}} \tag{2.1}$$

Il est calculé en fonction des quantités introduites, des différentes masses volumiques des composants et du volume total constitué par le moule.

L'indice de porosité, n (en %) est déterminé par le calcul suivant :

$$n = \frac{e_i}{(1+e_i)} \times 100 \tag{2.2}$$

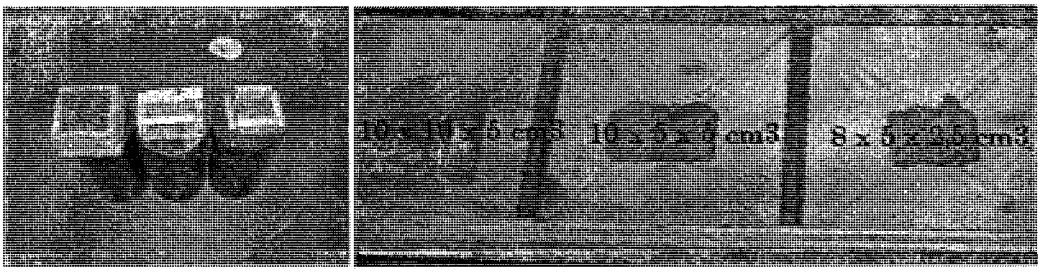



**Figure 2.8 Nids d'abeilles placés dans la dalle 6**

**Les vides artificiels**

Afin d'étudier la capacité à détecter des défauts internes comme les vides, différentes plaques de polystyrène expansé ont été préparées et introduites dans le béton des dalles 5 et 6 dans des configurations différentes explicités dans la partie suivante. On a ainsi six types de plaques de dimensions suivantes comme le montre la figure 2.9 :

- 140 x 125 x 5 mm
- 140 x 125 x 10 mm
- 140 x 125 x 25 mm
- 75 x 75 x 10 mm
- 50 x 50 x 10 mm
- 25 x 25 x 10 mm

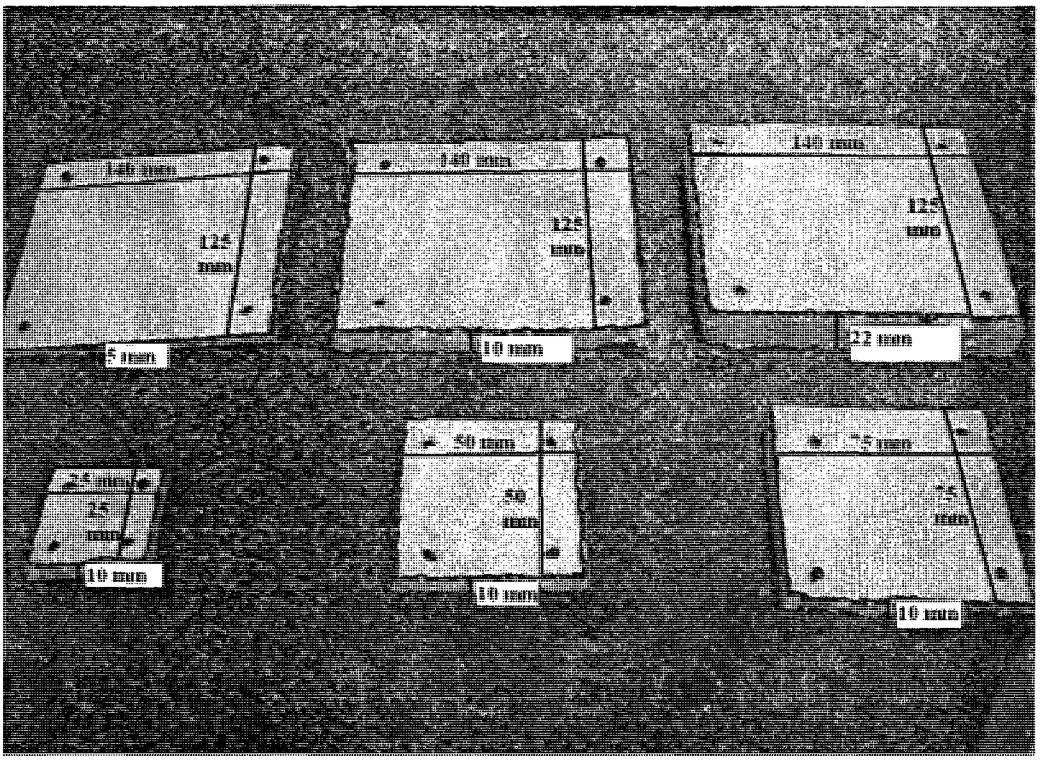



**Figure 2.9 Les six types de plaques en polystyrène utilisé pour simuler les vides dans les dalles de béton.**

## 2.2 Essais réalisés

### 2.2.1 Matériel utilisé

#### Le Radar

Le Radar utilisé pour les expériences est le modèle Conquest, spécifiquement désigné pour rencontrer les besoin de l'industrie de l'inspection du béton. Le Conquest permet l'investigation de bétons de façon facile et rapide avec une analyse intégrée et une visualisation en 3D. L'appareillage est composé principalement d'un système d'acquisition avec une antenne émettant des ondes à une fréquence de 1 GHz et d'une unité d'affichage avec un moniteur, montré dans la figure 2.10. La réflexion des barres d'armature va apparaître sous forme d'hyperbole et cette dernière est contrôlée par la propriété « type de béton », qui mesure la vitesse du

signal voyageant à travers le béton ausculté. Pour des estimations de profondeur précises et répétables, l'opérateur doit calibrer l'appareil pour chaque site afin d'extraire le type de béton. Pour créer une image en 3D, on balaye la zone d'investigation à l'aide d'un quadrillage composé de lignes parallèles et perpendiculaires entre elles comme le montre la figure 2.10. Il est important de prendre en compte que les bétons nouvellement coulés absorbent le signal et ne permet donc pas la pénétration à des profondeurs substantielles. Il est ainsi essentiel d'attendre la fin de la cure du béton pour l'ausculter. Généralement, la limite d'exploration du Radar est de 45 cm (18 pouces) mais peu parfois atteindre 60 cm à 1 mètre si le béton est très sec.

**L'appareillage ultrasonore**

L'appareillage ultrasonore utilisé est le modèle V-Meter Mark III. C'est un appareil désigné pour déterminer la qualité du béton *in situ* ou en laboratoire. Il intègre un microprocesseur avancé permettant une meilleure fiabilité des résultats. La mesure du temps est réalisée par une horloge de 10 MHz, donnant une capacité de mesure allant de 0 à 6,5 ms avec une résolution de 100 ns. L'appareil est composé de 2 grandes unités : l'affichage et le traitement des données et deux transducteurs comme le montre la figure 2.10.

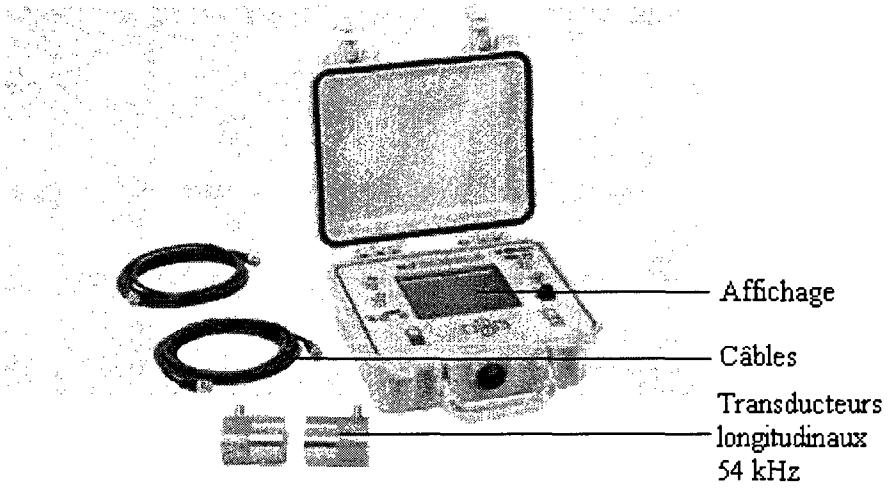



**Figure 2.10 Appareillage utilisé pour les expériences : V-Meter Mark III de NDT James**

Les transducteurs qui peuvent être utilisés sont de deux types :

- Transducteurs de fréquence 54 kHz émettant des ondes longitudinales
- Transducteurs de fréquence 180 kHz émettant des ondes transversales

Deux types de transducteurs peuvent être utilisés car il est possible de combiner les vitesses des ondes de compression et des ondes de cisaillement afin d'avoir une estimation du module d'Young E, plus précise. En effet, le module d'Young peut être calculé par deux méthodes. La première ne nécessitant que les ondes de compression est tout simplement une approximation de la deuxième combinant les deux types d'ondes.

**Le marteau de Schmidt**

Le marteau de Schmidt utilisé est le marteau numérique James présentant principalement un écran d'affichage et le marteau. Il peut s'opérer entre 0 et 50°C et a comme dimensions 100 mm x 10 mm x 270 mm (figure 2.11).

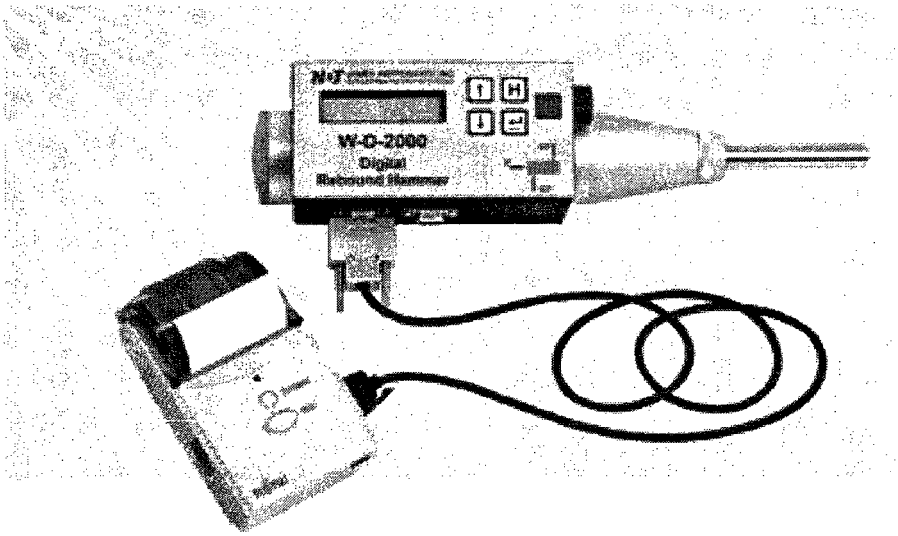



**Figure 2.11 Marteau de Schmidt utilisé pour les expériences : marteau numérique, modèle W-D 1500 de NDT James**

### 2.2.2 Essais sur les armatures et conduits

**Dalle 2**

Un des grands problèmes rencontrés lors de l'utilisation du Radar est la proximité des armatures entre elles. En effet, les armatures risquent d'interférer entre elles lorsqu'elles sont trop proches. Comme on l'a explicité précédemment, la dalle 2 contient différentes armatures qui seront plus ou moins proches permettant ainsi de voir les limites par rapport à leurs proximités. Les distances vont s'étendre d'une gamme allant de 50 mm à 250 mm, en augmentant de 50 mm à chaque fois la distance comme le montre la figure 2.12.

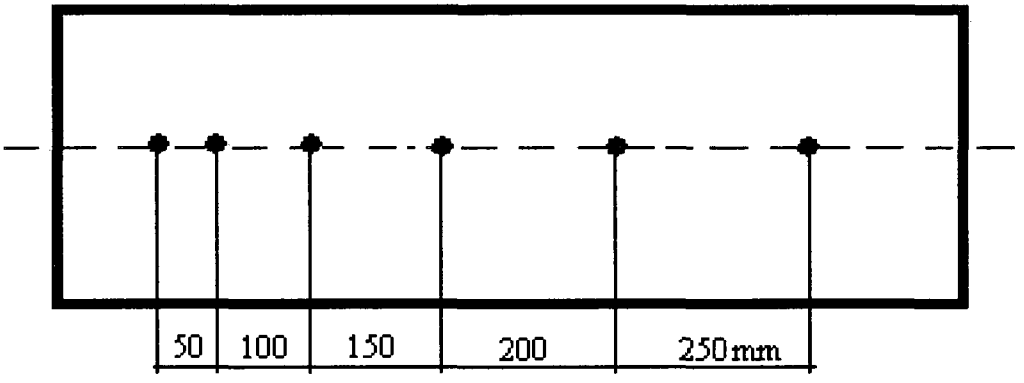



**Figure 2.12 Configuration des espacements entre les barres d'armatures dans la dalle 2**

**Dalle 3**

La dalle va aussi permettre de voir les limites au Radar en jouant sur deux paramètres comme le schématise la figure 2.13 :

- La profondeur entre deux armatures avec une distance fixe entre elles.
- La distance entre deux armatures avec une profondeur fixe entre elles.

Pour la profondeur des armatures, on balaye de 25 mm à 100 mm avec une incrémentation de 25 mm à chaque barre et pour la distance entre les armatures, on balaye de 25 mm à 150 mm avec une incrémentation de 25 mm à chaque barre.

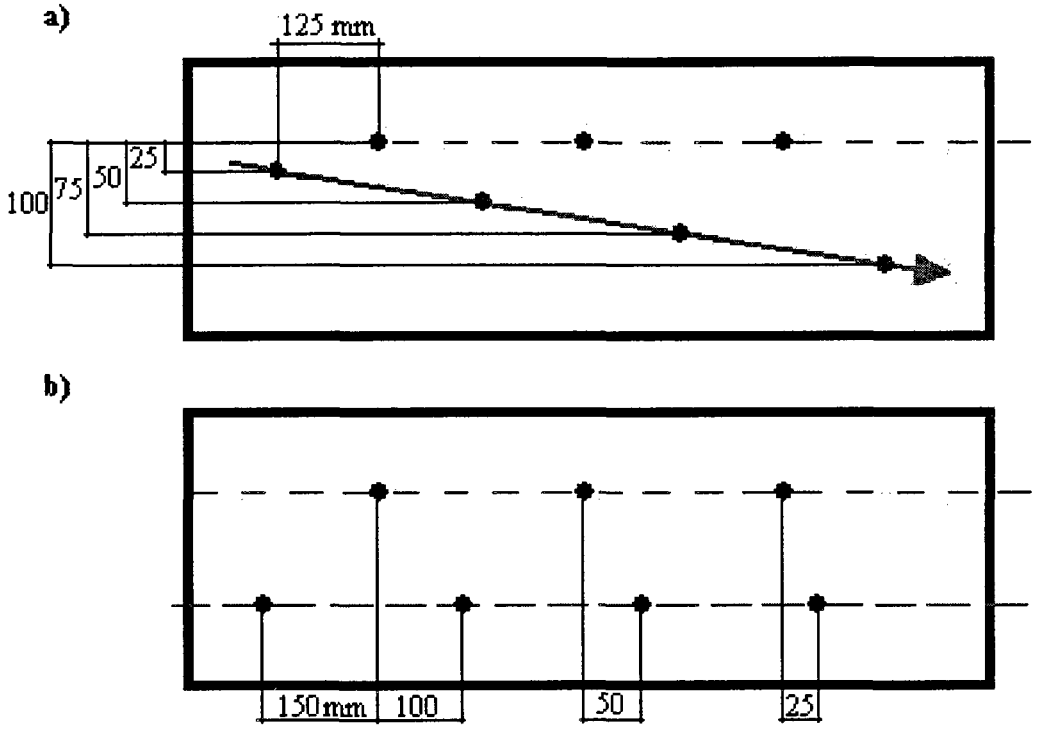



**Figure 2.13 Configuration des armatures dans la dalle 3**

**a) Profondeur avec une distance fixe entre les armatures**

**b) Distance avec une profondeur fixe entre les armatures**

### Dalle 4

La dalle 4 va permettre de réaliser l'auscultation sur de nombreux éléments introduits dans le béton et que l'on peut rencontrer fréquemment dans les dalles. Le tableau 2.4 présente les différents éléments présents dans la dalle 4 et en parallèle les différents paramètres qu'ils vont permettre de tester :

**Tableau 2.4 Paramètres à tester des éléments présents dans la dalle 4**

| Eléments présents dans la dalle 4 | Paramètres à tester |
|---|---|
| Barres de différents diamètres | ▪ Variation de diamètre |
| Conduit en acier inoxydable | ▪ Détection du conduit<br>▪ Effet de la détection |
| Conduits en PVC | ▪ Détection du conduit<br>▪ Effet de l'inclinaison |

### 2.2.3 Essais sur les défauts et les nids d'abeilles

**Paramètres à étudier**

On recherche à étudier différents paramètres que l'on peut regrouper en 5 critères :

- La profondeur
- L'épaisseur
- La taille
- L'inclinaison
- La proximité avec les armatures
- Auscultation des nids d'abeilles

Afin de tester chaque paramètre individuellement, nous ne ferons varier qu'un seul paramètre à la fois en fixant tout les autres. On sera dès lors sûr qu'un éventuel changement décelé ne peut provenir que de l'élément pris en compte sans que les autres n'interfèrent. Nous procéderons alors en deux grandes étapes. Tout d'abord, nous balayerons les dalles avec le Radar. Ensuite, nous utiliserons les ultrasons selon la méthode directe pour l'épaisseur et pour les nids d'abeilles et la méthode indirecte pour la détermination des profondeurs.

**Localisation des défauts dans les dalles 5 et 6**

Afin de tester les différents paramètres présentés précédemment, les dalles 5 et 6 contiennent des défauts de différentes tailles. La méthode ultrasonore directe, le Radar et le marteau de Schmidt sont utilisés pour ces dalles dont les configurations sont présentées dans la figure 2.14 et 2.15.

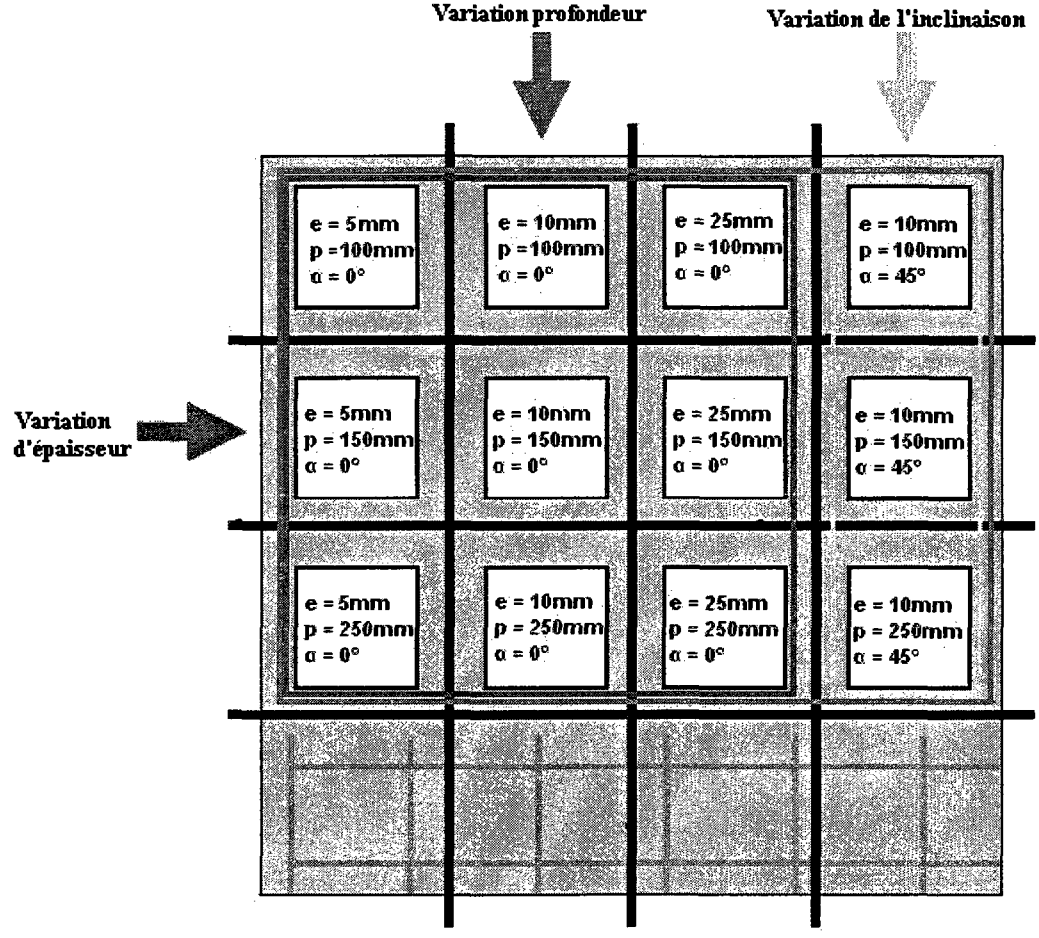



**Figure 2.14 Configuration de la disposition des défauts dans la dalle 5.**

On fait varier trois paramètres :

a) Profondeur p : 100, 150 et 250 mm par rapport à la surface.
b) Epaisseur e : 5mm, 10mm et 25 mm.
c) Inclinaison α : 0° et 45° par rapport à l'horizontal.

Pour les nids d'abeilles, les différentes dimensions et la connaissance de leurs localisations précises permettront de faire état de la capacité à détecter ces derniers.

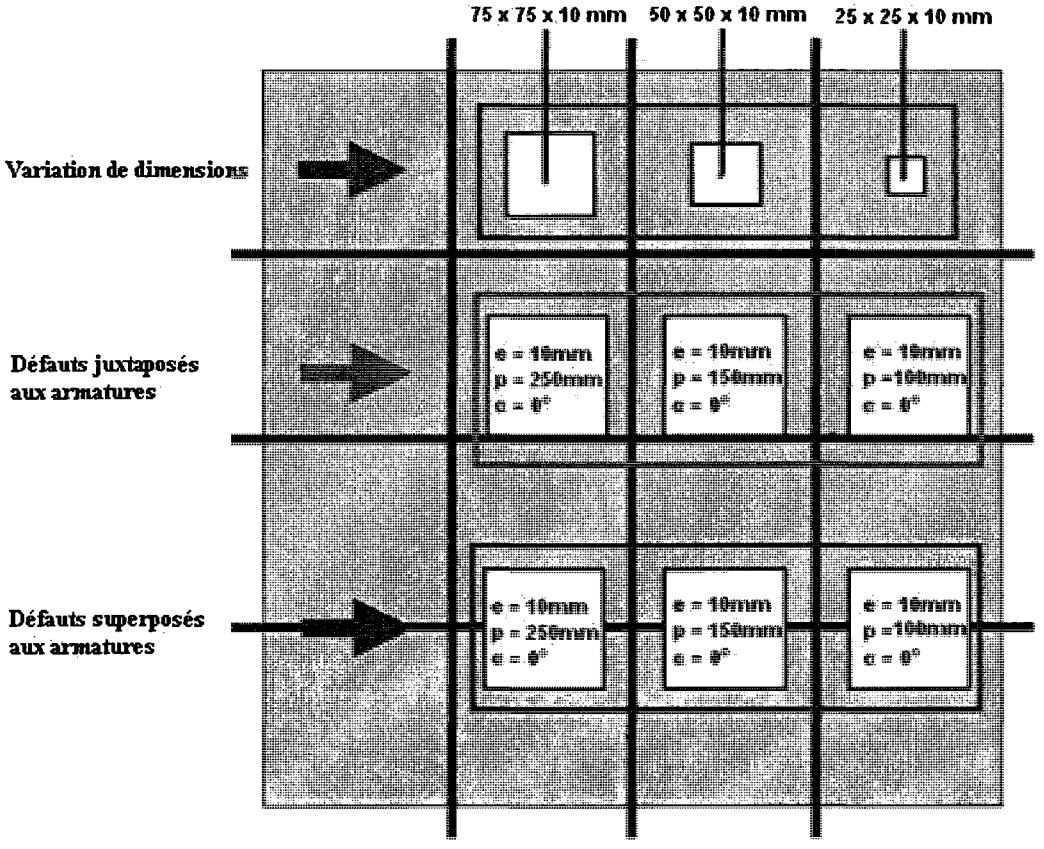



**Figure 2.15 Configuration de la disposition des défauts dans la dalle 6 et des nids d'abeilles.**

On fait varier deux paramètres :

a) Dimensions : 75 x 75 x 10 mm, 50 x 50 x 10 mm et 25 x 25 x 10 mm.

b) Proximité des armatures : superposés et juxtaposés selon la profondeur.

# CHAPITRE III

# RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

## 3.1 Evaluations des paramètres pour la détection par le Radar

### 2.2.4 Détection des armatures

Afin de décrire au mieux les résultats, nous reviendrons sur chacune des dalles et nous en tirerons les résultats qu'elles nous apporterons. Le Radar est l'outil privilégié pour la détection d'armatures et de conduits. Lorsqu'il y a présence d'une armature, les ondes sont réfléchies et se manifestent par des hyperboles sur les coupes transversales et sont visibles sur la coupe de surface.

a) Dalle 1

Comme nous l'avons présenté précédemment, la dalle 1 est la dalle témoin, celle qui va servir de référence. Ainsi, nous avons effectué une analyse au Radar. Le radargramme est composé de trois coupes. La première est une coupe longitudinale. Les deux autres sont des coupes transversales. Les endroits de coupes sont localisés par des lignes rouges sur la coupe principale. On a aussi les dimensions da la dalle en pouces permettant de repérer à quelle profondeur se trouvent les armatures ou encore des défauts.

Comme prévu, on repère la présence des six armatures, trois dans chaque sens comme le montre le radargramme 3.1. Aucun défaut n'est détecté, la dalle semble saine. On remarque que les armatures sont repérées par des hyperboles régulières et homogènes et la distance entre elles est bien de 250 mm (10 pouces). La profondeur des armatures est confirmée entre 6 et 7 pouces (soit entre 15,24 et 17,78 cm).

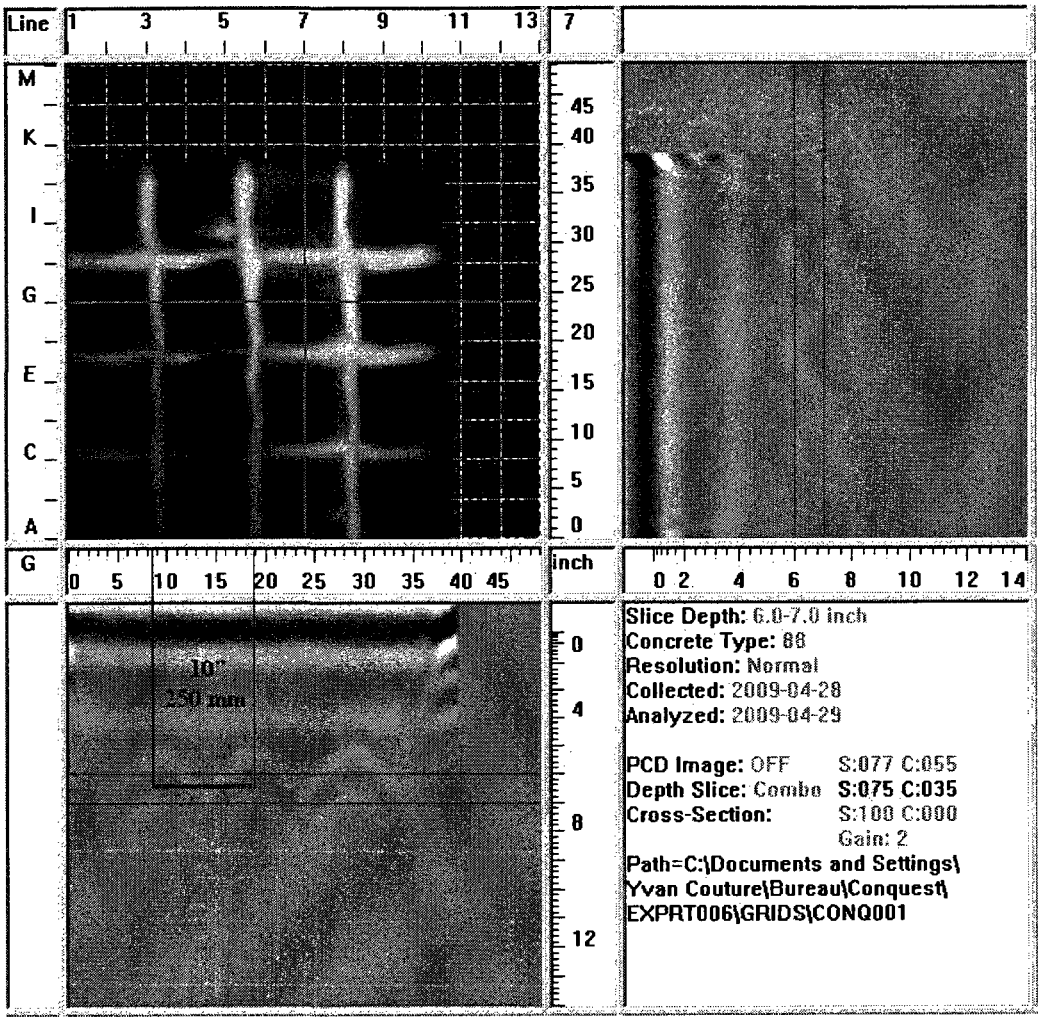



**Figure 3.1 Radargramme de la dalle témoin à une profondeur de 6-7''.**

b) Dalle 2

La dalle 2 joue sur l'espacement entre les armatures. La figure 3.2 représente le radargramme de cette dalle. On remarque bien les trois armatures sur la coupe transversale droite. Sur l'autre coupe, où les armatures sont placées à des distances variées, on repère alors cinq armatures sur les six disposées comme nous l'avons présenté dans la partie des essais à la figure 2.13.

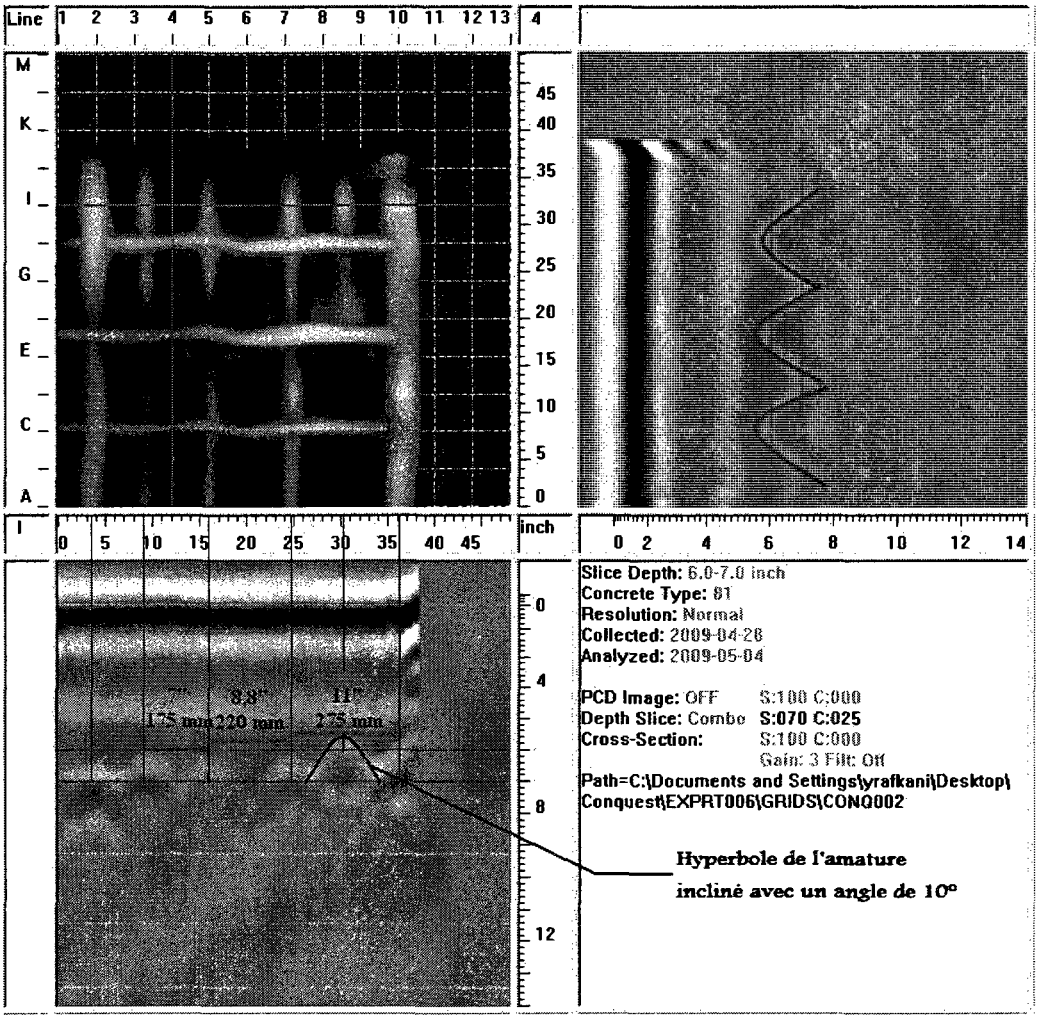



**Figure 3.2 Radargramme de la dalle 2 à une profondeur de 6-7''**

Les plus espacées sont les plus visibles et la mesure de leurs distances déterminée sur le radargramme reflète parfaitement la mesure réelle. Par contre, les armatures les plus proches, distante de 2'' (50 mm), semblent interférer entre elles au point de ne voir qu'une seule hyperbole. Enfin, vu l'endroit de la coupe, on repère aussi l'armature inclinée avec un angle de 10°, se manifestant par une hyperbole plus proche de la surface. On remarque d'ailleurs que cette dernière est retraçable tout au long de la profondeur, jusqu'à la base de la dalle comme le montre la figure 3.3.

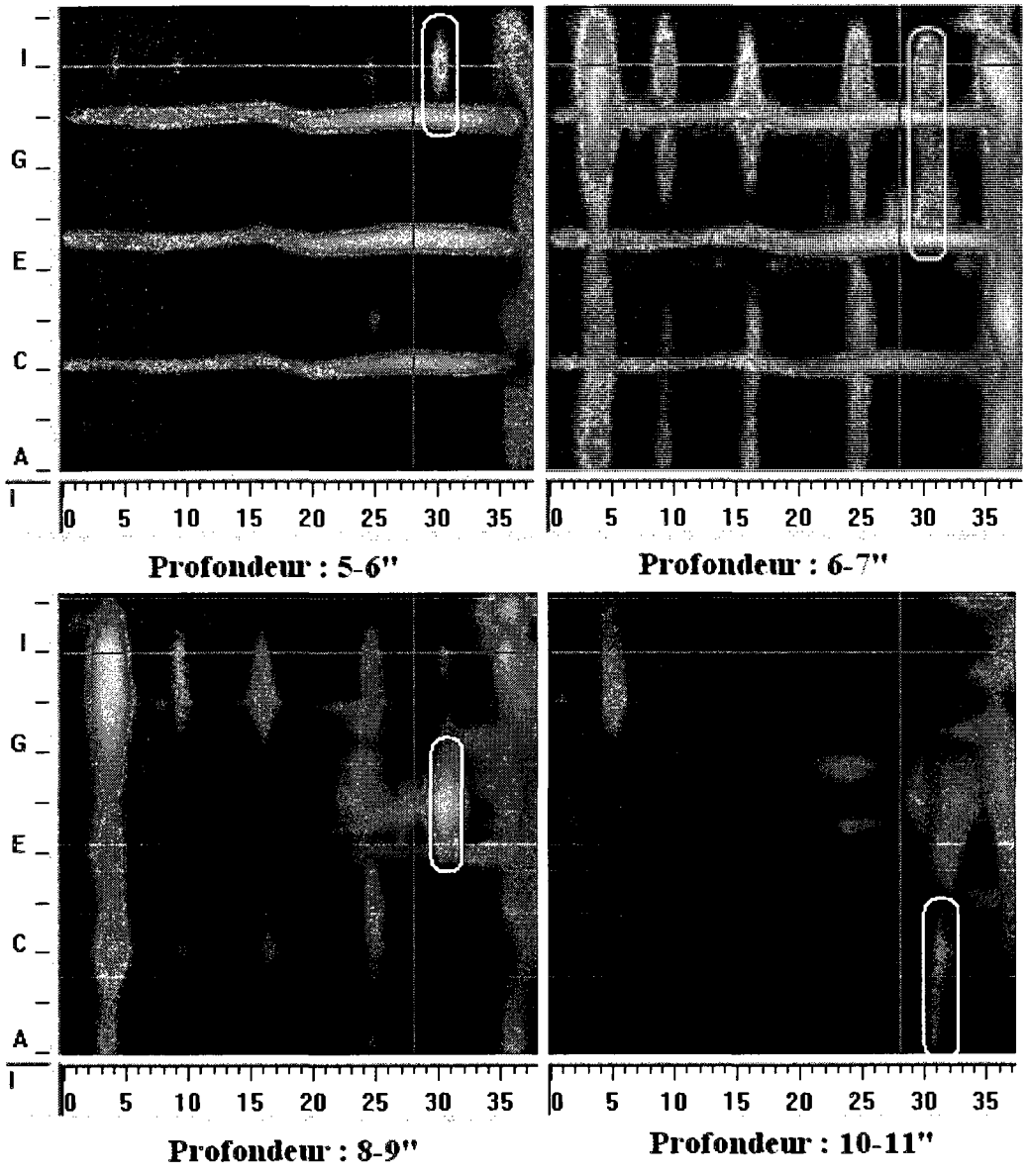



**Figure 3.3 Suivi de la barre inclinée de 10° en fonction de la profondeur.**

c) Dalle 3

La dalle 3 joue sur la proximité des superpositions d'armatures. Leurs dispositions sont d'ailleurs explicitées dans la partie des essais réalisés à la figure 2.13. On repère clairement, dans les deux coupes transversales de la figure 3.4, les trois armatures dans les parties supérieures. Ensuite sur la coupe a), on repère les armatures qui sont de plus en plus profondes (hyperboles rouges). Sur la courbe b), les armatures

placées en profondeur semble être détectées. En effet, des « hyperboles » se dessinent en augmentant le gain. Afin de confirmer leur présence, on réalise le radargramme de la dalle témoin au même endroit de coupe et au même gain. Ces « hyperboles » n'apparaissent pas. De plus, les distances entre elles semblent confirmer qu'il s'agit bien des armatures.

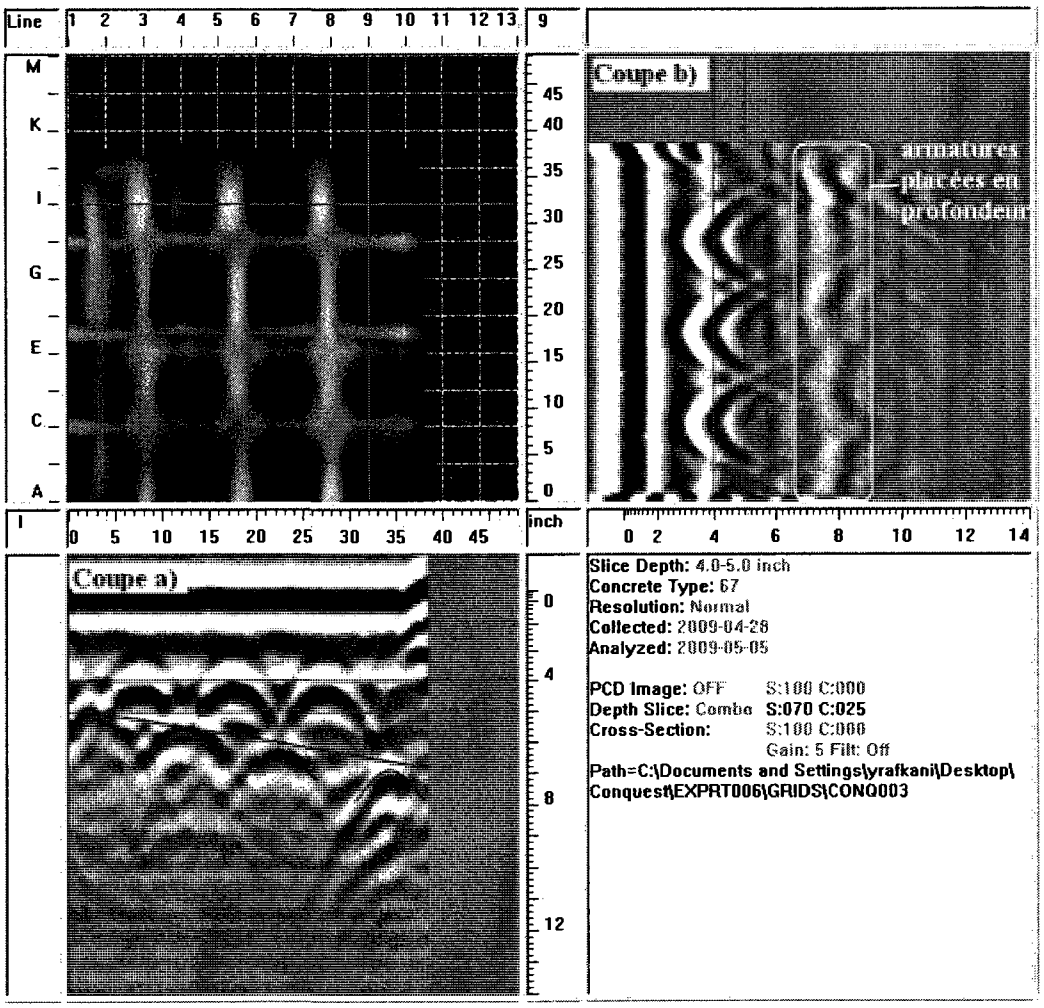



**Figure 3.4 Radargramme de la dalle 3 à une profondeur de 4-5''.**

d) Dalle 4

La dalle 4 joue sur la détection de conduits en métal et en PVC ainsi que sur des armatures de différents diamètres. On réalise alors le radargramme de cette dalle

comme le montre la figure 3.5. Dans un premier temps, on détecte parfaitement les armatures proches de la surface à 4-5 pouces (100 à 125 mm). D'ailleurs, on repère clairement la différence de taille entre les armatures car plus l'armature est grosse, plus l'hyperbole qui lui est associée a son sommet proche de la surface (en bleu sur la figure).

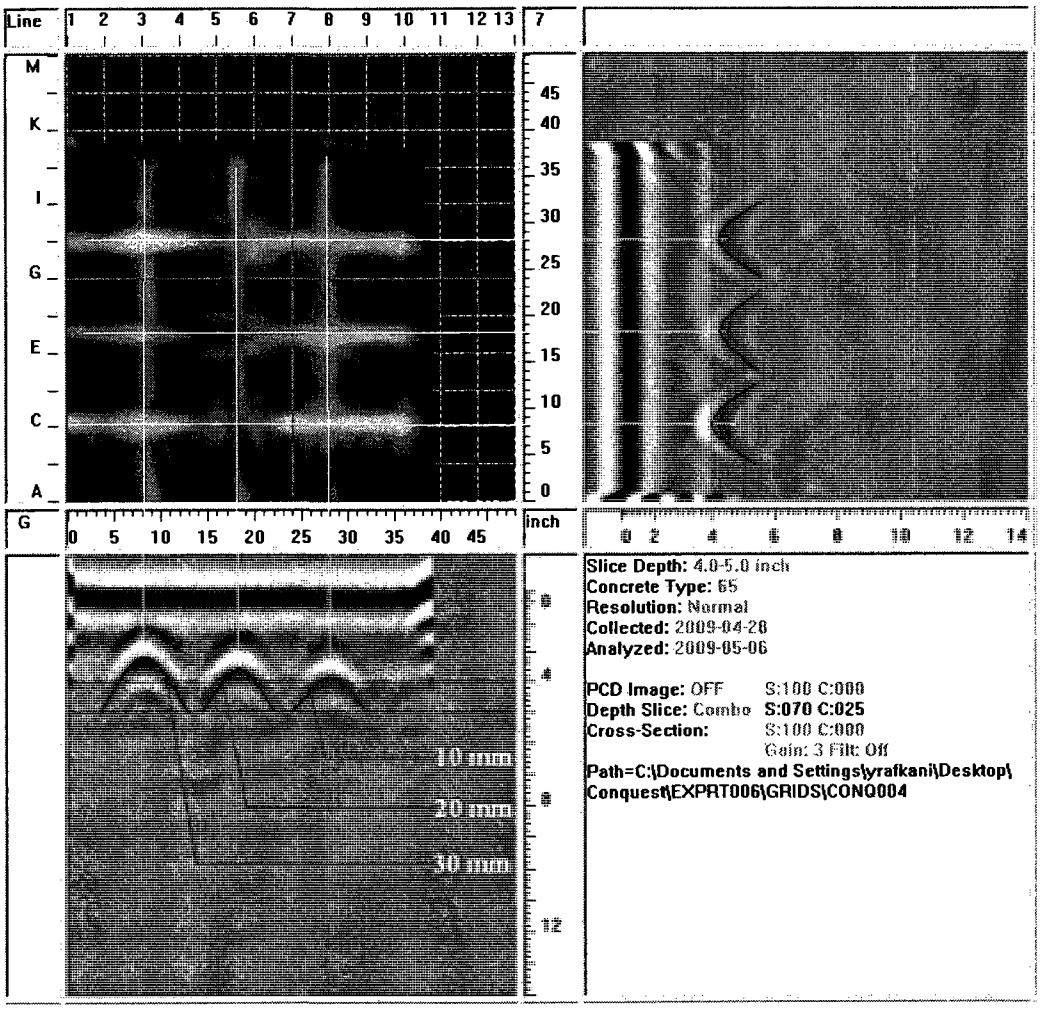



**Figure 3.5 Radargramme de la dalle 4 à une profondeur de 4-5".**

Dans un second temps, on recherche les deux conduits en PVC et le conduit métallique de 50 mm de diamètre qu'on a introduit dans cette dalle. On reprend alors le radargramme précédent mais à une profondeur plus grande. On repère, tout d'abord, clairement le conduit métallique, surtout sur la coupe de surface et sur la

coupe transversale (a) de la figure 3.6. Les conduits en PVC sont beaucoup moins visibles mais on suppose leurs présences grâce à la coupe de surface et la coupe (a) pour celui incliné avec un angle de 5° (a) et à la coupe (b) pour celui horizontal.

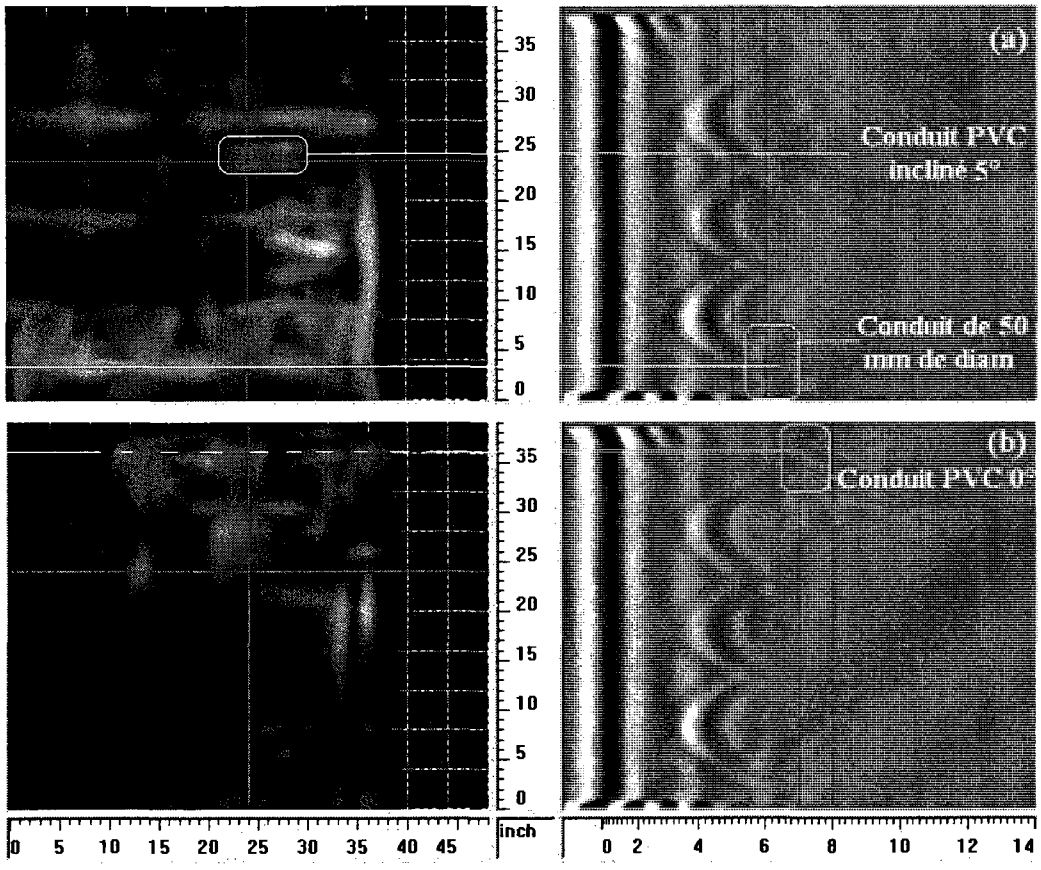



**Figure 3.6 Radargramme partiel de la dalle 4 (a) à 5-6'' et (b) à 7-8''**

Les dalles allant de 1 à 4 ont permis d'établir différents résultats quant' aux capacités de détection du Radar vis-à-vis des armatures ou des conduits. Nous traiterons ensuite les conclusions que nous pouvons en tirer et nous les combinerons avec d'autres techniques afin d'améliorer le diagnostique.

### 3.1.1 Détection des défauts

Maintenant, nous nous attardons sur les dalles 5 et 6. Ces dalles ont pour but principal de voir les limites de détection par rapport aux défauts. Nous utilisons dès

lors le Radar seul afin d'en tirer le maximum d'informations. Il sera ensuite combiné avec d'autres techniques pour compléter le diagnostique. Les défauts vont se manifester par de fortes réflexions sur la coupe de surface et par des perturbations sur les coupes transversales des radargrammes.

a) Dalle 5

La dalle 5 contient de nombreux défauts de différentes épaisseurs disposés à plusieurs profondeurs, présentées précédemment à la figure 2.14. On réalise alors un radargramme de cette dalle à des profondeurs pertinentes, où se trouvent les défauts. La figure 3.7 présente le radargramme à une coupe de 5-6" par rapport à la surface afin de voir les défauts les plus proches de la surface. On y voit clairement les plus gros défauts, d'une épaisseur de 25 mm et de 10 mm.

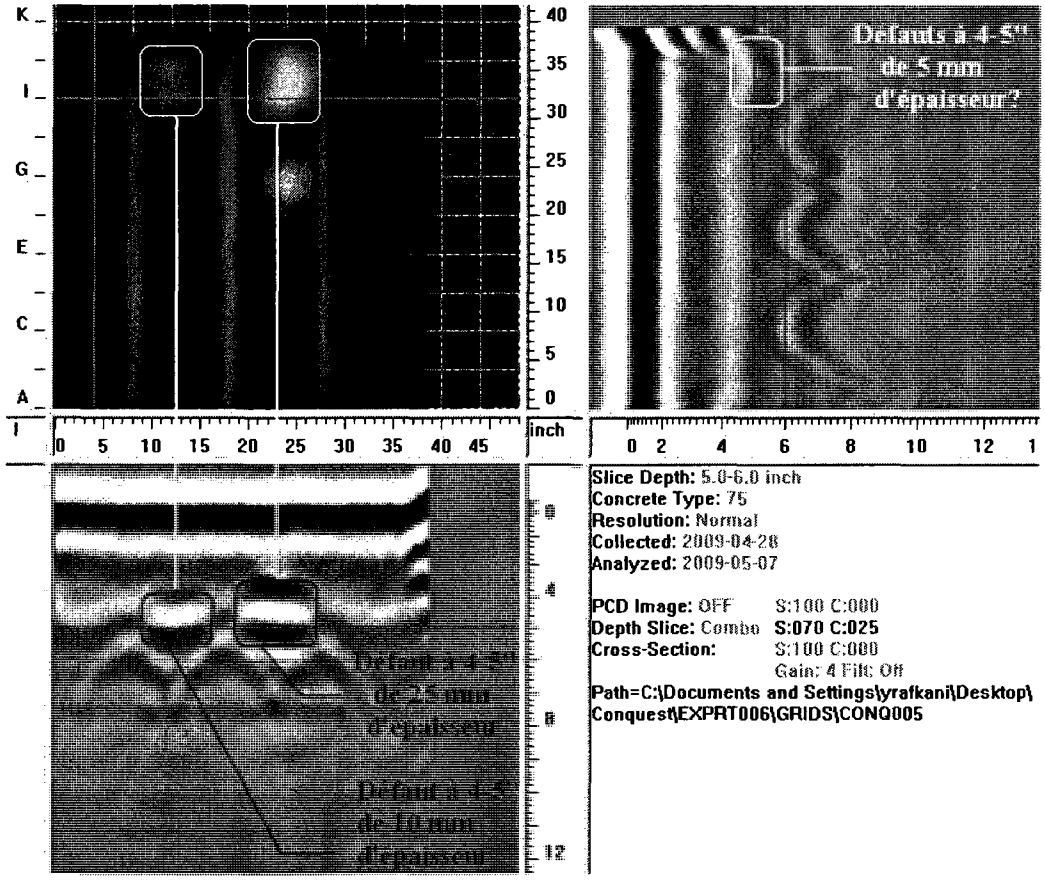



**Figure 3.7 Radargramme de la dalle 5 à une profondeur de 5-6"**

Le défaut de 5 mm ne semble pas visible. On semble néanmoins avoir un indice de sa présence sur l'une des coupes transversales présentées. On reprend le radargramme à la même profondeur mais à un endroit de coupe différent, celui où se trouve le défaut orienté à 45° à la figure 3.8. On n'arrive pas à le distinguer sur la coupe de surface. Cependant, sur la coupe transversale (a) on voit la base du défaut, vu le lieu de coupe, et sur la coupe (b), on pense voir le défaut incliné.

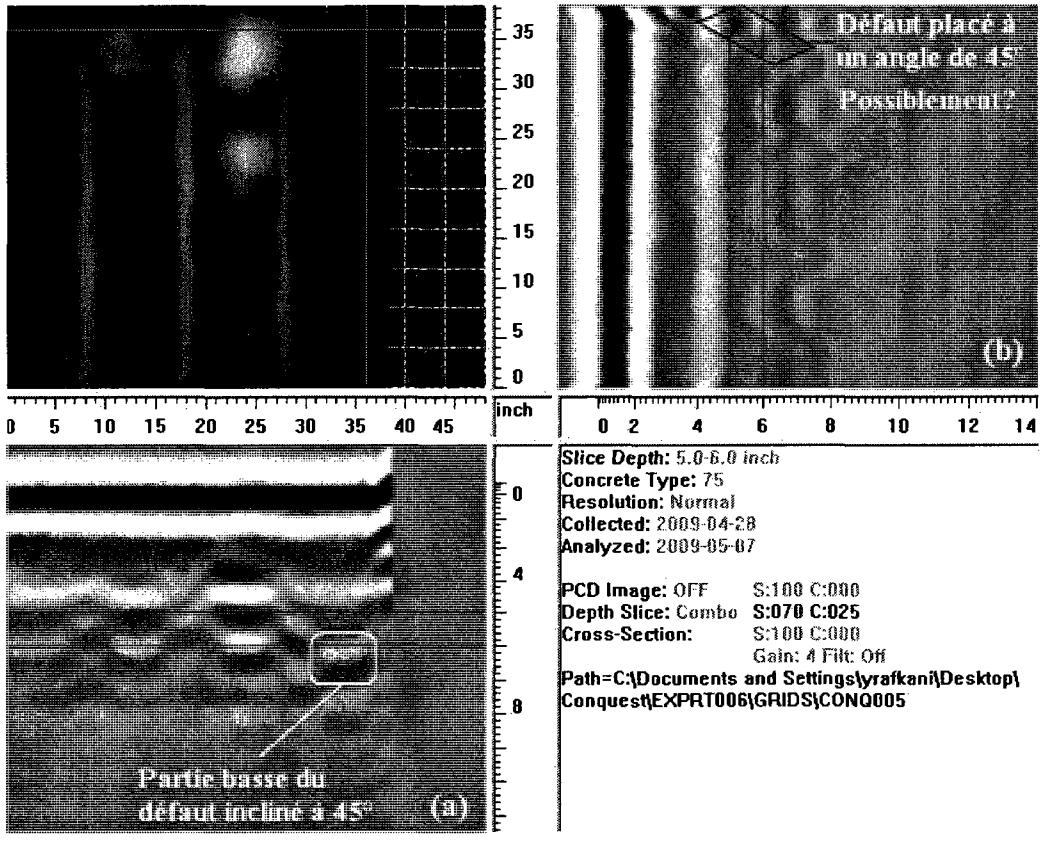



**Figure 3.8 Radargramme de la dalle 4 à une profondeur de 5-6''**

Maintenant, passons à une coupe plus profonde pour les défauts qui sont à hauteur des armatures (figure 3.9). On arrive clairement à distinguer le défaut le plus épais de 25 mm et celui de 10 mm, autant sur la coupe de surface que sur les coupes transversales. Par contre, celui de 5 mm ne semble pas visible sur les coupes transversales mais une légère perturbation est à noter sur la coupe de surface. Le

défaut incliné semble être aussi apparent sur la coupe transversale (c). Les deux dernières observations restent des hypothèses.

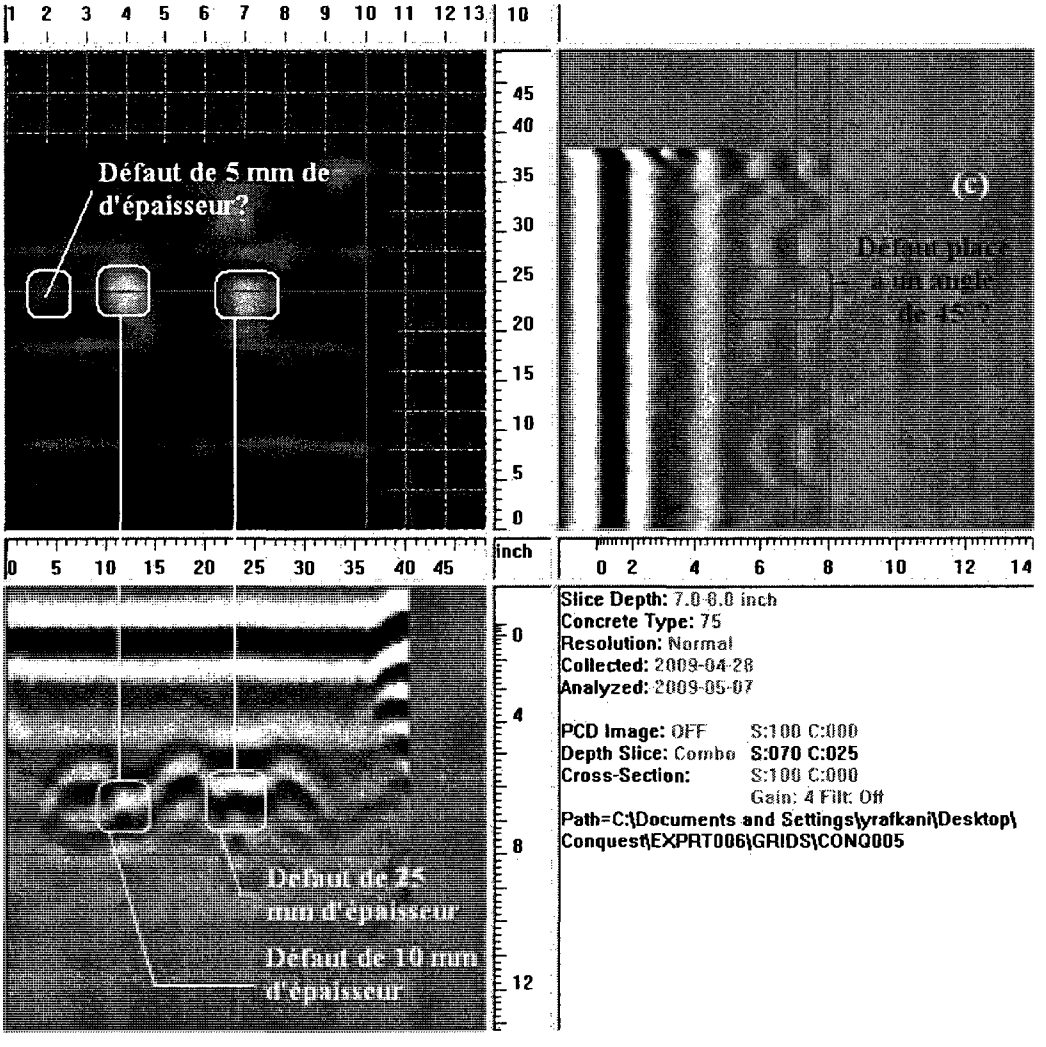



**Figure 3.9 Radargramme de la dalle 5 à une profondeur de 7-8''**

Enfin, passons maintenant aux défauts situés à une profondeur de 10-11″. Ici, les résultats sont beaucoup moins nets de la figure 3.10. En effet, on parvient à distinguer parfaitement le défaut de 25 mm d'épaisseur, sur la coupe de surface et sur l'une des coupes transversales. Le défaut de 10 mm n'est que très légèrement visible sur la coupe de surface. Le défaut de 5 mm et celui incliné à 45° ne sont pas visible ni sur la coupe de surface ni sur celles transversales. .

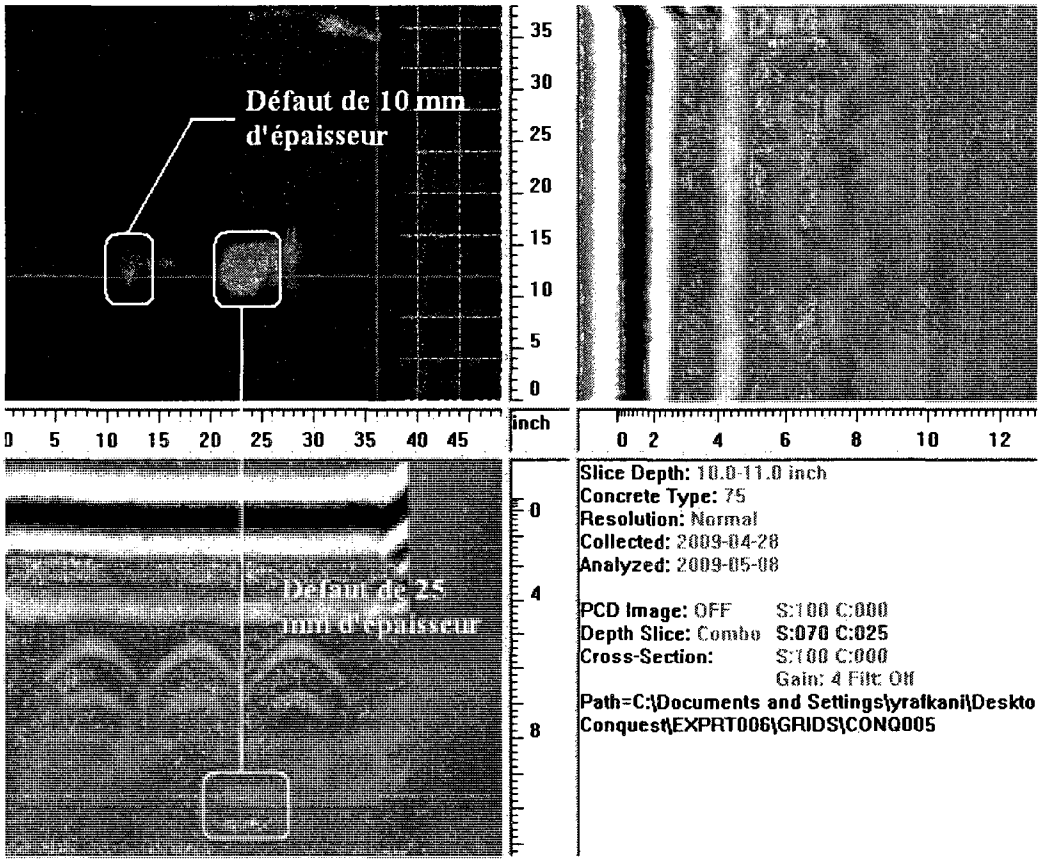



**Figure 3.10 Radargramme de la dalle 5 à une profondeur de 10-11''**

b) Dalle 6

La dalle 6 comporte aussi des défauts. Par contre, les paramètres de détection sont relatifs à la proximité des armatures. En effet, ils sont disposés proches des armatures ou sur ces dernières à différentes profondeur. La présence d'armatures peut empêcher ou interférer avec la détection des défauts et c'est la variable principale que l'on veut tester dans cette dalle. Trois nids d'abeilles ont été aussi introduits afin de voir s'il est possible de les repérer avec le Radar en premier lieu puis avec les ultrasons dans la seconde partie. Dans cette dalle, les défauts ont aussi été placés à 3 hauteurs différentes et nous exploiterons les radargrammes aux trois hauteurs pertinentes. Tout d'abord, la figure 3.11 présente les deux défauts placés à une hauteur d'environ 4'' (100 mm). L'un est sur l'armature, l'autre est à proximité

quand on considère une vue de dessus. La coupe de surface montre parfaitement les deux défauts. Les coupes transversales montrent aussi clairement la présence de ces défauts. Le radargramme montre bien sur les coupes que l'un des défauts est au dessus de l'armature et l'autre à sa proximité. Les hyperboles des armatures sont repérées en rouge sur la figure.

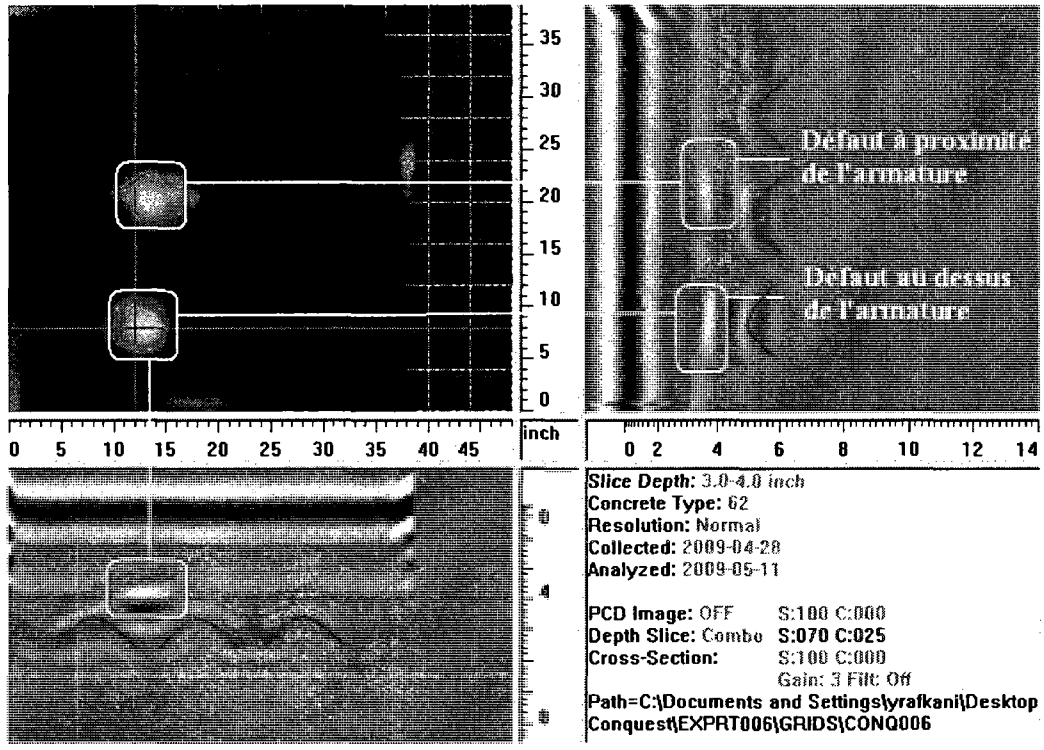



**Figure 3.11 Radargramme de la dalle 6 à une profondeur de 3-4''**

Maintenant, passons à la deuxième profondeur, celle à hauteur des armatures, à environ 5'' (125 mm). Cette profondeur est la plus pertinente. Elle va permettre de voir tous les défauts placés à cette profondeur auxquels s'ajoutent les nids d'abeilles et les défauts de dimensions différentes comme le montre la figure 2.15 de la partie présentant les essais. Le radargramme de la figure 3.12 présente, en premier lieu, les défauts (a) et (b), respectivement proche d'une armature et sous une armature. Les deux sont distinctement visibles sur la coupe de surface. Néanmoins, le défaut (b) est moins bien identifiable sur les coupes transversales car l'hyperbole cache un peu sa présence.

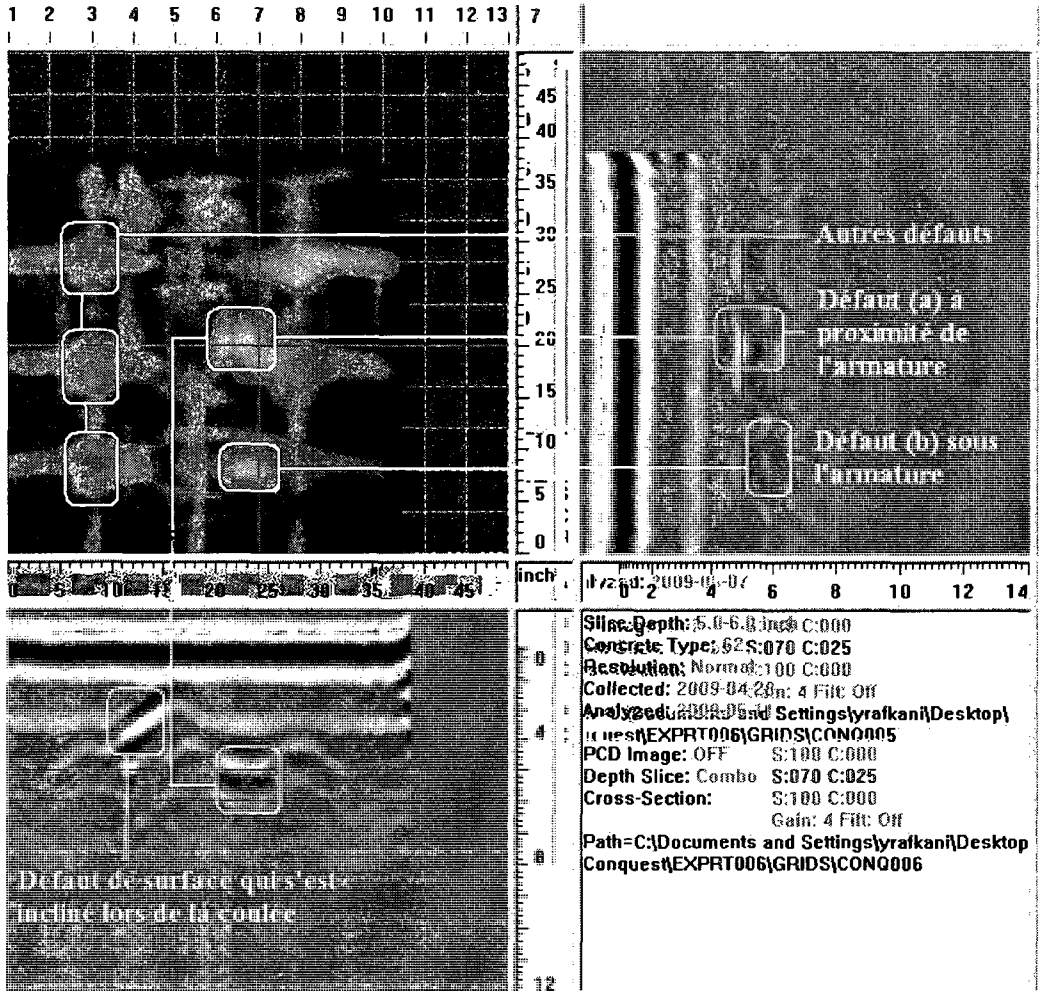



**Figure 3.12 Radargramme de la dalle 6 à une profondeur de 5-6'' pour les défauts présents à proximité des armatures**

Prenons maintenant un radargramme à la même profondeur mais à un endroit de coupe différent : celui couvrant les défauts de dimensions 100 x 75 x 75 mm, 100 x 50 x 50 mm et 100 x 25 x 25 mm. La figure 3.12 permet de voir les deux plus gros défauts sur la coupe de surface et sur les coupes transversales mais pas le plus petit. En ce qui concerne les nids d'abeilles, les deux radargrammes des figures 3.11 et 3.12 ne permettent pas de les voir. Aucune perturbation ou réflexion n'est visible sur les coupes.

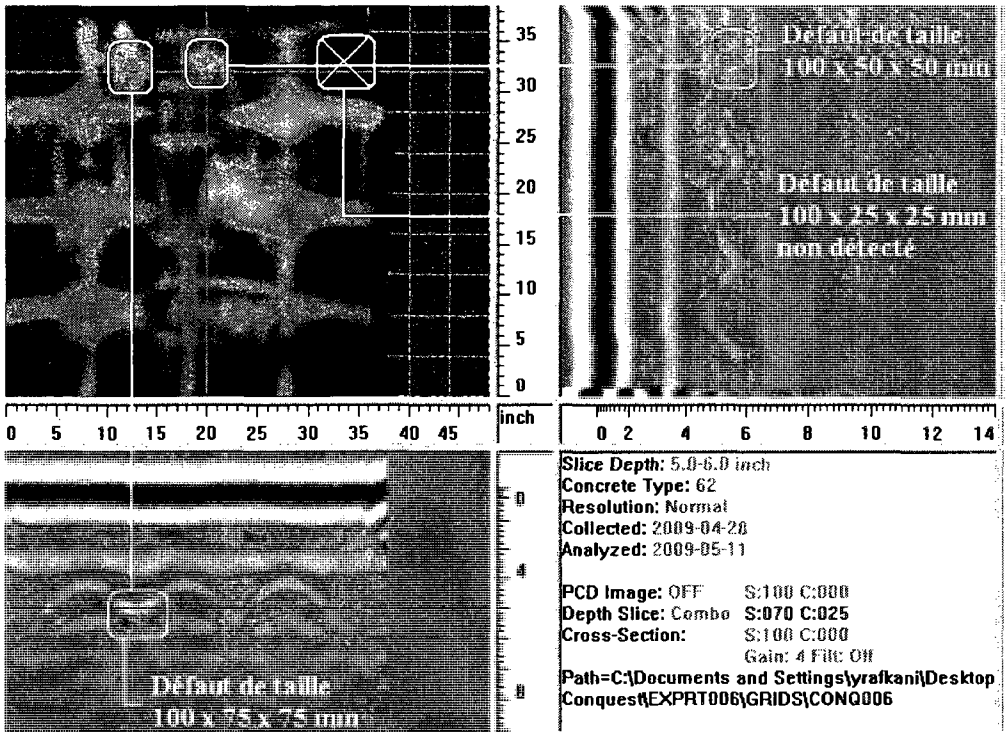



**Figure 3.13 Radargramme de la dalle 6 à une profondeur de 5-6'' pour les défauts de dimensions différentes.**

Enfin, passons aux défauts placés en profondeur, à environ 9-10'' (245 mm). Seul le défaut présent à proximité des armatures est visible, sur les deux coupes, l'autre est complètement n'apparaît sur aucune des coupes de la figure 3.14, il est symbolisé par une croix sur cette dernière.

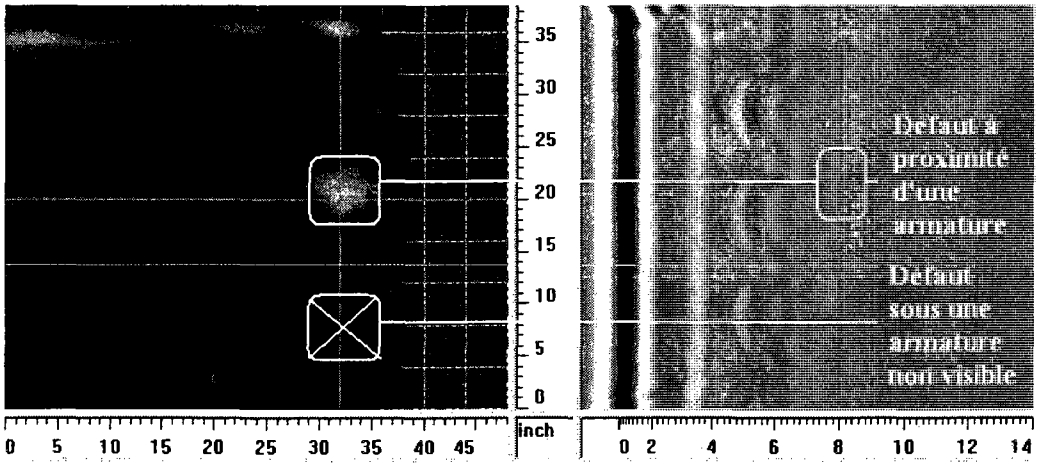



**Figure 3.14 Radargramme de la dalle 6 à une profondeur de 9-10''.**

## 3.2 Paramètres limites de détection des défauts par les ultrasons

### 3.2.1 Profondeur des défauts

Maintenant que nous avons réalisé des analyses avec le Radar, nous allons utiliser les ultrasons. Le Radar a permis de repérer la grande majorité des défauts. Ici, avec les ultrasons nous allons tenter de localiser tout les défauts en commençant par leurs profondeurs. On utilise pour ce faire la méthode indirecte présentée dans la revue de la littérature. On place l'émetteur à un endroit fixe et on déplace le récepteur à des distances régulières puis on trace le temps pris par les ondes pour voyager d'un transmetteur à l'autre en fonction de la distance comme le montre la figure 3.15.

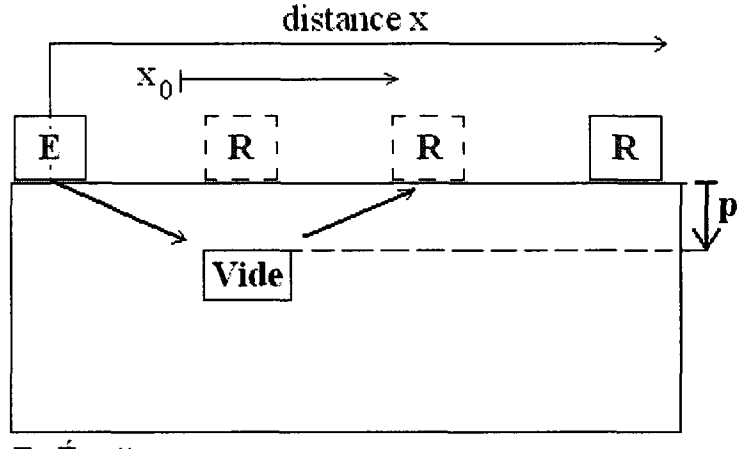



**Figure 3.15 Détection des vides par la méthode ultrasonore indirecte [54]**

On utilise alors l'équation suivante :

$$p = \frac{X_0}{2}\sqrt{\frac{Vs - Vd}{Vs + Vd}} \tag{3.1}$$

Où : p est la profondeur du défaut en mm.

$X_0$ est la distance à partir de laquelle on a un changement de pente dans la courbe tracée en mm.

Vs est la vitesse du son dans le béton sain en m/s (obtenu par la moyenne de cinq mesures par méthode directe dans des zones saines de la même dalle).
Vd est la vitesse du son dans le béton détérioré en m/s.

On réalise ces mesures sur 2 défauts disposés à la même hauteur de 90 mm par rapport à la surface de la dalle 6. Les autres défauts étant trop profonds et demanderait trop d'espace entre les transducteurs pour déterminer $X_0$. Les résultats obtenus sont présentés en Annexes B.

A partir de ces données, on trace la distance en fonction du temps de transit. On obtient les courbes de la figure 3.16 et 3.17. Pour chaque défaut, la courbe est constituée de deux pentes. C'est au changement entre les deux pentes que l'on détermine le $X_0$. En confrontant à chaque fois les deux équations de droites pour chaque courbe, on détermine où elles se rencontrent. On peut ainsi calculer la profondeur des défauts avec l'équation 3.1 présentée précédemment.

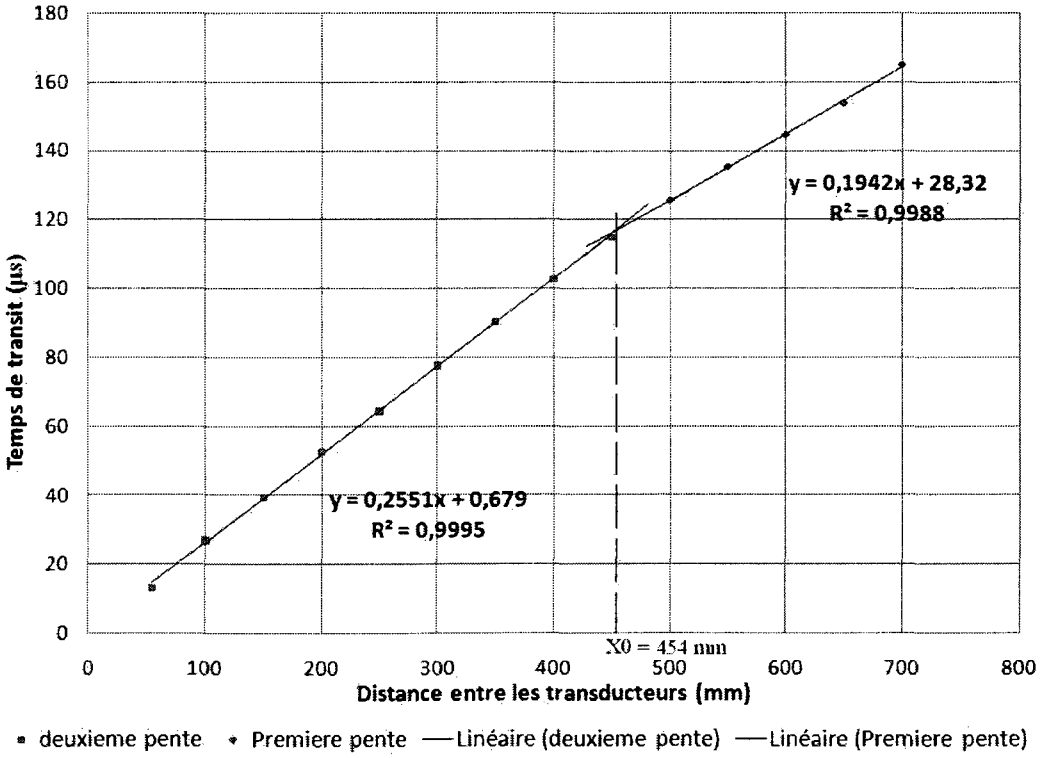



**Figure 3.16 Courbe obtenue par la méthode indirecte pour la détermination de la profondeur du premier défaut dans la dalle 6.**

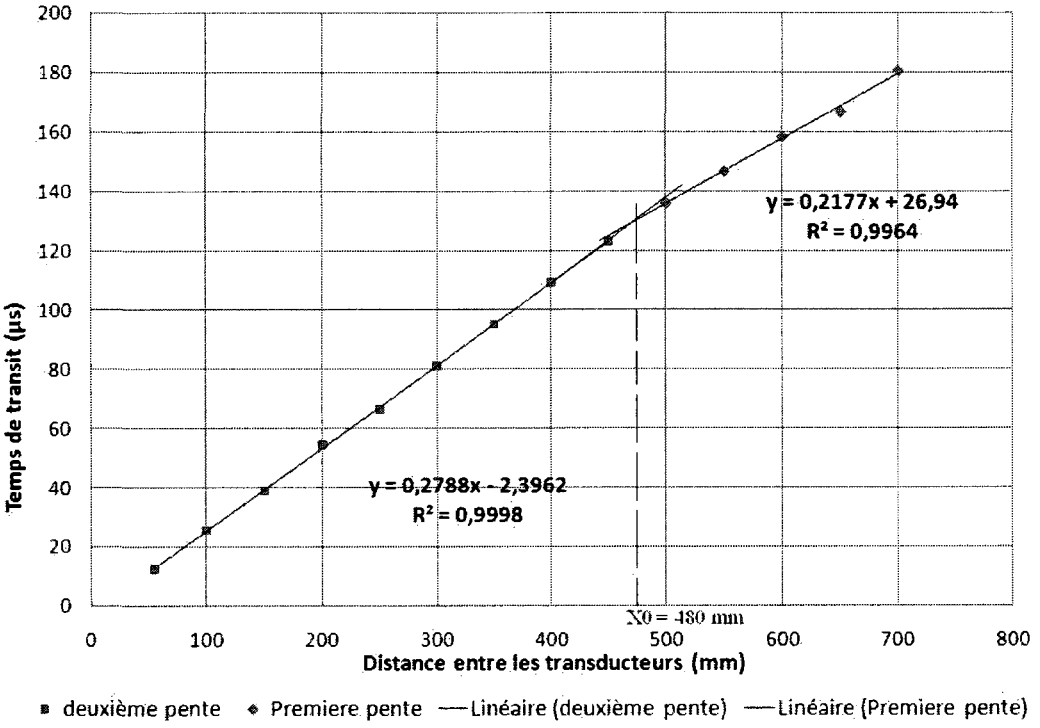



**Figure 3.17 Courbe obtenue par la méthode indirecte pour la détermination de la profondeur du deuxième défaut dans la dalle 6.**

Le tableau 3.1 présente les résultats obtenus ainsi que les mesures de vitesse des ondes dans le béton sain et celui détérioré, en utilisant la méthode directe. Tous les paramètres y sont présentés ainsi que l'erreur relative par rapport à la réelle profondeur de 90 mm déterminée par la formule suivante :

$$Er = \frac{p_r - p_m}{p_r} \times 100 \qquad (3.2)$$

Où : Er est l'erreur relative en %

$p_m$ est la profondeur mesurée en mm

$p_r$ est la profondeur réelle en mm

**Tableau 3.1 Récapitulatif des résultats pour la détermination de la profondeur des deux défauts de la dalle 6 situés à une profondeur de 90 mm.**

| | Courbes | | $X_0$ (mm) |
|---|---|---|---|
| | **Première droite** | **Deuxième droite** | |
| **Premier défaut** | y = 0,2551x + 0,679 | y = 0,1942x + 28,32 | 454 |
| **Deuxième défaut** | y = 0,2788x - 2,3962 | y = 0,2177x + 26,94 | 480 |

| | Vs (m/s) | Vd (m/s) | $p_m$ (mm) | Er (%) |
|---|---|---|---|---|
| **Premier défaut** | 4504 | 3437 | 83,19 | 7,57 |
| **Deuxième défaut** | 4504 | 3464 | 86,71 | 3,66 |

### 3.2.2 Épaisseur des défauts et détection des nids d'abeilles

Maintenant, nous nous intéressons à l'épaisseur des défauts. Pour ce faire nous allons procéder avec la méthode directe comme le montre à la figure 3.18. Les ondes ultrasonores voyagent moins vite dans les vides ou dans des nids d'abeilles que dans le béton. Ainsi, si la vitesse prise par les ultrasons pour traverser la dalle est moins grande, cela reflète certainement la présence de défaut. On mesure alors en premier lieu les vitesses où des défauts ont été introduits puis nous nous attarderons sur les zones où des nids d'abeilles ont été introduits.

#### Épaisseur des vides

Pour la mesure des vides, on a trois épaisseurs différentes : 5 mm, 10 mm et 25 mm. On mesure tout d'abord la vitesse prise par les ultrasons pour parcourir la dalle de béton 5 dans une zone saine. Ensuite, on mesure la vitesse pris pour parcourir cette même distance, mais dans une épaisseur contenant les défauts. Les vitesses seront ainsi comparées. Puisque les ondes ne peuvent pas voyager dans l'air, la présence d'une fissure ou d'un vide sur le chemin va ainsi augmenter la longueur parcourue et l'atténuation. Ainsi, le temps de transit enregistré sera beaucoup plus long apportant donc une vitesse beaucoup moins rapide. Ici, le vide est simulé par du polystyrène et

les ondes de compressions pourront cependant être ralentie mais le traverseront et une estimation de l'épaisseur du défaut sera ainsi possible.

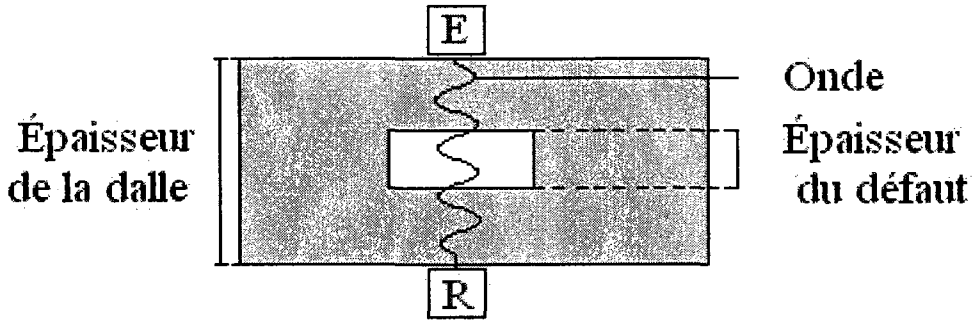



**Figure 3.18 Méthode directe pour mesurer l'épaisseur d'un défaut.**

On connaît le temps total pour parcourir l'épaisseur et les vitesses dans les différents milieux. On peut donc déterminer la distance parcourue dans le vide comme le montre l'équation (3.3).

$$e_v = \frac{v_v(v_b \times t_t - e_d)}{vb - v_v} \tag{3.3}$$

Où : $e_v$ est l'épaisseur du polystyrène assimilé au vide en m

$v_v$ est la vitesse des ultrasons dans le défaut en m/s

$t_t$ est le temps pris par les ultrasons pour traverser la dalle en s

$e_d$ est l'épaisseur de la dalle

$e_b$ est l'épaisseur du béton auquel on soustrait l'épaisseur du vide en m

$v_b$ est la vitesse des ultrasons dans le béton en m/s

Le matériau pour simuler le vide, ou plus précisément l'air, est du polystyrène expansé. La vitesse des ultrasons dans l'air est d'environ 340 m/s et celle dans le polystyrène n'est pas exactement la même. Ainsi, afin de pouvoir calculer l'épaisseur du défaut, il est important de connaître la réelle vitesse. Pour ce faire, on la mesure

avec l'appareillage ultrasonore sur le même polystyrène que celui introduit dans la dalle, à trois points différents. Les mesures sont présentées dans le tableau 3.2.

**Tableau 3.2 Détermination de la vitesse du son dans le polystyrène expansé.**

| | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|
| **Vitesse des ultrasons dans le polystyrène $v_v$ (m/s)** | 575 | 578 | 562 |
| **Moyenne des $v_v$ (m/s)** | 572 | | |

On a mesuré aussi la vitesse des ultrasons dans le béton précédemment, pour le calcul de la profondeur des défauts. Elle a été estimée à 4504 m/s. On mesure le temps pris par les ultrasons pour traverser la dalle aux endroits où se trouvent les trois épaisseurs de défauts. Le tableau 3.3 présente les résultats et le calcul des épaisseurs des différents défauts en utilisant l'équation 3.3.

**Tableau 3.3 Tableau récapitulatif de la détermination des épaisseurs des vides.**

| | |
|---|---|
| **Vitesse des ultrasons dans le polystyrène $v_v$ en m/s** | 572 |
| **Vitesse des ultrasons dans le béton $v_b$ en m/s** | 4504 |
| **Épaisseur de la dalle 5 en m** | 0,3 |

| | **Temps de transit (µs)** |
|---|---|
| **Hauteur contenant le défaut de 5 mm d'épaisseur** | 72,6 |
| **Hauteur contenant le défaut de 10 mm d'épaisseur** | 76,3 |
| **Hauteur contenant le défaut de 25 mm d'épaisseur** | 83,8 |

| | **Défaut 5 mm** | **Défaut 10 mm** | **Défaut 25 mm** |
|---|---|---|---|
| **Epaisseur calculée mm** | 3,9 | 6,3 | 11,3 |
| **Erreur relative en %** | 22 | 37 | 55 |

**Localisation des nids d'abeilles.**

Maintenant, nous allons rechercher à détecter les trois nids d'abeilles de dimensions 10 x 10 x 5 $cm^3$, 10 x 5 x 5 $cm^3$ et 8 x 5 x 2,5 $cm^3$ qui ont été introduits dans la dalle 6. Le but premier est de voir si on peut les détecter puis de les délimiter. On ne peut pas déterminer leurs épaisseurs car ils sont constitués des mêmes matériaux que le reste de la dalle mais ont beaucoup plus de porosités. Ainsi, la présence des nids d'abeilles se traduira par une vitesse des ultrasons moins rapide par rapport à une zone saine pour traverser l'épaisseur de la dalle. Tout d'abord, on mesure la vitesse des ultrasons dans une zone saine. Ensuite, on mesure la vitesse dans les zones contenant les nids d'abeilles. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.4.

**Tableau 3.4 Mesure de la vitesse minimale des ultrasons passant par les nids d'abeilles.**

| | **Vitesse en m/s** |
|---|---|
| **Béton sans nid d'abeilles** | 4511 |
| **Béton contenant le nid 10 x 10 x 5 $cm^3$** | 4239 |
| **Béton contenant le nid 10 x 5 x 5 $cm^3$** | 4278 |
| **Béton contenant le nid 8 x 5 x 2,5 $cm^3$** | 4399 |

Les différentes mesures présentent un ralentissement des ultrasons lors de la présence de nids d'abeilles par rapport à un béton sain. Le nid le moins épais ralenti moins les ultrasons que les deux autres. Il est intéressant de rechercher à les délimiter. On balaye alors avec les palpeurs la zone où se trouvent les nids d'abeilles. Sachant exactement où ils se trouvent, on mesure toutes les vitesses lorsque l'émetteur est au dessus des nids et lorsqu'il est à sa proximité. Les résultats sont présentés à la figure 3.19. Les endroits où ont été prises les mesures sont symbolisés par des cercles rouges représentant l'émetteur de diamètre 50 mm. A l'intérieur de chaque cercle est indiquée la vitesse mesurée. On constate que dans la grande majorité des cas, lorsque

le palpeur est sur le nid, la vitesse est ralentie. Pour le nid 8 x 5 x 2,5 $cm^3$, lorsque l'émetteur n'est qu'en partie sur le nid, la vitesse n'est pas affectée.

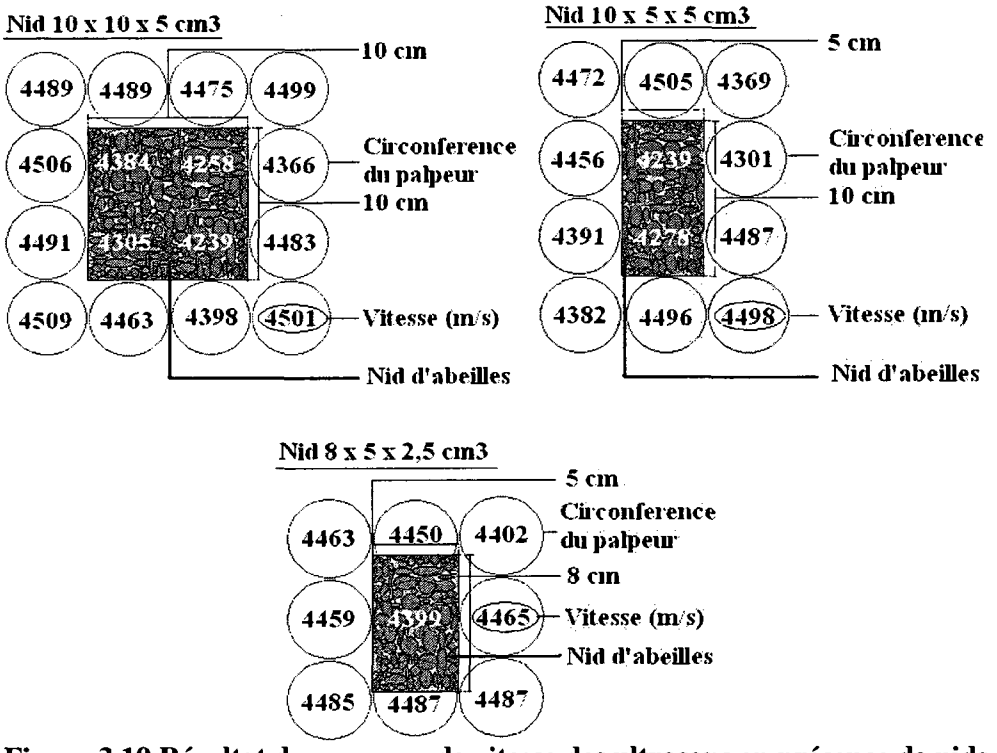



**Figure 3.19 Résultat des mesures de vitesse des ultrasons en présence de nids d'abeilles : vue de dessus.**

### 3.2.3 Taille et inclinaison des défauts

Nous nous intéresseront en premier à la taille des défauts en auscultant ceux présents dans la dalle 6. Ensuite, nous tenterons de voir si on arrive à détecter les défauts inclinés. Comme pour le calcul de profondeur des défauts, une distance relativement éloignée est nécessaire pour pouvoir observer l'inclinaison. Ainsi, nous reviendront seulement sur le défaut incliné à 45° et d'épaisseur 10 mm présent à une profondeur de 100 mm.

#### Taille des défauts

Passons maintenant aux trois défauts de dimensions 75 x 75 x 10 mm, 50 x 50 x 10 mm et 25 x 25 x 10 mm présents dans la dalle 6. Nous allons adopter la même

méthode que pour les nids d'abeilles. En effet, tout d'abord, nous allons confirmer leurs présences puis tenter de les délimiter. Ici encore, la présence de défauts va créer un ralentissement de la vitesse des ultrasons par la méthode directe. Les résultats sont présentés schématiquement à la Figure 3.20.

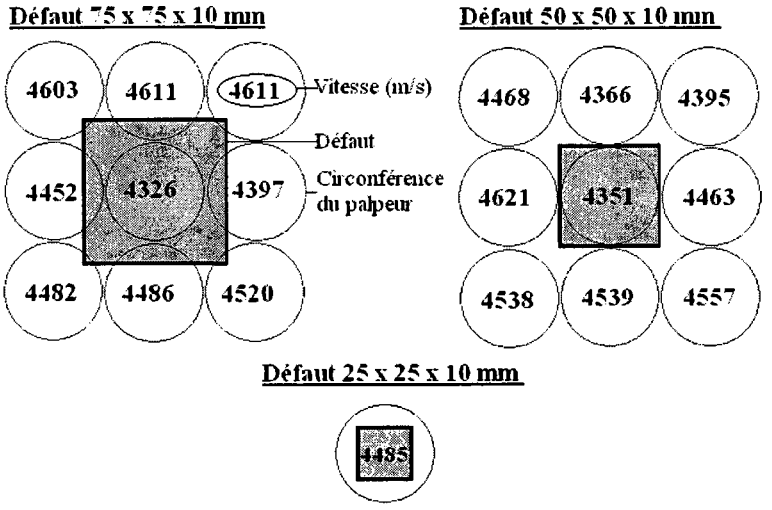



**Figure 3.20 Résultat des mesures de vitesse des ultrasons en présence des défauts des différents tailles : vue de dessus.**

On observe une atténuation de la vitesse des ultrasons lorsque le palpeur est situé au dessus du défaut pour les deux défauts les plus grands : 4326 m/s pour celui de dimensions 75 x 75 x 10 mm et 4351 m/s pour celui de 50 x 50 x 10 mm. Par contre, pour le plus petit, il n'influence pas les mesures. En effet, la vitesse mesurée est de 4485 m/s ce qui se rapproche de la vitesse type des ultrasons de la dalle sans présence de défauts, dans une zone saine.

### Inclinaison des défauts

La méthode indirecte est alors utilisée. Lors de la prise de mesure, on déplace le récepteur de plus en plus loin du défaut comme l'a montré la figure 3.21. Si le défaut est parallèle à la surface, on va avoir un changement de pente au moment où on rencontre le défaut comme quand on a calculé la profondeur du défaut précédemment lors du calcul des profondeurs.

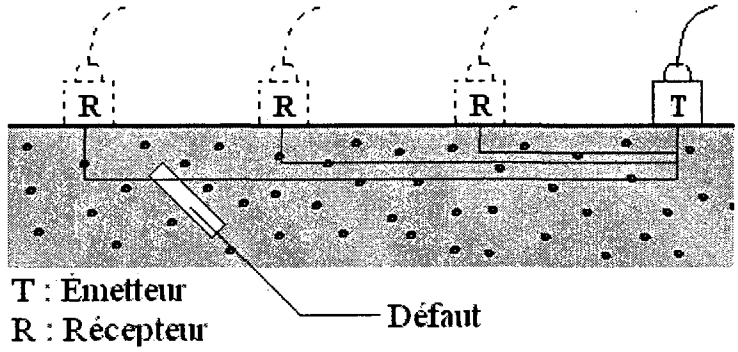



**Figure 3.21 Principe de détection des défauts inclinés selon la méthode indirecte.**

Ici, lorsqu'il est incliné, on est sensé noter une décroissance du temps de transit indiquant que le défaut est incliné dans le sens de déplacement du transducteur. Pour ce faire, on trace le temps de transit en fonction de la distance entre les deux transducteurs dans la zone contenant le défaut incliné. Le graphique est présenté à la Figure 3.22.

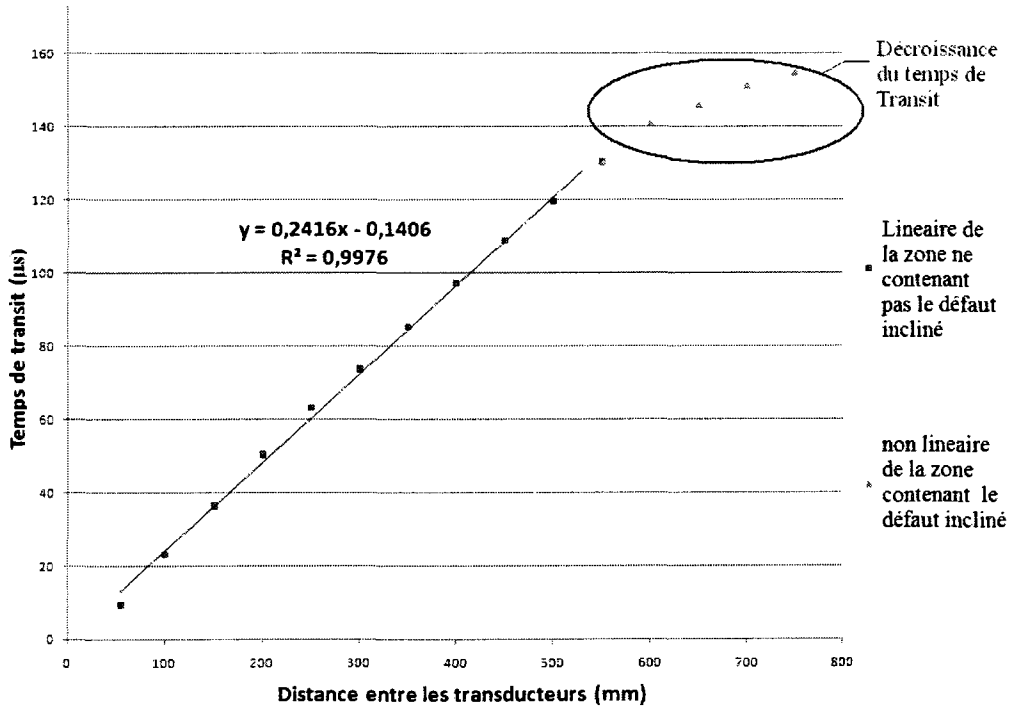



**Figure 3.22 Courbe du temps de transit en fonction de la distance entre les transducteurs pour la détection du défaut incliné à 45°.**

On constate une décroissante de la courbe représentant la zone contenant le défaut à partir d'environ 575 mm. La décroissance du temps de transit n'est pas linéaire et indique la présence du défaut incliné.

## 3.3 Analyse de combinaison des techniques et recommandations

### 3.3.1 Marteau de Schmidt

Le marteau de Schmidt est l'outil indispensable qu'il faut allier aux ultrasons lors d'analyses, notamment pour l'estimation de la résistance à la compression et la localisation de défauts. Ici, on l'utilise pour la dalle 5 dont la configuration a été présentée à la figure 2.15 pour rechercher à détecter la présence des défauts. Vingt mesures sont prises au dessus de chaque défaut et vingt autres dans une zone sans défaut ; les deux valeurs extrêmes sont alors exclues pour ne finalement garder dix-huit mesures dans les calculs comme il est suggéré dans le manuel d'utilisation. La répartition de ces dernières et les moyennes sont alors comparées à celles prises dans une zone sans défaut de la même dalle. Les résultats et les répartitions graphiques sont présentés à l'Annexe C et les moyennes et les écarts-types sont présentées dans le tableau 3.5. On retrouve une répartition suivant une loi normale.

**Tableau 3.5 Moyennes et écart-types des rebonds mesurés sur la Dalle 5.**

| | **e = 5 mm p = 100 mm α = 0°** | **e = 10 mm p = 100 mm α = 0°** | **e = 25 mm p = 100 mm α = 0°** | **e = 5 mm p = 150 mm α = 0°** | **e = 10 mm p = 150 mm α = 0°** | **e = 25 mm p = 150 mm α = 0°** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Moyenne** | 25,61 | 25,00 | 22,94 | 25,78 | 23,83 | 28,22 |
| **Ecart-type** | 1,85 | 2,06 | 2,29 | 2,05 | 3,03 | 2,05 |

| | **e = 10 mm p = 250 mm α = 0°** | **e = 25 mm p = 250 mm α = 0°** | **e = 10 mm p = 100 mm α = 45°** | **e = 10 mm p = 150 mm α = 45°** | **e = 10 mm p = 250 mm α = 45°** | **Zone sans Défauts** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Moyenne | 28,94 | 27,72 | 25,11 | 26,94 | 28,17 | 28,33 |
| Ecart-type | 1,76 | 1,87 | 1,81 | 1,59 | 2,20 | 2,09 |

Les résultats apportés par le marteau sont très intéressants. En effet, on remarque que lorsque les défauts sont proches de la surface de la dalle, leurs moyennes des rebonds est plus basse par rapport à celle dans des zones sans défauts (25,61 ; 25,00 et 22,94 par rapport à 28,33). Cette baisse semble indiquer à juste titre la présence de ces défauts. Par contre, on note que plus les défauts sont profonds, plus leurs présences ne semblent pas influencer les résultats. On retrouve des valeurs s'approchant de celles dans des zones « saines » pour les défauts les plus profonds (250 mm). Le marteau semble apporter un indice très important et non des moindre par rapport à la présence de défauts. Effectivement, le défaut situé à une profondeur de 100 mm mais à un angle de 45° semble être détecté par le marteau. Cette capacité de détection est très utile et avantageuse, d'autant plus que sa présence sur les radargramme est incertaine (Figure 3.8). De plus, elle donne un indice pour la vérification avec les ultrasons.

### 3.3.2 Le Radar et les ultrasons

Le Radar et les ultrasons sont deux techniques indissociables et complémentaires. Lors de nos expériences, nous avons commencé par une première analyse au Radar puis par les ultrasons. Il est dès lors possible de tirer des analyses et des conclusions des expériences et des résultats.

#### Le Radar

Le Radar est un outil indispensable pour repérer les armatures et les conduits. Il est essentiel de pouvoir les repérer avant toute analyse. Cependant leurs proximités, leurs superpositions, ou encore leurs tailles peuvent empêcher une bonne visibilité de ces dernières. Les Dalles 1, 2, 3 et 4 ont eu pour objectif de tirer les limites du Radar utilisé.

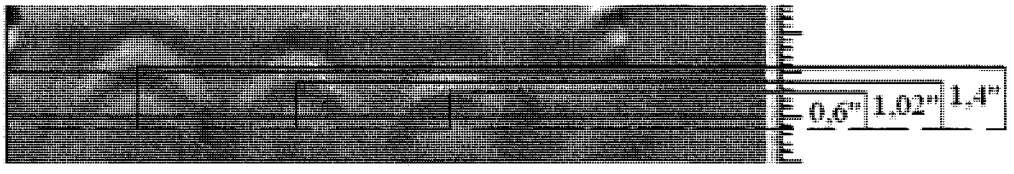
Les essais réalisés sur la Dalle 2 ont permis de constater que pour une même profondeur, lorsque les armatures sont trop proches, à une distance de 2'', elles interfèrent entre elles et ne permettent pas de les distinguer au point de ne voir

qu'une armature au lieu de deux. La dalle 2 nous permet d'en déduire que le Radar est capable de voir une armature inclinée (celle avec un angle de 10°) et d'être même capable de la suivre avec la profondeur. La distance entre deux armatures est mesurable avec les radargrammes et donne une précision de l'ordre de 0,5 pouces ce qui est généralement suffisant.

La Dalle 3, quant' à elle, nous permet de conclure que la superposition d'armatures n'est pas réellement un facteur limitant pour l'utilisation du Radar. Avec un gain élevé, de l'ordre de 5, la profondeur n'influence pas la visibilité des armatures. On note aussi que lorsque des armatures sont à une distance horizontale de 2'' mais pas à la même profondeur, l'interférence entre elles est beaucoup moins marquée et il est possible de les distinguer.

La Dalle 4 donne, en premier lieu, des informations sur les tailles des armatures. Il est vrai que l'estimation des diamètres est très difficile. Cependant l'approche la plus intéressante que l'on peut en tirer est une approche relative. En effet, on voit clairement la différence de taille des hyperboles. Ainsi, la comparaison des hyperboles entre elles permettra de connaître les diamètres. En exploitant les données, on mesure la distance entre le sommet de l'hyperbole de chaque armature et la base sur la même horizontale comme le montre la Figure 3.23 représentant une des coupes transversales de la Figure 3.5.

**Figure 3.23 Coupe transversale de la Dalle 4 présentant les différents diamètres d'armatures.**




On connaît ici les diamètres réels des armatures : 10 mm (0,393''), 20 mm (0,787'') et 30 mm (1,181''). Le tableau 3.6 présente les mesures effectuées sur le radargramme et les diamètres des armatures correspondants.

**Tableau 3.6 Mesure des hauteurs des hyperboles pour des diamètres d'armatures différentes sur la Dalle 4.**

| | Armature 10mm (0,393") | Armature 20mm (0,787") | Armature 30mm (1,181") |
|---|---|---|---|
| **Hauteur des hyperboles (en po)** | 0,6 | 1,02 | 1,4 |

On trace alors un graphique présenté à la Figure 3.24 comparant les mesures prises sur le radargramme et celles réelles. On a alors une relation de proportionnalité entre les hauteurs et les diamètres réels. Ainsi, dès lors qu'on connaît le diamètre d'une armature présente dans une structure de béton, on peut déterminer les autres diamètres. Sinon, il est cependant possible d'établir des estimations relatives si on a au moins trois diamètres différents dans un béton donné.

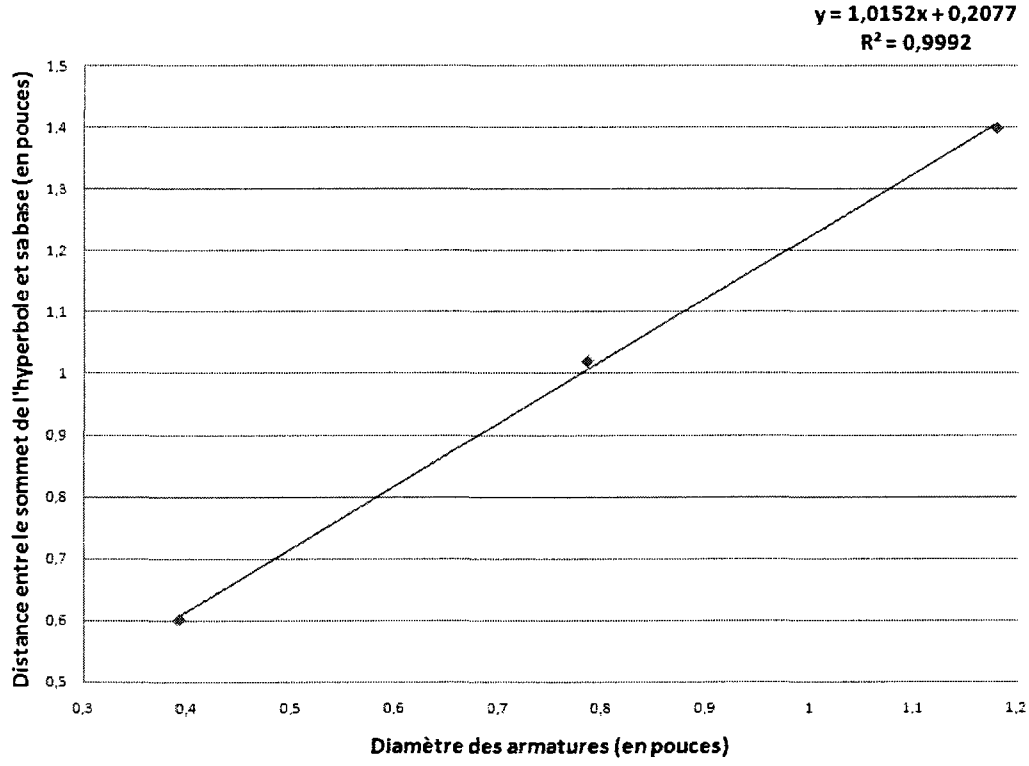



**Figure 3.24 Courbe présentant les hauteurs des hyperboles mesurées sur le radargramme en fonction des diamètres des armatures correspondantes.**

Ensuite, on constate aussi qu'il est difficile de détecter les conduits de PVC. La réflexion étant moindre par rapport à celle des armatures, un œil plus attentif est nécessaire, d'autant plus si ces derniers sont en profondeur. Il faut dans ce cas là se baser plutôt sur la coupe de surface car les coupes transversales sont beaucoup moins pertinentes. Enfin, en ce qui concerne le conduit en acier, là encore, la coupe de surface est l'outil le plus pratique à utiliser pour le détecter. L'utilisation d'un balayage complet de la zone d'intérêt (coupes transversales et coupe de surface) est donc nécessaire plutôt qu'un simple balayage linéaire ne donnant qu'une coupe transversale.

La Dalle 5 a pour but principal la détection des défauts qui ont été introduits lors de la phase expérimentale. Il est important de rappeler que trois paramètres ont été mis en jeu : la profondeur, l'épaisseur du défaut et l'inclinaison du défaut. Tout d'abord, commençons par la profondeur des défauts. Le Radar est capable de détecter les défauts aux trois profondeurs proposées. Cependant, cette affirmation est à nuancer. En effet, la capacité de détection baisse avec la profondeur. De surcroît, les hyperboles des armatures peuvent les cacher sur les coupes transversales quand ils se trouvent en dessous. Le second paramètre testé est l'épaisseur des défauts. Les défauts de 25 et 10 mm sont nettement détectés par le Radar. Par contre ceux de 5 mm, peu importe la profondeur ne paraissent pas, ou du moins, des indices de leurs présences sur les radargrammes restent au stade de la supposition. Dans ce type de béton, on considère donc qu'un vide inférieur à 10 mm ne pourra être visible par le Radar. Enfin, le troisième paramètre est l'inclinaison. Comme on l'a vu précédemment, le plus facile est de détecter des défauts horizontaux. Les défauts inclinés sont beaucoup plus difficilement détectables car beaucoup moins de réflexions reviennent à l'antenne réceptrice. Quand le défaut est incliné, le Radar est insuffisant pour détecter sa présence. D'autres outils seront dès lors utiles : Le marteau de Schmidt qui a donné des résultats intéressants et les ultrasons.

Enfin, la Dalle 6 permet d'autres paramètres relatifs aux défauts. En premier, la proximité des défauts avec les armatures. Il en ressort que les défauts présents a proximité des armatures sont visibles, peu importe la profondeur. Par contre,

lorsqu'ils sont sur la même verticale que les armatures, seuls ceux au dessus ou au niveau des armatures sont visibles. Ceux en dessous ne sont pas visible, cachés par l'hyperbole. Le deuxième paramètre est la taille des défauts. Les défauts de dimensions inférieures à 50 x 50 x 100 mm ne sont pas détectables. Enfin, les nids d'abeilles ne sont pas du tout détectés par le Radar, aucune perturbation n'est constatée sur les coupes transversales. Ce dernier constat nous pousse donc à utiliser un autre outil de diagnostique : les ultrasons que nous traitons juste après.

**Les ultrasons**

Une fois les mesures réalisées par le Radar, on s'est attardé sur les ultrasons. Ils vont principalement servir à la détection des défauts et des nids d'abeilles. Ils sont ainsi utilisés spécifiquement pour les Dalles 5 et 6. L'une des premières expériences menées est la détermination de la profondeur des défauts. La méthode adoptée est celle indirecte. Plus la distance entre l'émetteur et le récepteur est grande, plus les ondes captées entrent en profondeur et pourront ainsi entrer en contact avec les défauts. Cette méthode émet dès lors un facteur limitant. En effet, les défauts trop profonds nécessitent une trop grande distance entre les transducteurs, dépassant les dimensions de la dalle. On a alors déterminé les profondeurs des deux défauts les moins profonds de la Dalle 6, ceux situés à une profondeur de 95 mm. Pour ces deux derniers, les estimations des profondeurs sont très proches des profondeurs réelles quand on regarde l'erreur relative. Elle présente les ultrasons comme une méthode fiable pour la détermination de la profondeur des défauts.

Ensuite, nous avons cherché à estimer l'épaisseur des défauts. Les résultats apportés ne sont pas très satisfaisants. En effet, l'erreur relative pour le défaut de 25 mm s'élève à 45,1% et au mieux, 78,5 % pour le défaut de 5 mm. L'erreur relative augmente avec l'épaisseur du défaut, ce qui est justement le phénomène inverse qui est attendu. Ceci s'explique par le fait que la différence entre les épaisseurs n'était relativement proches et peu importante par rapport à l'épaisseur de la dalle de 300 mm. La méthode directe utilisée, pour estimer les épaisseurs, est cependant

intéressante. Elle nous donnera des informations intéressantes sur l'ampleur des défauts. L'essai sur des défauts beaucoup plus conséquents est nécessaire.

Enfin, nous avons cherché à détecter les nids d'abeilles. Les nids d'abeilles se manifestent par une baisse de la vitesse des ultrasons par la méthode directe. Leurs surfaces sont grossièrement identifiables mais les diamètres des palpeurs empêchent une trop grande précision. Il est important de prendre en compte le fait que la vitesse des ultrasons est certes ralentie lorsque le palpeur est sur la zone contenant le nid d'abeilles mais que cette diminution n'est pas vraiment conséquente. Le tableau 3.7 présente la baisse relative des vitesses des ultrasons en présence des nids d'abeilles par rapport à celle dans les zones saines du béton.

**Tableau 3.7 Baisse relative des vitesses ultrasonores en présence des nids d'abeilles dans la Dalle 6.**

| | **Béton contenant le nid 10 x 10 x 5 $cm^3$** | **Béton contenant le nid 10 x 5 x 5 $cm^3$** | **Béton contenant le nid 8 x 5 x 2,5 $cm^3$** |
|---|---|---|---|
| **Diminution relative (%)** | 6 | 5,2 | 3,5 |

Les diminutions relatives sont faibles et peuvent sembler négligeable. Cependant, elles indiquent bien les nids d'abeilles car les mesures réalisées aux alentours montrent à chaque fois une augmentation de la vitesse. De plus, on note que la diminution des vitesses des ultrasons est moins importante avec la taille du nid. En effet, le plus petit influence moins le temps de transit que le plus gros.

Les faibles diminutions s'expliquent certainement par deux raisons :

- La dimension des nids
- L'utilisation d'un béton contenant une grande proportion de gros granulats.

Maintenant, nous avons joué sur un autre paramètre des défauts : l'inclinaison. Cette expérience a été concluante. On note une baisse du temps de transit au bout d'une

certaine distance entre les transducteurs. Afin de confirmer que ce phénomène est du au défaut incliné, nous avons aussi pris des mesures similaires mais dans une zone sans défauts de la même dalle pour obtenir une nouvelle courbe. La Figure 3.25 reprend le graphe de la Figure 3.22 mais en superposant les deux courbes. Dans la zone saine, la courbe est bien linéaire indiquant l'absence de défaut. Les deux courbes se superposent parfaitement jusqu'à environ 575 mm de distance entre les deux transducteurs.

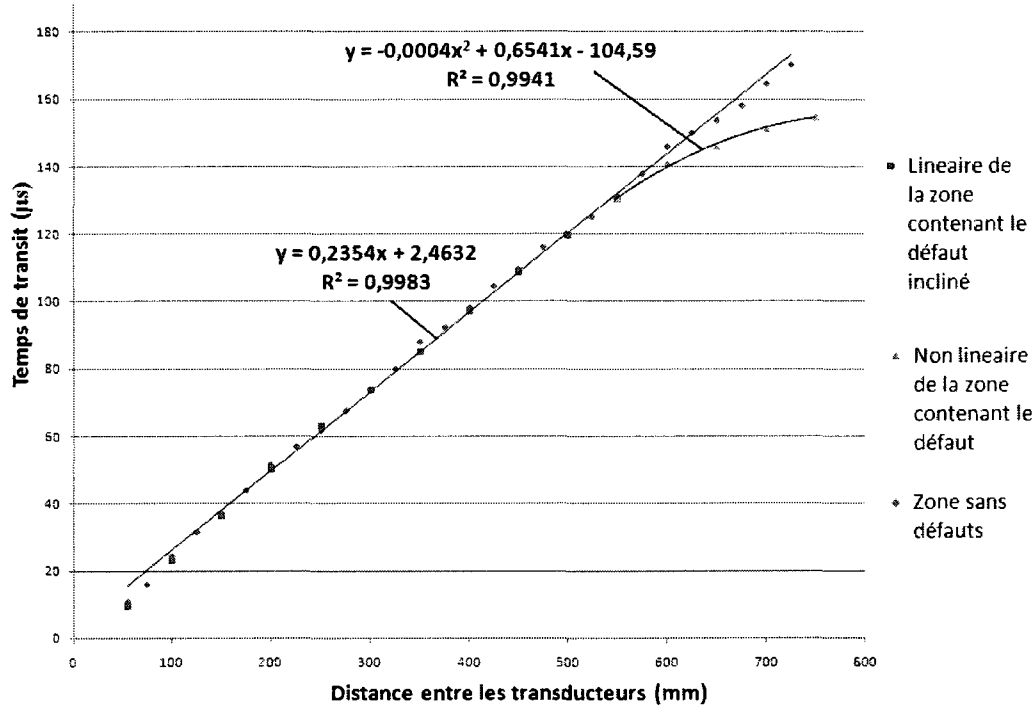



**Figure 3.25 Courbes du temps de transit en fonction de la distance entre les transducteurs dans la zone contenant le défaut incliné et dans une zone sans défaut.**

Après 575 mm, les ultrasons détectent le défaut incliné. Il est intéressant de constater que ce ralentissement de vitesse de transit se fait de façon polynomial. Deux raisons qui s'allient peuvent expliquer ce constat :

- La pénétration en profondeur des ondes avec l'éloignement des transducteurs
- La distance que parcourent les ondes

Enfin la taille des défauts est le dernier paramètre testé avec les ultrasons. Les défauts de dimensions 75 x 75 x 10 mm et 50 x 50 x 10 mm sont détecté par les ultrasons. En effet, la diminution de la vitesse des ultrasons est un indice de leur présence. Comme pour les nids d'abeilles, les faibles épaisseurs des défauts explique que la vitesse est peu influencée par le défaut. Le tableau 3.8 présentent la baisse relative de la vitesse par rapport à celle prise dans les zones saines du béton de 4511 m/s. Là encore, la baisse est faible mais par rapport aux alentours du défaut, où la vitesse est plus grande en s'approchant et même en se confondant avec les valeurs des zones saines.

**Tableau 3.8 Baisse relative des vitesses ultrasonore en présence des différentes tailles de défaut.**

| | **Défaut 75 x 75 x 10 cm** | **Défaut 50 x 50 x 10 cm** | **Défaut 25 x 25 x 10 cm** |
|---|---|---|---|
| **Diminution relative (%)** | 4,1 | 3,5 | 0,6 |

Lorsque le défaut a une surface inférieure à celle du palpeur, en l'occurrence le défaut 25 x 25 x 10 mm, il n'influence pas la vitesse des ultrasons. Ceci s'explique par le fait qu'une partie des ultrasons provenant de l'émetteur va parvenir au récepteur sans même passer par le défaut et ne sera donc pas ralenti comme le schématise la Figure 3.26. Cette analyse semble se confirmer au vu de la diminution relative. En effet, il n'y a pas de différence entre une zone saine et celle avec le défaut.

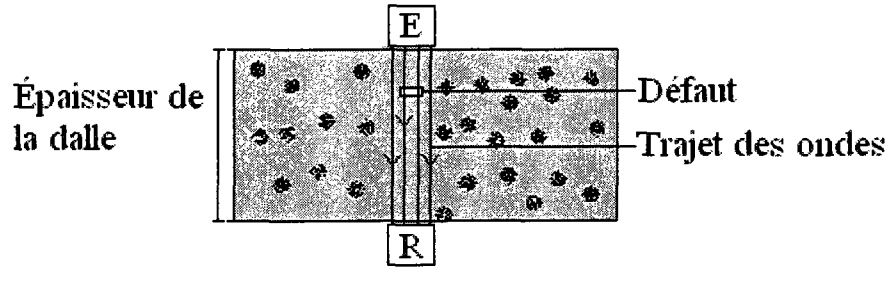



**Figure 3.26 Schématisation du parcours des ondes en présence du défaut de dimensions 25 x 25 x 10 mm**

### 3.3.3 Optimisation des combinaisons et procédure.

Maintenant que nous avons analysé les résultats apportés par le Radar et les ultrasons, il est intéressant et même primordial de combiner ces techniques pour repousser les limites de ces appareillages. Nous avons aussi introduit le marteau de Schmidt car c'est un outil indissociable des ultrasons pour le béton. Cette dernière partie propose ainsi une procédure de diagnostique permettant de tirer un maximum d'informations des appareils utilisés précédemment. Le tableau 3.9 présente ainsi les limites des différents appareillages.

**Tableau 3.9 Limites estimées du Radar, des ultrasons et du marteau de Schmidt**

| | **RADAR** | | |
|---|---|---|---|
| | **Phénomènes observés** | **Observations/Analyses** | **Limites** |
| **ARMATURES** | Proximité des armatures | Les Armatures proches à une distance inférieure à 2'' sont confondues | Limite de détection des armatures : 2'' |
| | Armature inclinée | Visible et retraçable en profondeur | |
| | Distance entre les armatures sur un radargramme | Echelle indiquée sur les radargramme | Distance précise ±0,5'' |
| | Profondeur des armatures | Visibles peu importe la profondeur dans la dalle. | |
| | Diamètre des armatures | Reconnaissance des différentes tailles, estimation relative possible | Estimations des diamètres très difficile. |
| **CONDUITS PVC** | Détection conduits PVC | Réflexion moindre par rapport aux armatures | Profondeur du conduit |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **CONDUITS PVC** | Inclinaison conduit PVC | Difficilement visible | Expérience de la personne exploitant les radargrammes. |
| **CONDUIT ACIER** | Conduit acier | Visible sur la coupe transversale | Utilisation d'un balayage de surface nécessaire. |
| **DÉFAUTS** | Profondeur des défauts | Défauts visibles à toutes les profondeurs mais les réflexions s'atténuent avec la profondeur. | Défauts situés à une profondeur de 4'' sous une armature n'est pas visible |
| | Épaisseur des défauts | Le défaut de 5 mm d'épaisseur non visible. | **Défauts d'épaisseur inférieure à 10 mm ne sont pas visibles.** |
| | Inclinaison des défauts | Beaucoup plus visibles quand ils sont horizontaux | **Les défauts inclinés à 45° sont quasi-invisibles** |
| | Taille des défauts | Le défaut de dimensions 25 x 25 x 10 mm n'est pas détecté. | Les défauts inférieurs à 50 x 50 mm ne sont pas visibles. |
| **NIDS D'ABEILLES** | Détection des nids d'abeilles | **Non détectés** | |

| | ULTRASONS | | |
|---|---|---|---|
| | **Phénomènes observés** | **Observations/Analyses** | **Limites** |
| **DÉFAUTS** | Profondeur des défauts | Détermination de la profondeur de deux défauts situés à 95 mm en dessous de la surface de la dalle. Très Bonne précision. | Profondeur trop grande des défauts nécessitant une distance entre les transducteurs importante. |
| | Épaisseur des défauts | Défauts visibles mais mauvaises estimations des profondeurs mais indice intéressant à exploiter. | |
| | Inclinaison des défauts | Détection du défaut placé le plus proche de la surface. | Pas d'estimation d'angle possible et la profondeur du défaut est un facteur limitant. |
| | Taille des défauts | Le défaut de dimensions 25 x 25 x 10 mm n'est pas détecté. | Les défauts inférieurs à 50 x 50 mm ne sont pas visibles. |
| **NIDS D'ABEILLES** | Détection des nids d'abeilles | Les trois nids d'abeilles sont détectés. Les indices de présences sont légers mais pertinents. | Type de béton et taille du nid d'abeilles inférieure au diamètre du palpeur. |

| | MARTEAU DE SCHMIDT | | |
|---|---|---|---|
| | **Phénomènes observés** | **Observations/Analyses** | **Limites** |
| **DÉFAUTS** | Détection des défauts | Indice de la présence des défauts les plus proches de la surface, même s'ils sont inclinés, à 150 mm de profondeur. | Défauts plus profond que 150 mm ne sont pas détectés. |

Ainsi, à partir du tableau, différentes constatations sont à noter. Le Radar permet de réaliser une approche grossière d'une structure en béton. Les ultrasons pour aller chercher des informations avec plus de précisions. Afin de bien compléter les informations, une procédure de diagnostique doit être adoptée. Voici les différentes étapes proposées pour une analyse :

1. Repérer les zones d'intérêt d'une structure à diagnostiquer. C'est-à-dire où le béton peut se détériorer plus facilement ; par des sollicitations extérieures, par des zones contenant des concentrations de contraintes, par des zones où l'eau s'accumule qui sont traités de manière privilégiée.

2. Obtenir ou rechercher un maximum d'informations sur le type de béton, la taille des granulats et toute autre information importante pour l'analyse.

3. Établir ensuite des lieux d'auscultation répartis équitablement sur la structure, en adaptant cela à la taille bien évidemment.

4. Passer en premier des balayages au Radar dans cette zone pour avoir un aperçu global de l'intérieur de la structure. Ensuite, une exploitation des radargrammes est nécessaire pour savoir si des défauts grossiers comme des vides sont présents.

5. Réaliser équitablement des rebonds sur les zones balayées par le Radar et plus particulièrement où des vides sont suspectés si elles ne sont pas incluses.

6. Exploiter les données apportées par le marteau de Schmidt pour rechercher à confirmer la présence de défauts proches de la surface ou pour rechercher des défauts non vus par le Radar.

7. Réaliser maintenant une analyse par les ultrasons en réalisant des essais répartis aussi régulièrement. Revenir sur des essais supplémentaires où le marteau a donné des indices pour la présence de nids d'abeilles, de vides inclinés où d'autres défauts et sur ce qu'a repéré le Radar. Déterminer la profondeur des défauts par la méthode indirecte et évaluer l'ampleur des défauts repérés par la méthode directe. Pour les zones proches des bords d'une structure, la méthode semi-directe est à utiliser aussi.

8. Tirer les conclusions des différents essais et des différentes mesures afin d'estimer l'ampleur des détériorations et de décider si d'autres essais avec d'autres outils ont leur importance.

# CONCLUSION

Les essais non destructifs sur le béton son divers et variés mais restent encore méconnus. Nous avons retenu deux grandes méthodes non destructives : Le Radar et les ultrasons. L'objectif de cette étude était de réaliser une investigation sur les limites de ces méthodes. Pour ce faire, six dalles en béton de dimensions 1 m x 1m x 0,3 m ont été conçues puis fabriquées avec pour chacune d'entre elles une configuration différente. Les quatre premières contiennent des armatures et des conduits disposés de différentes manière afin d'en tirer des limites de détection du Radar. Les deux dernières contiennent des simulations de discontinuités de type vides et nids d'abeilles de différentes dimensions à différentes profondeurs et à différentes localisations. Toutes les dalles sont alors balayées au Radar. Ensuite, les endroits spécifiques des défauts sont auscultés par les ultrasons et le marteau de Schmidt.

Ces recherches ont permis de dégager de nombreuses conclusions et limites en premier sur le Radar. Voici les principales :

1. Le Radar permet de distinguer les armatures entre elles dans la mesure où elles sont espacées d'une distance de 2″.
2. Le Radar permet de suivre une armature avec la profondeur, jusqu'à environ 12″.
3. La résolution nous permet de déterminer les distances entre les armatures de l'ordre de ± 0,5″.
4. La présence d'armatures superposées est visible mais nécessite un gain élevé au niveau du traitement du signal.
5. L'estimation des diamètres d'armatures est très difficile mais une estimation relative est pertinente.
6. Les conduits en PVC sont détectables qu'ils soient inclinés ou pas ; mais reste difficile en profondeur, cela fait surtout appel à l'expérience de l'opérateur. Un balayage de surface est recommandé.

7. Le conduit en acier est facilement détectable mais là aussi, un balayage de surface est souhaitable.
8. Les défauts d'épaisseur inférieure à 5 mm ne sont pas visibles.
9. Les défauts situés en profondeur sous une armature ne sont pas visibles.
10. Les défauts inclinés sont beaucoup plus difficile à détecter mais le Radar donne des indices sur leurs présences, à confirmer avec d'autres outils.

Maintenant, voici les principales conclusions sur les limites apportées par les ultrasons et le marteau de Schmidt :

1. L'estimation de la profondeur des défauts est très précise mais nécessite de grandes distances entre les émetteurs par la méthode indirecte.
2. L'épaisseur est difficilement estimable mais une estimation de l'ampleur des défauts par la méthode directe est très pertinente.
3. Les nids d'abeilles sont détectables et quantifiables lorsqu'ils sont d'une dimension supérieure au diamètre du palpeur : 50 mm.
4. Les défauts inclinés sont détectables et la direction de l'inclinaison est repérable par les ultrasons et par le marteau de Schmidt. Cependant, cela ne donne pas d'indication sur l'angle d'inclinaison.
5. Les défauts de dimensions inférieures au palpeur ne sont pas détectables.

Ainsi, les différents appareils sur lesquels a porté notre investigation permettent de donner beaucoup d'informations sur la structure interne du béton. Il est essentiel d'allier ces techniques entre elles car elles s'avèrent très complémentaires afin d'établir un diagnostique assez précis. Il est important de noter qu'en fonction des limites, une procédure ordonnée et logique est nécessaire.

L'investigation sur les limites devrait être approfondie en réalisant des expériences sur des nids d'abeilles et des défauts beaucoup plus conséquents. Le passage de courant électriques ou d'eau dans les conduits serait aussi intéressant pour le contrôle par Radar.

# RÉFÉRENCES


- [1] F. Buyle-Bodin, "Étude exploratoire sur le développement d'outils de diagnostic," colloque CEFRACOR, Diagnostic des ouvrages en béton armé : États – Méthodes – Prévisions du vieillissement, Saint-Rémy-lès-Chevreuse, pp. 109-116, 1998.

- [2] A. Giannopoulos, P. Macintyre, S. Rodgers et MC. Forde, "GPR detection of voids in post-tensioned concrete bridge beams." International conference on ground penetrating radar, no. 9, États-Unis, vol. 4758, 2002, pp. 376-381

- [3] V.M. Malhotra, et N.J. Carino, "Handbook on nondestructive testing of concrete", second edition, CRS PRESS, ISBN 084932984 1, CRS PRESS16-17.

- [4] N. Bilgutay, J. Popovics, S. Popovics et M. Karaoguz, "Recent developments in concrete nondestructive evaluation". Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference, ISBN: 0-7803-7041-4. vol. 6, 2001, pp. 3393-3396.

- [5] Association française de normalisation, "Béton - Partie 1: spécification, performances, production et conformité," Association française de normalisation NF EN 206-1, 2004.

- [6] International Atomic Energy Agency, "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures," IAEA–TCS–17, ISSN 1018–5518, 2002, pp. 3-5.

- [7] American Concrete Institute, "Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete," ACI 211.2-91, 1998.

- [8] International Atomic Energy Agency, "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures," IAEA–TCS–17, ISSN 1018–5518, 2002, p. 6.

- [9] J. Perchat, "Béton armé – Généralités," C 2 301, Paris: Techniques de l'ingénieur, 1992, pp. 1-12. [Livre électronique]. Disponible: Techniques de l'ingénieur.

- [10] R. Chaussin, "Béton précontraint," C2360, Paris: Techniques de l'ingénieur, 1990, pp. 1-6. [Livre électronique]. Disponible: Techniques de l'ingénieur.

- [11] Portland Ciment Association, "Concrete Slab Surface Defects: Causes, Prevention, Repair," What causes concrete to crack?, [En ligne]. Disponible : http://www.cement.org/tech/faq_cracking.asp [consulté le 4 mars 2008]

- [12] Howard M. Kanare, "Concrete Floors and Moisture," 2nd Edition, Portland Cement Association et National Ready Mixed Concrete Association, 2008, pp. 65-73.

- [13] J. Detwiler, "Specifier's Guide to Durable Concrete," Portland Cement Association, 2005, pp. 1-30.

- [14] S.H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W.C.Panaress, N.F. Macleod, et R.J. Mcgrath, "Dosage et contrôle des mélanges de béton," 7e édition canadienne, Association canadienne du ciment, 2004, p. 355

- [15] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, "Concrete Laboratory Project Reports 0001 NC Summary Report," [En ligne]. Disponible : http://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/mcl0001.cfm, [consulté le 13 mai 2008].

- [16] International Atomic Energy Agency, "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures," IAEA–TCS–17, ISSN 1018–5518, 2002, p. 10-12.

- [17] G. I. Crawford, "Guide to nondestructive testing of concrete," Rapport no. FHWA-SA-97-105, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1997, p. 1.
- [18] American Society for Testing and Materials, "Factors influencing concrete workability", in Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, J. F. Lamond, & J. H. Pielert, 2006, pp. 49-65.
- [19] American Society for Testing and Materials, "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens," American Society for Testing and Materials, ASTM C 882, 2008.
- [20] Domaine public, "Concrete compression testing," in encyclopedia of Wikipedia, 2007, [En ligne]. Disponible: http://en.wikipedia.org/wiki/File: Concrete _ Compression_Testing.jpg. [Consulté le 19 mai 2008].
- [21] American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)," American Society for Testing and Materials, ASTM C78, 2008.
- [22] American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)," American Society for Testing and Materials, ASTM C293, 2008.
- [23] National Ready Mixed Concrete Association, "Flexural Strength Concrete," 2000. [En ligne]. Disponible: http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/16p.pdf. [Consulté le 18 juin 2008].
- [24] American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete," American Society for Testing and Materials, ASTM C42, 2008.

- [25] Allcity sawing, "Core drilling", 2003. [En ligne]. Disponible : http://allcitysawing.com.au/core_drilling.htm. [consulté le 3 mars 2009]

- [26] American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete," American Society for Testing and Materials, ASTM C803, 2009.

- [27] American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete," American Society for Testing and Materials, ASTM C900, 2008.

- [28] V.M. Malhotra, and G. Carette. "Comparison of pullout strength of concrete with compressive strength of cylinders and cores, pulse velocity and rebound hammer," Canmet Report 76-8, 1975.

- [29] V.M. Malhotra, "Testing hardened concrete: nondestructive methods," Amer, Concrete Institute, Monograph No. 9, 1976.

- [30] International Atomic Energy Agency, "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures," IAEA–TCS–17, ISSN 1018–5518, 2002, pp. 44-55.

- [31] V. M. Malhotra et G. G. Carette, "Penetration resistance methods," Handbook on nondestructive testing of concrete, no. 2, pp. 1-16.

- [32] N. J. Carino. "non destructive test methods," in Concrete Construction Engineering Handbook, 2$^{e}$ éd., E.G. Nawy, 2008, pp.1-63.

- [33] American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)," American Society for Testing and Materials, ASTM C1583 / C1583M, 2008.

- [34] American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete," American Society for Testing and Materials. ASTM C 597, 2008.

- [35] J. J. Daniels, "Ground penetrating Radar Fundamentals," Department of Geological Sciences, The Ohio State University, appendix to a report to the U.S.EPA, Region V, pp. 1-18, 2000.

- [36] J.H. Bungey, "Sub-surface radar testing of concrete: a review", Construction and bulding materials, vol. 18, no. 1, pp. 1-8, 2004.

- [37] International Atomic Energy Agency, "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures," IAEA–TCS–17, ISSN 1018–5518, 2002, pp. 137-151.

- [38] J.-P. Balayssac, V. Kringkaï, G. Klysz, S. Laurens et G. Arliguie, "Contribution au développement du radar pour la caractérisation non destructive du béton," Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, INSA Toulouse, 25e rencontres de L'AUGC, Bordeaux, 23-25 mai 2007. [En ligne]. Disponible : http://www.iut.u-bordeaux1.fr/gc/augc07/index/pdf/MBP/Balayssac.pdf. [Consulté le 18 août 2008].

- [39] Concrete Society, "Factors affecting interpretation" in Guidance on radar testing of concrete structures," ISBN 9780946691616, 1997, Tech. Rep. 48, pp. 20-21.

- [40] J. H. Bungey et S. G. Millard, "Detecting Sub-Surface Features in Concrete by Impulse Radar," in non destructive testing and evaluation, vol. 12, no. 1, 1993, pp. 33–51.

- [41] D. François, "Les endommagements des matériaux" in Endommagements et rupture de matériaux, EDP Science, 2004, pp. 1-34.

- [42] J. Popovics, S. Joseph et L. Rose, "A survey of developments in ultrasonic NDE of concrete," IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, vol. 41, no. 1, pp. 140-144, 1994, [En ligne]. Disponible: IEEE Xplore, http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=00265832. [Consulté le 12 septembre 2008].

- [43] P. Turgut et O. F. Kucuk, "Comparative Relationships of Direct, Indirect, and Semi-Direct Ultrasonic Pulse Velocity Measurements in Concrete," Russian Journal of Nondestructive Testing, vol. 42, no. 11, pp. 745-751, 2006.

- [44] International Atomic Energy Agency, "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures," IAEA–TCS–17, ISSN 1018–5518, 2002, pp. 100-128.

- [45] M. Krause, C. Maierhofer et H. Wiggenhauser, "Comparaison of pulse-echo methods for testing concrete," NDT&E International, vol. 30, No. 4, pp. 195-204, 1997.

- [46] Proceq Inc., "Ultrasonic instrument," Proceq Inc, Reisbachstrasse 57, CH-8034, Zürich, Switzerland, 2001 [En ligne]. Disponible: http://adattar.atestor.hu:81/epito/tico_e.pdf. [Consulté le 25 septembre 2008].

- [47] James instruments Inc., "V-Meter Mark III Instruction manual", James instruments Inc, 3727 North Kedzie Avenue, Chicago, Illinois 60618, USA, 2005.

- [48] M. J. Sansalone et B. W. Streett, "The impact-echo method," in NDRnet, vol. 3, no. 2, 1998. [En ligne]. Disponible: http://www.ndt.net/article/0298/streett/streett.htm. [Consulté le 2 novembre 2008].

- [49] N. J. Carino, "The impact-echo method: an overview," 2001 Structures Congress & Exposition, Washington, D.C., 2001. [En ligne]. Disponible: http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/build01/PDF/b01005.pdf. [Consulté le 2 novembre 2008].

- [50] N. K. Choudhari, A.Kumar, Y. Kumar et R.Gupta, "Evaluation of elastic moduli of concrete by ultrasonic velocity," National Seminar of ISNT Chennai, 2002. [En ligne]. Disponible: http://www.qnetworld.de/nde2002/ papers/029P.pdf

- [51] A. Samarin, "combined methods" in Handbook on nondestructive testing of concrete, second edition, V.M. Malhotra et N.J. Carino, 2004, pp. 1-12.

- [52] Proceq Inc., (2006) "Concrete test Hammer," Proceq Inc, Reisbachstrasse 57, CH-8034, Zürich, Switzerland, 2001. [En ligne]. Disponible: http://www.proceq.com/fileadmin/documents/proceq/products/Concrete/Digi-Schmidt/English/Proce_Brochure_Digi-Schmidt_E.pdf

- [53] Rilem, "Draft recommendation for in situ concrete strength determination by combined non-destructive methods," Material and structures, vol. 26, p. 43-49, 1993.

- [54] R. Pucinotti, "The use of multiple combined non destructive testing in the concrete strength assessment: applications on laboratory specimens," ndt.net, 2007. [En ligne]. Disponible : http://www.ndt.net/article/hsndt2007/files/Pucinotti.pdf. [Consulté le 6 janvier 2009].

- [55] M. Sutan et S.Jaafar, "Evaluating of efficiency of nondestructive detection of flaws in concrete," Russian journal of nondestructive testing, vol. 39, no. 2, pp. 87-93, 2003.

# ANNEXES

## Annexe A : Mise en plan des dalles expérimentales.

**Tableau A.1 Mise en plan de la Dalle 1.**

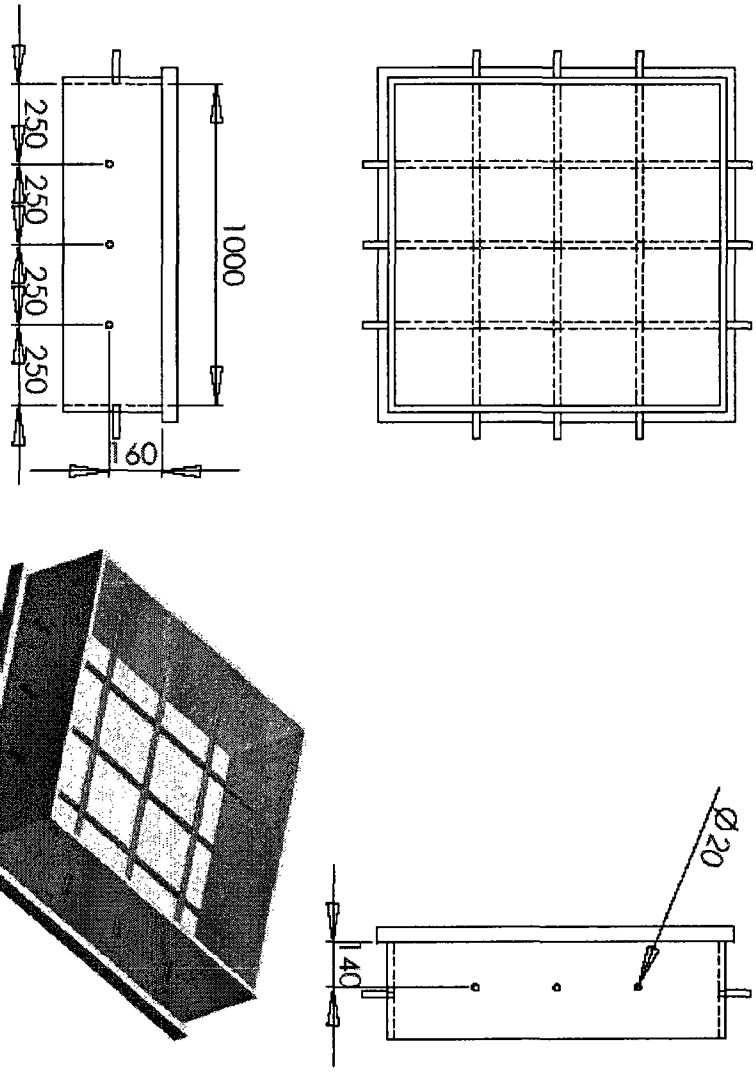
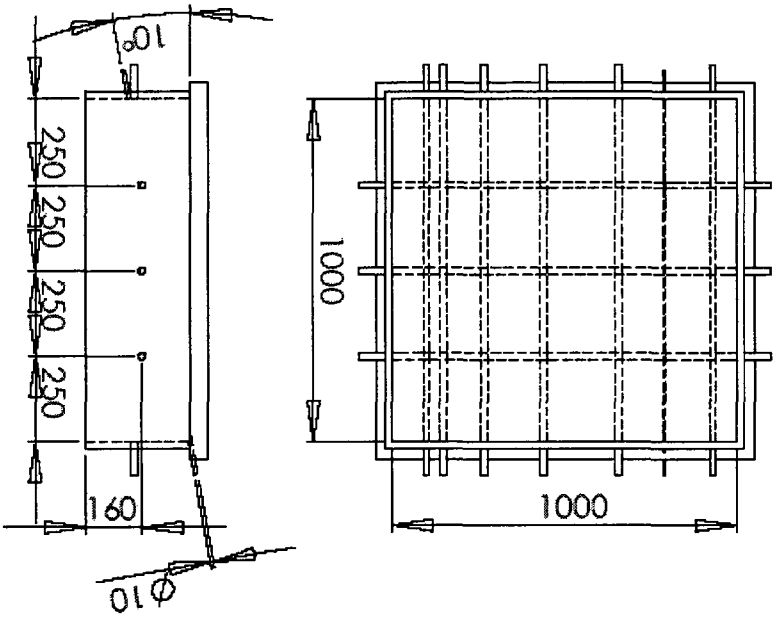


**Tableau A.2 Mise en plan de la Dalle 2.**



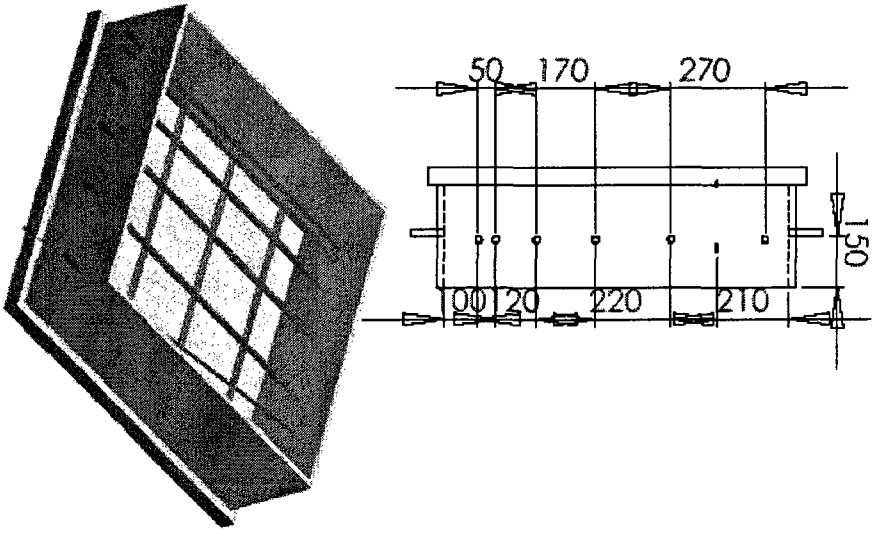
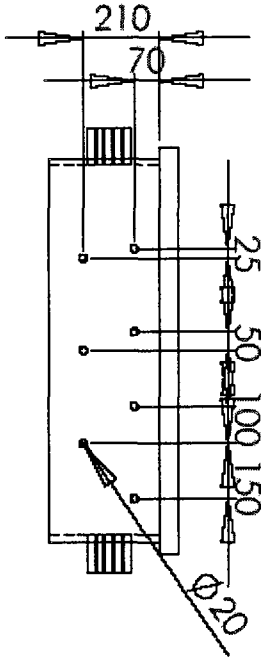
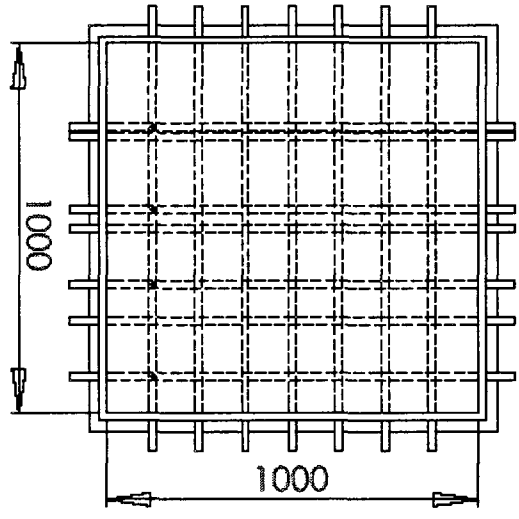
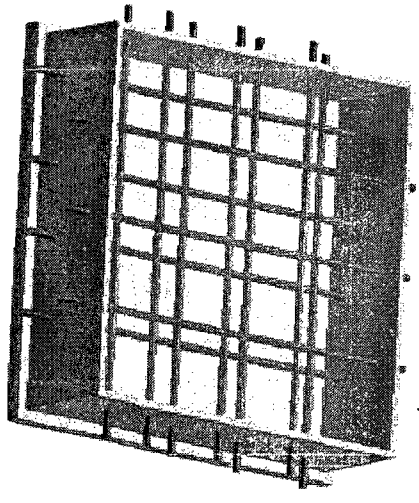



**Tableau A.3 Mise en plan de la Dalle 3.**



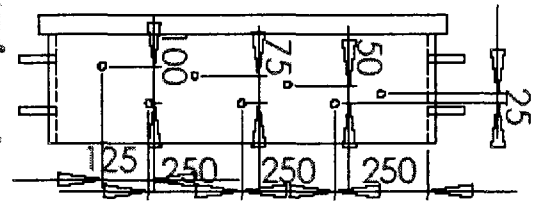


**Tableau A.4 Mise en plan de la Dalle 4.**

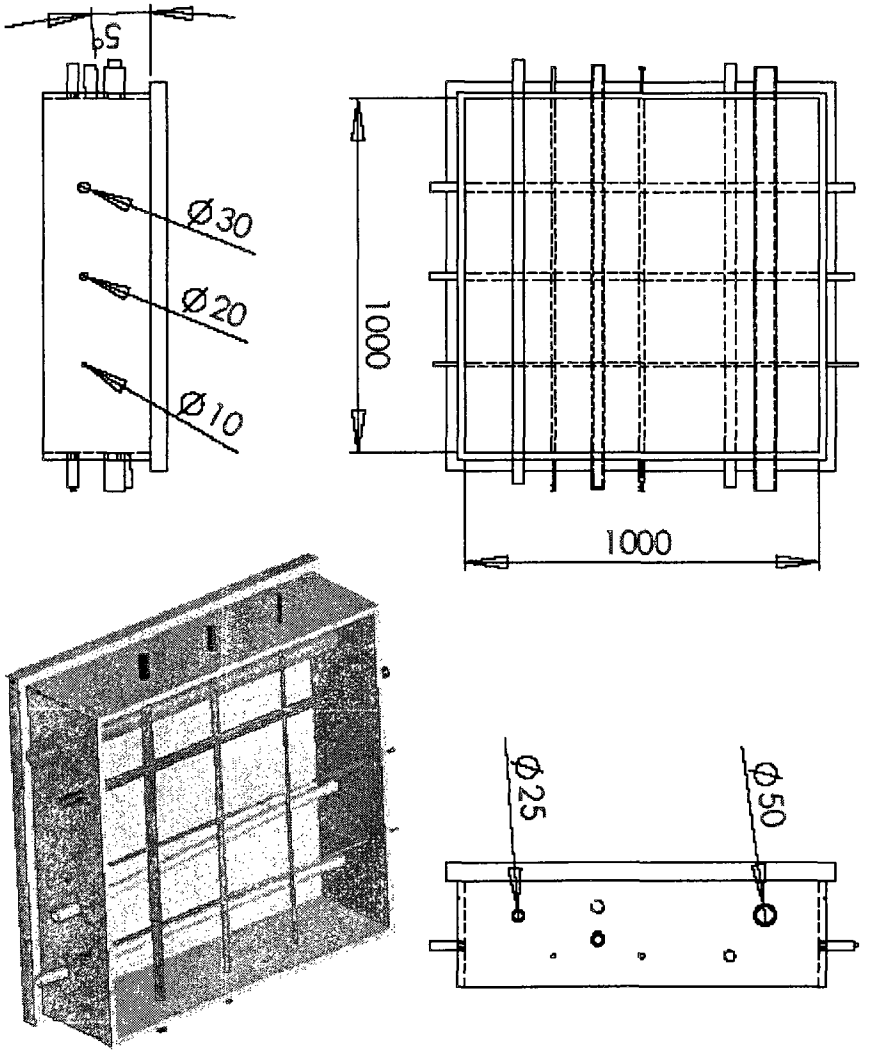


**Tableau A.5 Mise en plan de la Dalle 5.**

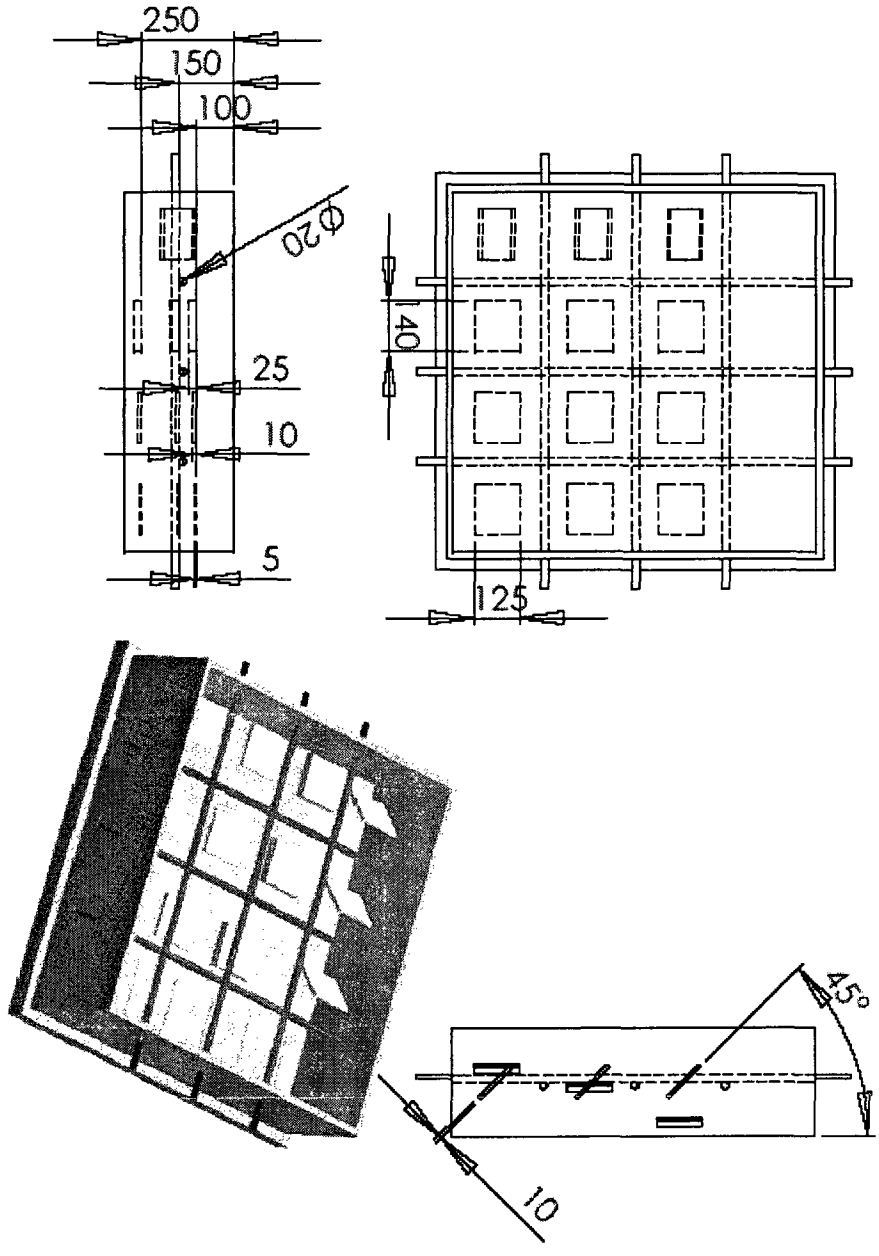
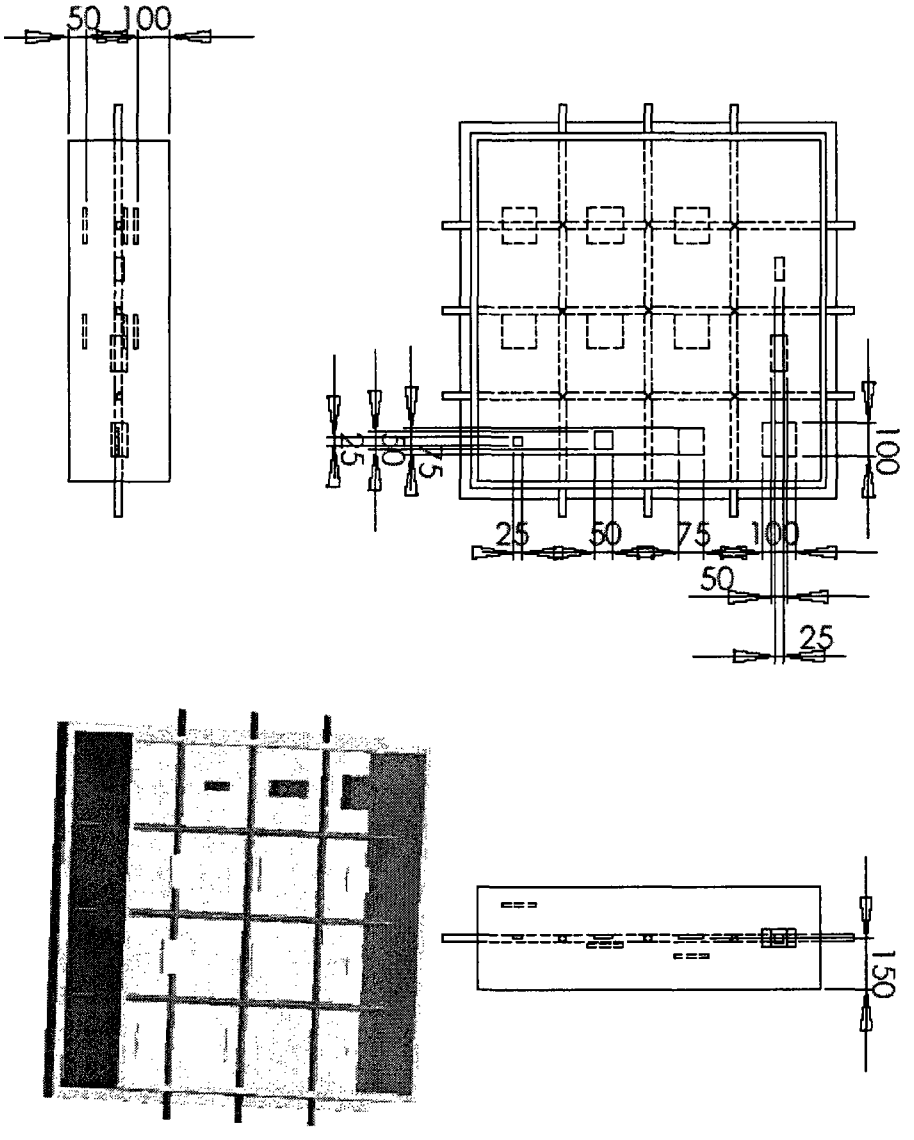


**Tableau A.6 Mise en plan de la Dalle 6.**



# Annexe B : Résultats des calculs pour la détermination de la profondeur des défauts.

**Tableau B.1 Mesures des temps de transit des ultrasons entre l'émetteur et le récepteur en fonction de la distance par la mesure ultrasonore indirecte pour la détermination de défauts de la dalle 6 situés à 95 mm de profondeur.**

| *Distance (mm)* | *Temps de transit (µs)* | |
|---|---|---|
| | **Premier défaut** | **Deuxième défaut** |
| 55 | 13,2 | 12,7 |
| 100 | 26,9 | 25,6 |
| 150 | 39,2 | 39,1 |
| 200 | 52,6 | 54,5 |
| 250 | 64,3 | 66,6 |
| 300 | 77,5 | 81,2 |
| 350 | 90,4 | 95,2 |
| 400 | 102,6 | 109,1 |
| 450 | 114,7 | 123,0 |
| 500 | 125,6 | 136,0 |
| 550 | 135,3 | 146,6 |
| 600 | 144,6 | 158,2 |
| 650 | 153,8 | 166,7 |
| 700 | 164,9 | 180,3 |

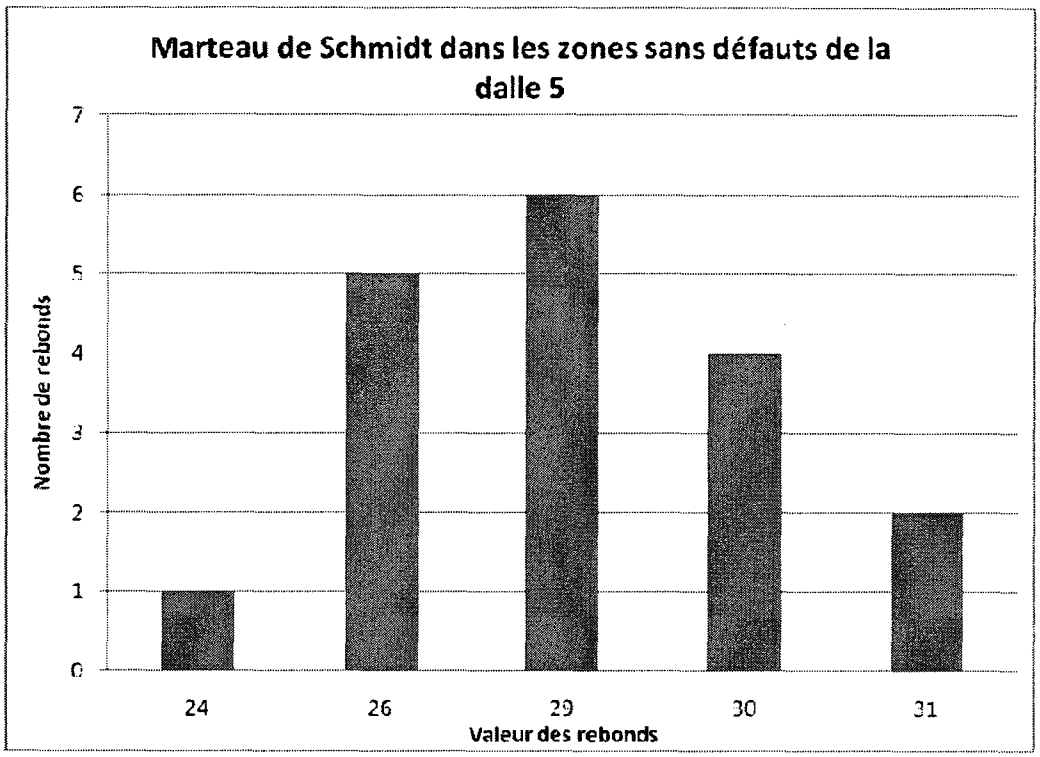
# Annexe C : Résultats du Marteau de Schmidt.

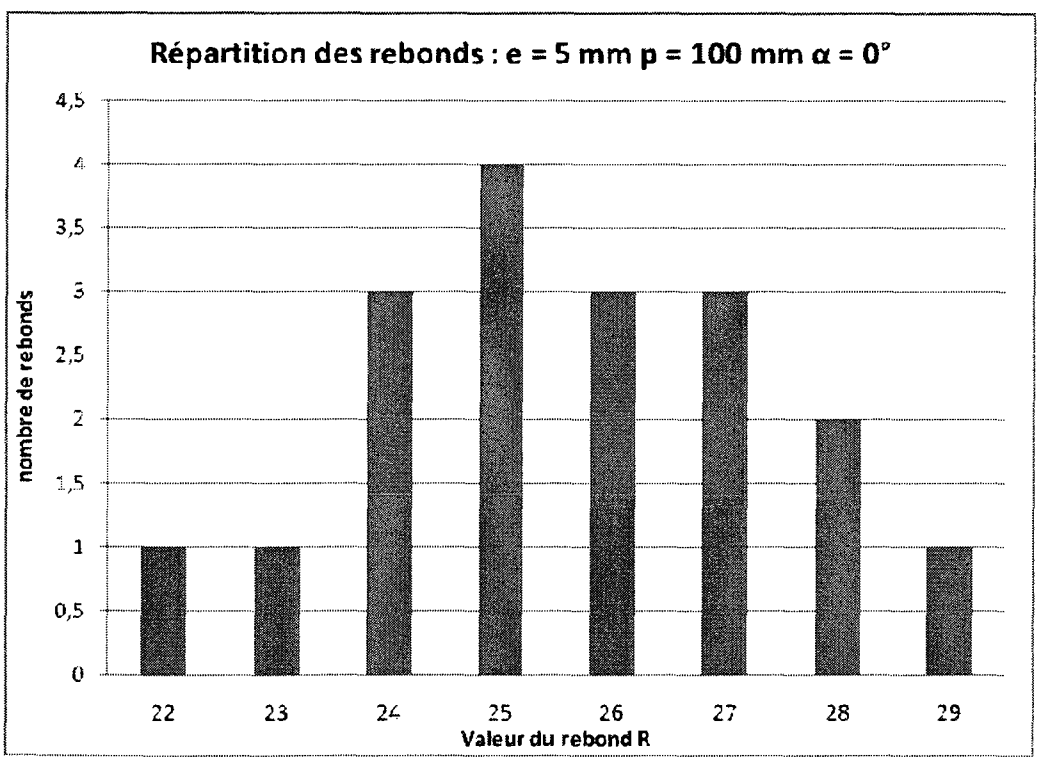
**Tableau C.1 Valeur des rebonds obtenus sur la Dalle 5 au niveau des défauts.**

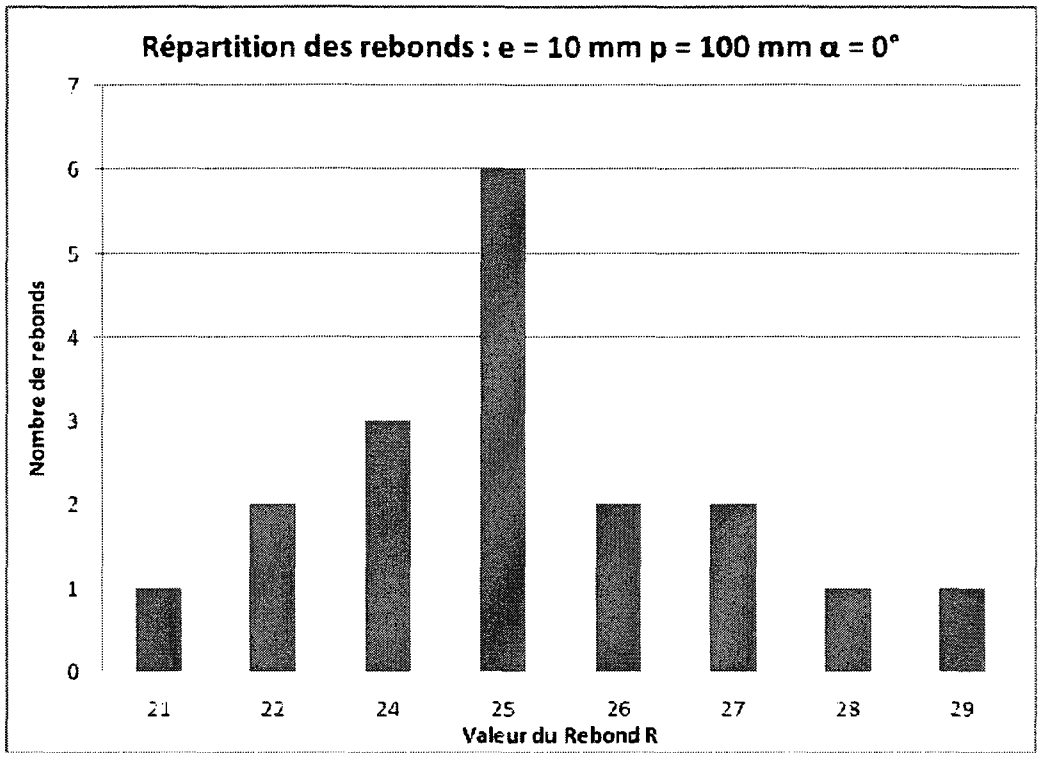
| | e = 5 mm p = 100 mm α = 0° | e = 10 mm p = 100 mm α = 0° | e = 25 mm p = 100 mm α = 0° | e = 5 mm p = 150 mm α = 0° | e = 10 mm p = 150 mm α = 0° | e = 25 mm p = 150 mm α = 0° |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Valeur des Rebonds R donné par le Marteau de Schmidt | 22 | 25 | 22 | 26 | 27 | 25 |
| | 29 | 26 | 23 | 26 | 26 | 28 |
| | 25 | 26 | 21 | 27 | 24 | 26 |
| | 23 | 29 | 28 | 28 | 28 | 29 |
| | 28 | 24 | 22 | 29 | 23 | 30 |
| | 28 | 22 | 26 | 28 | 23 | 31 |
| | 27 | 21 | 23 | 27 | 24 | 29 |
| | 24 | 25 | 20 | 21 | 25 | 28 |
| | 26 | 25 | 19 | 24 | 29 | 28 |
| | 27 | 24 | 21 | 22 | 25 | 28 |
| | 25 | 27 | 23 | 24 | 20 | 26 |
| | 24 | 28 | 23 | 25 | 23 | 29 |
| | 26 | 25 | 22 | 26 | 20 | 32 |
| | 25 | 27 | 26 | 27 | 16 | 31 |
| | 27 | 25 | 22 | 27 | 24 | 29 |
| | 26 | 25 | 26 | 26 | 23 | 28 |
| | 25 | 22 | 23 | 25 | 25 | 26 |
| | 24 | 24 | 23 | 26 | 24 | 25 |
| | | | | | | |
| **Moyenne** | **25,61** | **25,00** | **22,94** | **25,78** | **23,83** | **28,22** |
| **Ecart-type** | **1,85** | **2,06** | **2,29** | **2,05** | **3,03** | **2,05** |

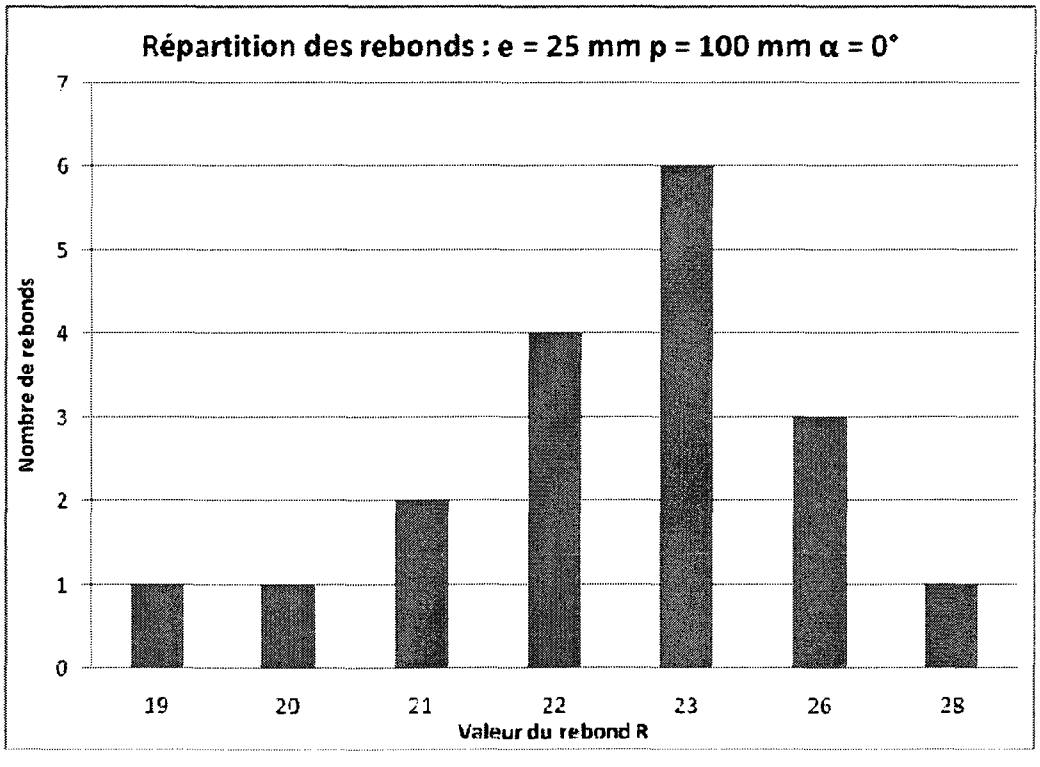
| | e = 10 mm p = 250 mm α = 0° | e = 25 mm p = 250 mm α = 0° | e = 10 mm p = 100 mm α = 45° | e = 10 mm p = 150 mm α = 45° | e = 10 mm p = 250 mm α = 45° | Zone sans Défauts |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Valeur des Rebonds R donné par le Marteau de Schmidt | 31 | 28 | 26 | 26 | 24 | **30** |
| | 32 | 28 | 27 | 27 | 26 | **29** |
| | 30 | 29 | 23 | 27 | 26 | **29** |
| | 29 | 30 | 24 | 30 | 29 | **26** |
| | 29 | 31 | 25 | 25 | 29 | **24** |
| | 28 | 30 | 26 | 24 | 31 | **26** |
| | 25 | 26 | 26 | 27 | 30 | **26** |
| | 26 | 28 | 28 | 28 | 30 | **31** |
| | 28 | 29 | 27 | 28 | 30 | **30** |
| | 27 | 24 | 25 | 28 | 29 | **29** |
| | 30 | 25 | 25 | 25 | 30 | **31** |
| | 30 | 26 | 25 | 26 | 26 | **30** |
| | 30 | 26 | 21 | 27 | 24 | **26** |
| | 29 | 28 | 22 | 26 | 30 | **26** |
| | 28 | 28 | 26 | 28 | 29 | **29** |
| | 29 | 29 | 25 | 27 | 26 | **29** |
| | 31 | 26 | 27 | 26 | 29 | **30** |
| | 29 | 28 | 24 | 30 | 29 | **29** |
| | | | | | | |
| **Moyenne** | **28,94** | **27,72** | **25,11** | **26,94** | **28,17** | **28,33** |
| **Ecart-type** | **1,76** | **1,87** | **1,81** | **1,59** | **2,20** | **2,09** |

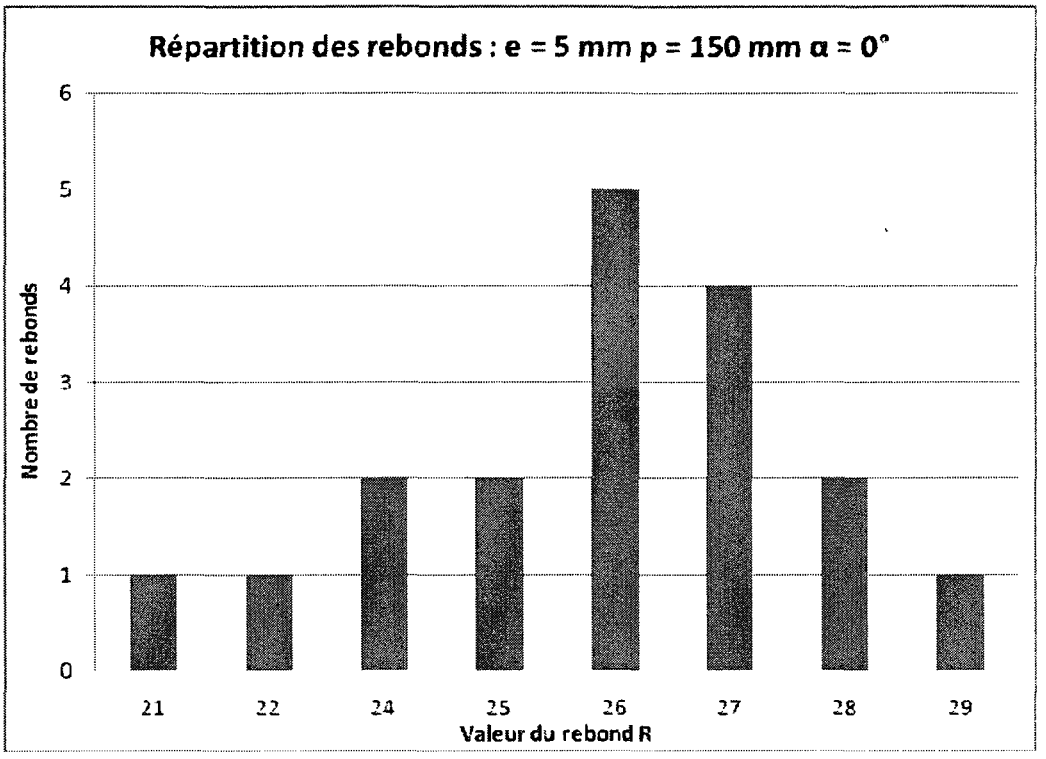
**Tableau C.2 Répartition graphique des valeurs des rebonds sur la Dalle 5**

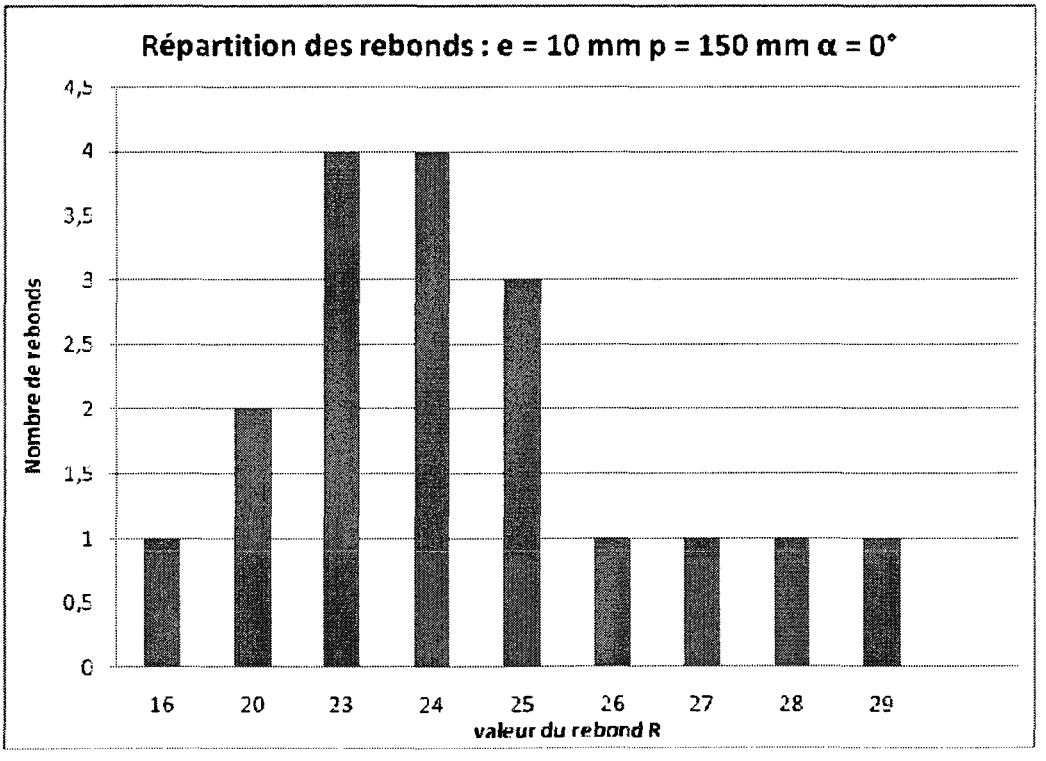


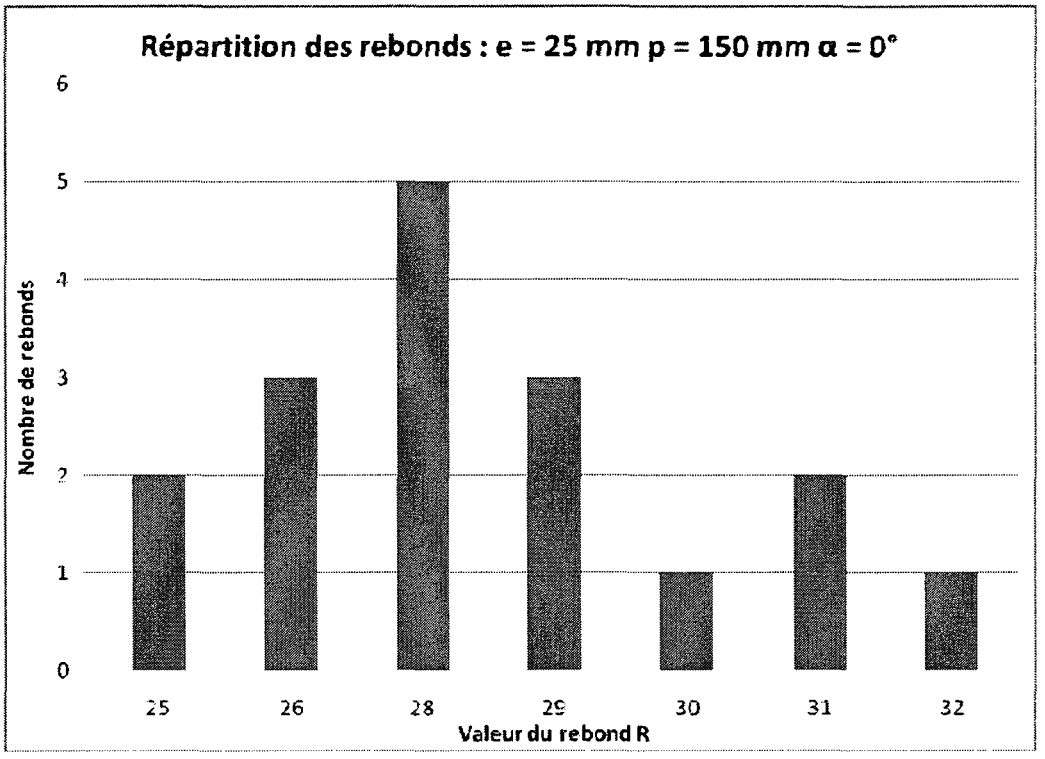



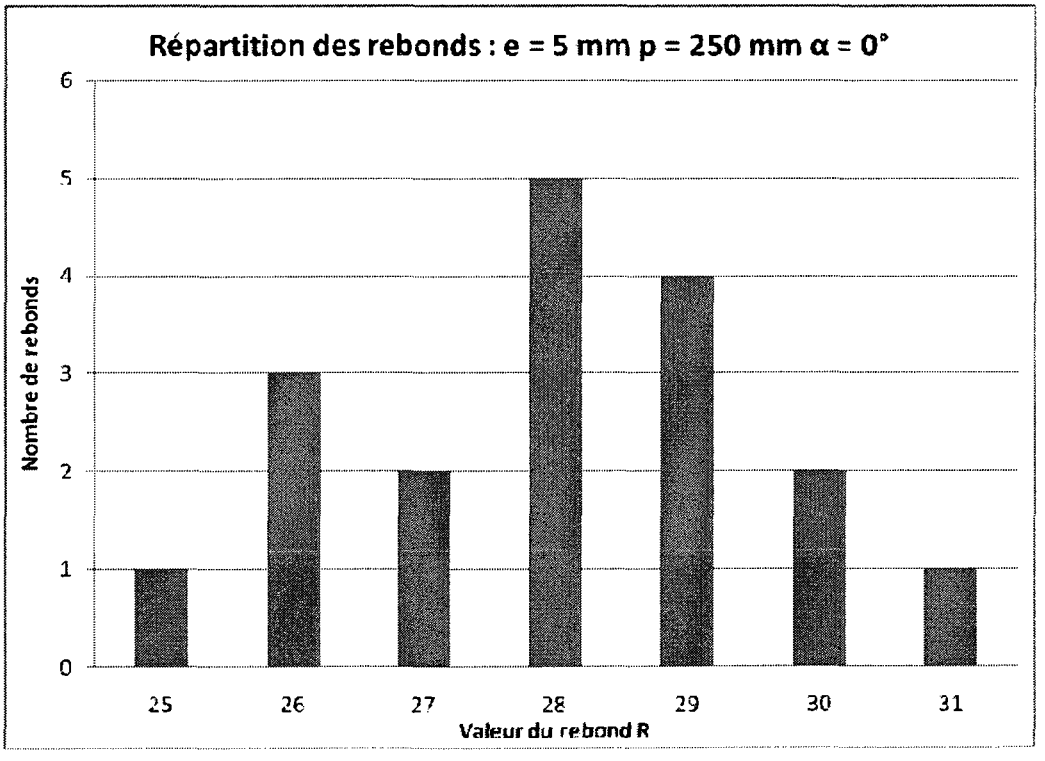

Répartition des rebonds : e = 10 mm p = 100 mm α = 0°
Nombre de rebonds
0
1
2
3
4
5
6
7
21
22
24
25
26
27
28
29
Valeur du Rebond R

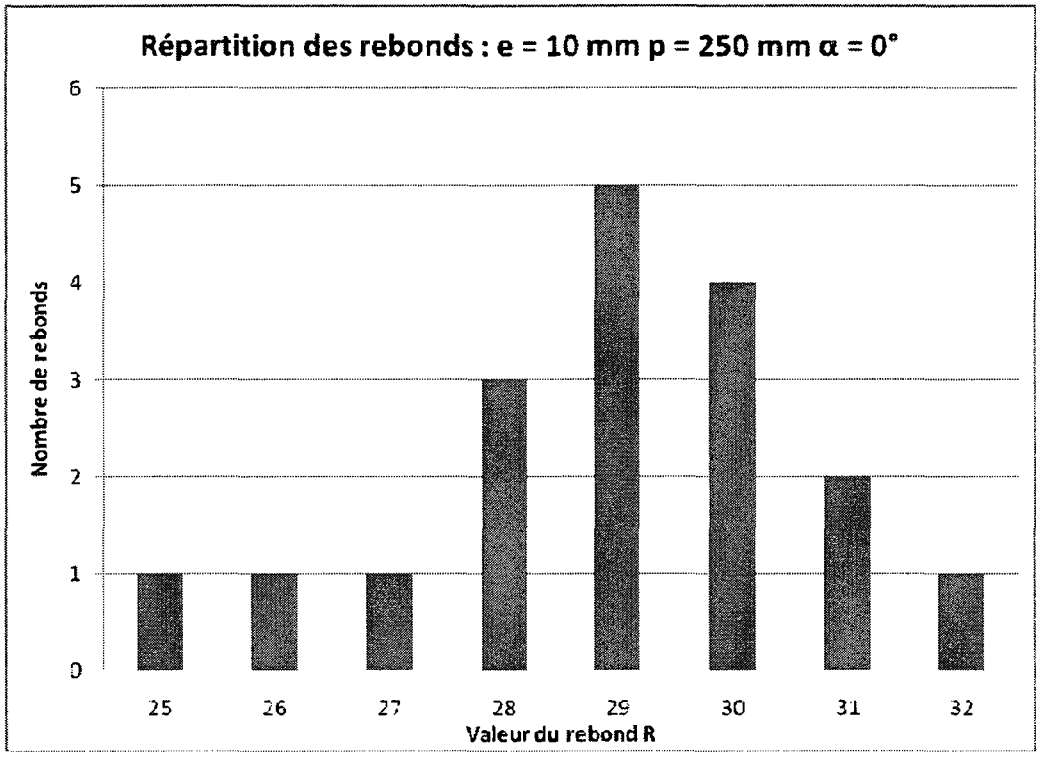

Répartition des rebonds : e = 25 mm p = 100 mm α = 0°
Nombre de rebonds
0
1
2
3
4
5
6
7
19
20
21
22
23
26
28
Valeur du rebond R

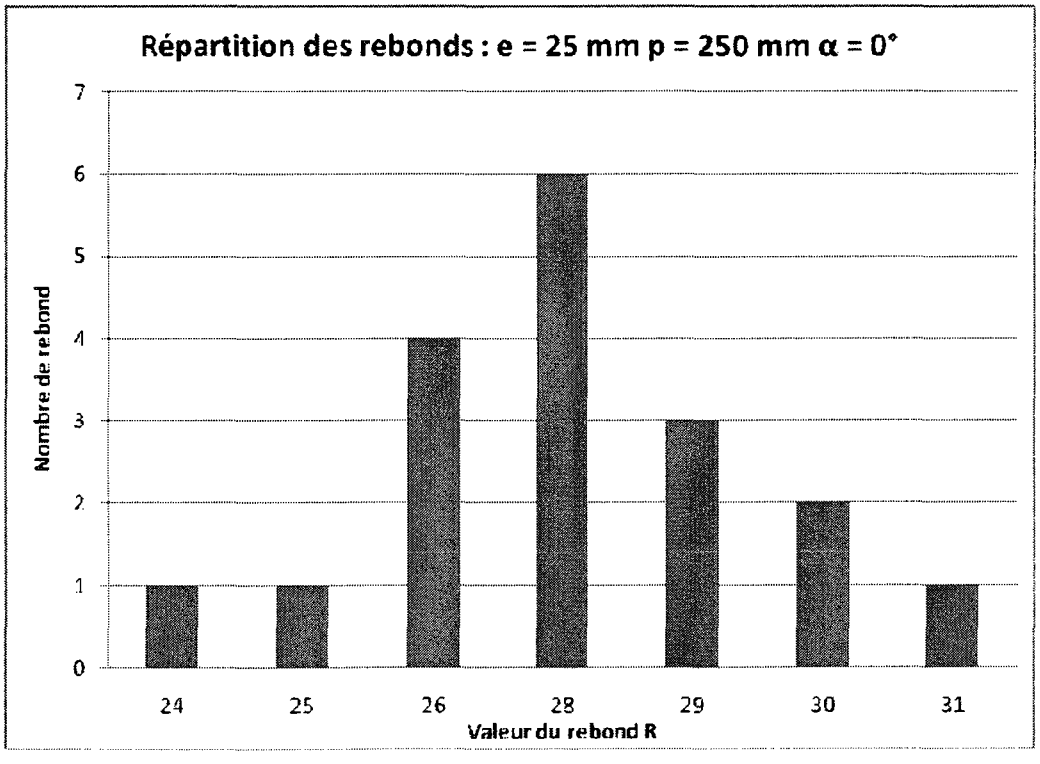

Répartition des rebonds : e = 5 mm p = 150 mm α = 0°
Nombre de rebonds
0
1
2
3
4
5
6
21
22
24
25
26
27
28
29
Valeur du rebond R

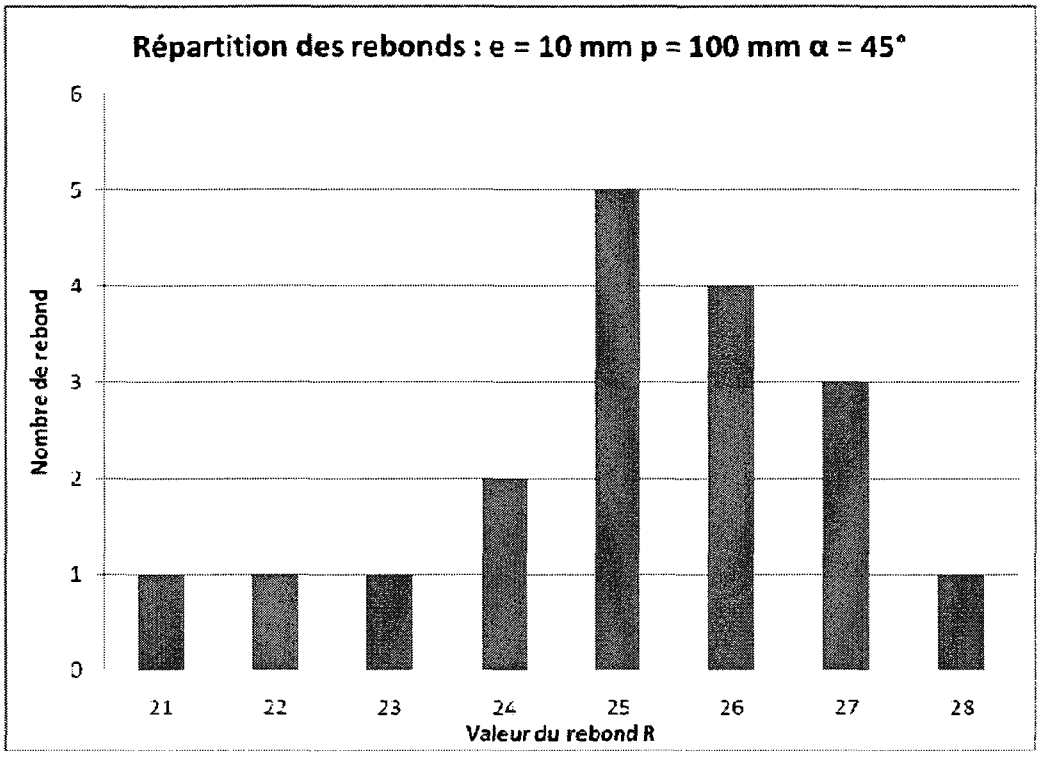

Répartition des rebonds : e = 10 mm p = 150 mm α = 0°
Nombre de rebonds
0
0,5
1
1,5
2
2,5
3
3,5
4
4,5
16
20
23
24
25
26
27
28
29
valeur du rebond R

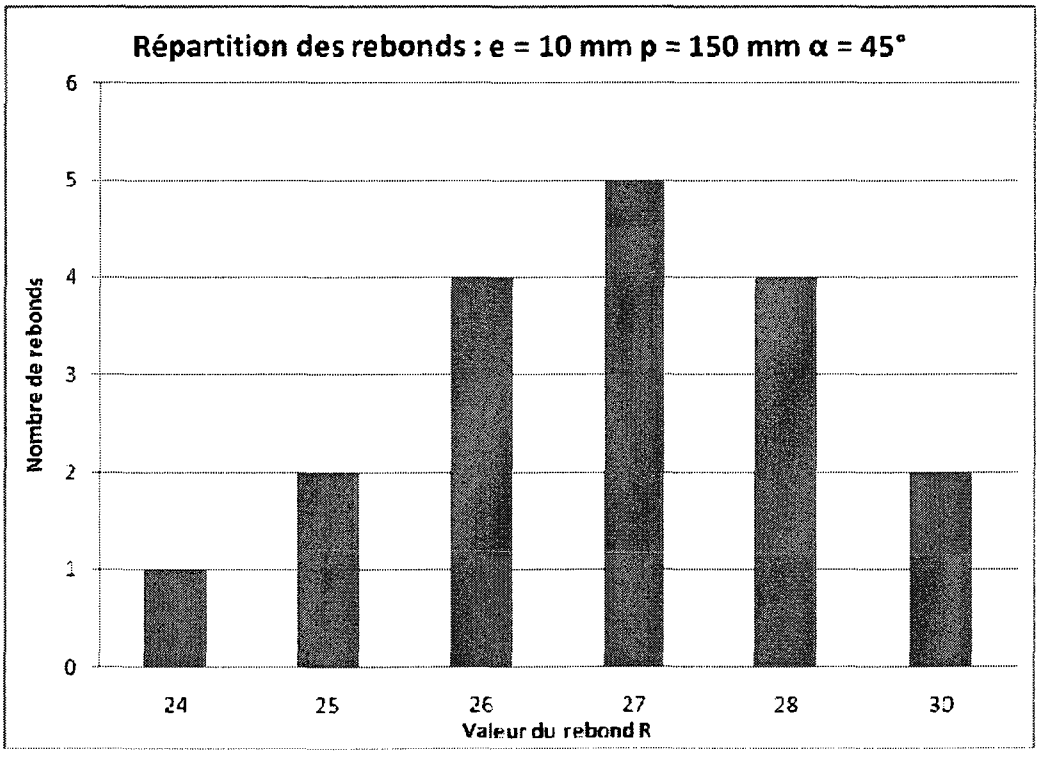

Répartition des rebonds : e = 25 mm p = 150 mm α = 0°
Nombre de rebonds
0
1
2
3
4
5
6
25
26
28
29
30
31
32
Valeur du rebond R

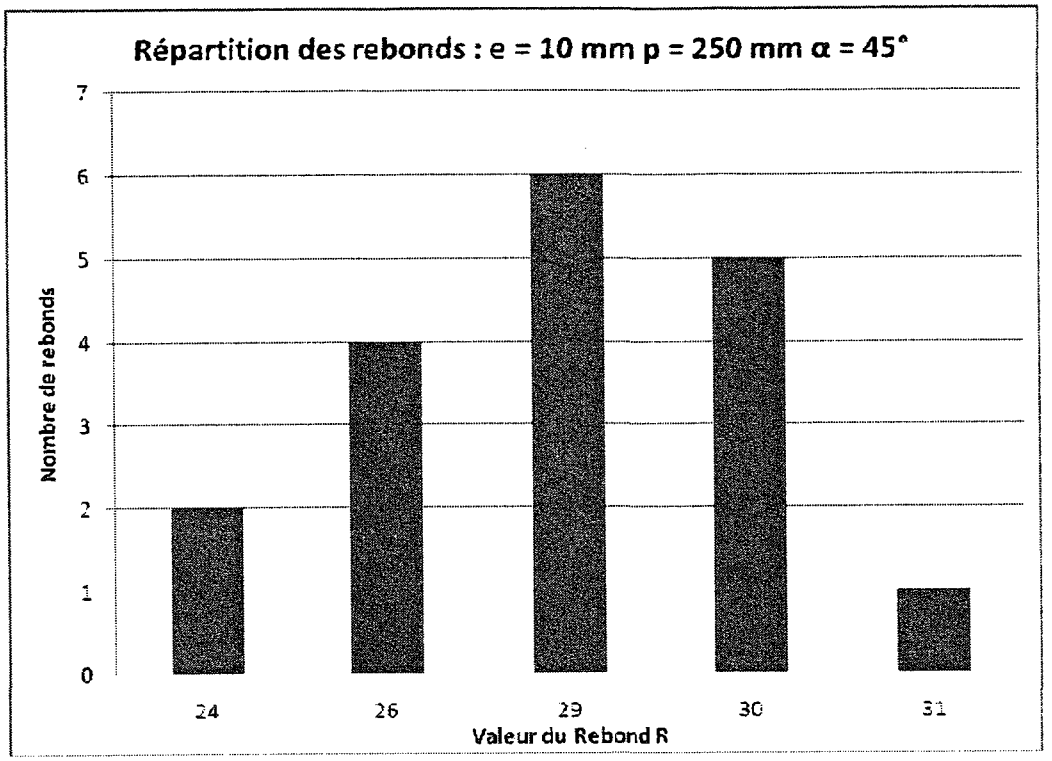

Répartition des rebonds : e = 5 mm p = 250 mm α = 0°
Nombre de rebonds
0
1
2
3
4
5
6
25
26
27
28
29
30
31
Valeur du rebond R


Répartition des rebonds : e = 10 mm p = 250 mm α = 0°
Nombre de rebonds
0
1
2
3
4
5
6
25
26
27
28
29
30
31
32
Valeur du rebond R


Répartition des rebonds : e = 25 mm p = 250 mm α = 0°
Nombre de rebond
0
1
2
3
4
5
6
7
24
25
26
28
29
30
31
Valeur du rebond R


Répartition des rebonds : e = 10 mm p = 100 mm α = 45°
Nombre de rebond
0
1
2
3
4
5
6
21
22
23
24
25
26
27
28
Valeur du rebond R


Répartition des rebonds : e = 10 mm p = 150 mm α = 45°
Nombre de rebonds
0
1
2
3
4
5
6
24
25
26
27
28
30
Valeur du rebond R


Répartition des rebonds : e = 10 mm p = 250 mm α = 45°
Nombre de rebonds
0
1
2
3
4
5
6
7
24
26
29
30
31
Valeur du Rebond R