



**Rapport sur l'état des bretelles de l'autoroute
Dufferin-Montmorency**

**Rapport final GCT-2012-02
Annexe
Département de génie civil**

**Présenté à
Sylvain Goulet ing.
Chargé de projet
Ministère des transports du Québec**

**Par
Josée Bastien, ing. PhD, responsable
Marion Girard, étudiante**



Le document suivant constitue l'essentiel du mémoire de maîtrise de madame Marion Girard dont les études ont été menées sous la supervision des professeurs Josée Bastien (directrice) et Benoit Bissonnette (co-directeur) au département de génie civil et de génies des eaux de l'Université Laval.

MARION GIRARD

**Étude de la précontrainte par post-tension par évaluation
non destructive (END)
Application de la méthode impact-écho (IE) combinée à
l'endoscopie**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en Génie Civil
pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

DEPARTEMENT DU GENIE CIVIL
FACULTE DES SCIENCES ET GENIES
UNIVERSITE LAVAL
QUEBEC

2011

Résumé

L'auscultation des ouvrages en béton précontraint à l'aide de la post-tension pose un défi particulier puisque l'armature de précontrainte de même que les gaines de précontrainte sont noyées dans le béton et deviennent, par le fait même, difficilement accessibles pour inspection. L'état des armatures de précontrainte (présence de corrosion) de même que la qualité de l'injection au coulis de ciment des gaines (présence de vides de coulis) sont pourtant des indicateurs importants de la durabilité des ouvrages.

Afin d'apporter un éclairage sur l'auscultation de tels ouvrages, la présente étude propose d'abord une revue de la littérature sur les méthodes d'évaluation non destructives et commente leur applicabilité dans le contexte des ouvrages précontraints. Suite à cette étude, la méthode de l'impact écho a été sélectionnée puis mise à profit pour l'auscultation de corps d'épreuve fabriqués en laboratoire ainsi que pour l'auscultation de portions de poutres de ponts démantelés. L'endoscopie, considérée comme une méthode semi-destructive, est venue en appui à la méthode de l'impact écho et a été utilisée sur les mêmes éléments de béton.

Suite à la description du processus méthodologique utilisé et des échantillons de béton à disposition, un chapitre entier est dédié aux résultats typiques observés. Les conclusions de l'étude montrent que la pratique d'endoscopies sur les ouvrages précontraints est particulièrement bien adaptée à l'observation de vides de coulis dans les gaines de post-tension et à l'observation de l'état des câbles de précontrainte. Dans le cas de l'impact-écho l'étude a montré que, bien qu'il existe un potentiel de détection des vides de coulis, dans les situations de pièces massives et complexes du fait de la présence de multiples câbles, de la présence de dégradations ou d'imperfections géométriques, l'interprétation des résultats s'avère difficile. Le traitement des résultats (signaux) demande à être plus approfondi avant que la méthode impact écho puisse être utilisée de façon courante sur des éléments massifs.

Abstract

Auscultation of post-tensioned concrete structures represents a particular challenge because the prestressing reinforcement as well as prestressing ducts are embedded in the concrete and become, thereby, mostly inaccessible to Inspection. However, the condition of the tendons (presence of corrosion) as well as the quality of the grout injection of the ducts (presence of voids) are important indicators of a structure durability.

In order to shed light upon auscultation of post-tensioned structures, this study first proposes a review of the literature on nondestructive methods and discusses their applicability in the context of prestressed structure assessment. Based on the review, the impact echo method was selected and utilized for the auscultation of test bodies, manufactured in laboratory, as well as for the auscultation of dismantled post-tensioned bridge sampled beams. Endoscopy, considered a semi-destructive testing method, came in support to the impact echo method and was used on the same concrete test bodies or samples.

Following the description of the methodology related to the two assessment methods and the description of the concrete samples available, an entire chapter is dedicated to typical experimental results. The findings of the study show that the practice of endoscopy is particularly well suited to the observation of injection voids or of the prestressed reinforcement state in the grouted ducts.. In the case of the impact-echo the study showed that, although there is a potential of grout void detections, in situations where massive and complex parts are involved (due to the presence of multiple cables, the presence of damage or geometrical imperfections), the interpretation of results is difficult. The treatment of the measures (signals) needs to be further developed before the impact echo method can be used routinely on large elements.

Avant-Propos

J'exprime ma profonde reconnaissance à Josée BASTIEN et Benoît BISSONNETTE qui ont dirigé mon travail et m'ont prêté leur soutien ainsi que leur connaissances scientifiques.

Ma gratitude vient ensuite à Jamal RHAZI pour l'intérêt pour lequel il a porté à mes recherches. Ses connaissances sur le sujet m'ont permis d'aiguiller ma recherche dans la bonne direction.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Marc JOLIN qui a assisté en tant que jury à mon oral de maîtrise.

Mes remerciements vont également à Andréas MULLER pour son aide et ses conseils portant sur la partie théorique de ma recherche et à Mathieu THOMASSIN pour sa participation active à mes essais en laboratoire et in-situ.

Je voudrais remercier chaleureusement tous les membres du CRIB, personnel administratif, de recherche et de laboratoire, les étudiants à la maîtrises et au doctorat et les stagiaires, avec qui les échanges scientifiques techniques ou amicaux ont été très formateurs pour ma vie professionnelle et ont fait de mes années au Québec une étape importante de ma vie.

Mes études au Québec ont été possibles grâce au protocole d'échange entre l'Université Laval et l'ENSAM et, plus particulièrement, grâce à Jean PASCO sans qui cet échange n'existerait pas.

Je remercie tous mes amis pour la motivation que leur amitié m'a apportée pendant ces années d'étude à l'étranger.

Enfin et avant tout, je tiens à remercier du fond du cœur, ma famille, qui a su me donner sans cesse son soutien, son amour et l'envie d'apprendre toujours plus. Elle était et continuera d'être, je le sais, un soutien sans faille.

*A mes proches, qui croient en moi beaucoup
plus que je ne saurais le faire moi-même.*

Table des matières

| | |
|--|-----|
| Résumé..... | i |
| Abstract..... | ii |
| Avant-Propos..... | iii |
| Table des matières..... | v |
| Table des symboles..... | ix |
| Liste des tableaux..... | x |
| Liste des figures..... | xv |
| Introduction..... | 1 |
| 1. Etat des connaissances sur les méthodes END..... | 4 |
| 1.1. Défauts rencontrés sur les ponts en béton précontraints..... | 4 |
| 1.1.1. Mauvais remplissage des gaines..... | 6 |
| 1.1.2. Détérioration de l'acier de précontrainte..... | 6 |
| 1.2. Recensement des méthodes END existantes appliquées aux ouvrages précontraints par post-tension interne..... | 7 |
| 1.3. Choix de la méthode la mieux adaptée..... | 12 |
| 2. Hypothèse et objectifs..... | 14 |
| 3. La méthode impact-écho..... | 15 |
| 3.1. Propagation des ondes dans le béton..... | 15 |
| 3.2. Principe et fonctionnement de la méthode..... | 16 |
| 3.2.1. Le b.a.-ba..... | 16 |
| 3.2.2. Choix du projectile pour générer l'impact..... | 18 |
| 3.2.3. Importance de la longueur d'onde λ | 21 |
| 3.2.4. Interfaces et impédances..... | 21 |
| 3.2.5. Le choix du transducteur..... | 26 |
| 3.3. Influence de la taille et des proportions des pièces étudiées sur la mesure de leur épaisseur..... | 27 |
| 3.3.1. Les dalles..... | 28 |
| 3.3.2. Les simili-dalles..... | 28 |
| 3.3.3. Les pièces larges..... | 28 |
| 3.3.4. Les pièces élancées..... | 28 |
| 3.3.5. Valeur de β et des harmoniques..... | 28 |
| 3.4. Détection de vide de coulis dans les gaines de précontrainte par post-tension interne..... | 30 |
| 3.5. Exemples d'applications de la méthode..... | 32 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 3.5.1. | Détection de délaminage..... | 33 |
| 3.5.2. | Détection de vide de précontrainte | 34 |
| 3.5.3. | Autres références | 37 |
| 3.6. | Interprétation des mesures : exemple du modèle SIBIE..... | 38 |
| 4. | L'endoscopie : méthode d'évaluation semi-destructive complémentaire..... | 39 |
| 4.1. | Influence des ED..... | 39 |
| 4.2. | Méthode alternative semi-destructive | 40 |
| 4.2.1. | Types d'endoscopes..... | 40 |
| 4.2.2. | Technique d'exploration | 41 |
| 5. | Expérimentations | 43 |
| 5.1. | Echantillons de l'étude..... | 43 |
| 5.1.1. | Plaques PL (laboratoire) | 43 |
| 5.1.2. | Blocs (laboratoire) | 48 |
| 5.1.3. | Segments de poutres (<i>in situ</i>)..... | 57 |
| 5.2. | Protocole expérimental | 72 |
| 5.2.1. | Prise en main des appareils | 73 |
| 5.2.2. | Mode opératoire expérimental | 85 |
| 6. | Résultats..... | 96 |
| 6.1. | Plaques PL (laboratoire) | 96 |
| 6.1.1. | Gamme d'essais initiale | 96 |
| 6.1.2. | Vérification des résultats par une nouvelle gamme d'essais | 101 |
| 6.1.3. | Validation des résultats | 104 |
| 6.1.4. | Résultats exploitables | 108 |
| 6.2. | Blocs (laboratoire) | 110 |
| 6.2.1. | Présentation des essais impact écho sur les blocs du laboratoire | 111 |
| 6.2.2. | Essais IE préliminaires sur le bloc B | 112 |
| 6.2.3. | Essais IE préliminaires sur le bloc A | 124 |
| 6.2.4. | Essais IE préliminaires sur le bloc C | 137 |
| 6.2.5. | Mesures le long des gaines | 147 |
| 6.2.6. | Vérification du remplissage par endoscopie | 157 |
| 6.3. | Segments de poutres (<i>in situ</i>)..... | 157 |
| 6.3.1. | Segment de poutre B4S4..... | 159 |
| 6.3.2. | Segment de poutre B2S3..... | 185 |
| 6.3.3. | Segments de poutre B4S3 et B2S4 | 201 |
| 6.3.4. | Observations par tests destructifs | 205 |
| | Conclusion | 218 |
| | Bibliographie | 229 |
| | Annexes | 232 |

| | | |
|------|--|-----|
| A. | Fiche produit du coulis de ciment utilisé en laboratoire | 233 |
| B. | Détermination du rapport e/c pour le coulis de ciment..... | 237 |
| C. | Gâchée de béton pour les plaques PL | 238 |
| D. | Fiche de la centrale à béton (béton Blocs)..... | 239 |
| E. | Résistances en compression des bétons étudiés..... | 240 |
| a. | Plaques PL | 240 |
| i. | Résistance à 7 jours..... | 240 |
| ii. | Résistance à 28 jours..... | 241 |
| iii. | Résistance à 90 jours..... | 242 |
| b. | Blocs | 243 |
| i. | Résistance à 7 jours..... | 243 |
| ii. | Résistance à 28 jours..... | 244 |
| iii. | Résistance à 90 jours..... | 245 |
| c. | Segments de poutres | 246 |
| i. | B2S3..... | 246 |
| ii. | B2S4..... | 247 |
| iii. | B4S3..... | 248 |
| iv. | B4S4..... | 249 |
| F. | Utilisation du programme Impact-E (mesures IE)..... | 250 |
| a. | Création du fichier de sauvegarde | 250 |
| b. | Réglages et données d'acquisition..... | 251 |
| c. | Mesures et acquisition | 253 |
| d. | Transfert des données sous Excel | 255 |
| G. | Feuille d'essais IE type | 257 |
| H. | Fiche de traitement des mesures sous MatLab | 258 |
| I. | Mesure de l'épaisseur des plaques par le capteur du CRIB..... | 260 |
| J. | Résultats de mesures le long des gaines pour les blocs | 261 |
| a. | Mesures suivant AH..... | 261 |
| b. | Mesures suivant AV..... | 262 |
| c. | Mesures suivant BH..... | 263 |
| d. | Mesures suivant BV..... | 264 |
| e. | Mesures suivant BB..... | 265 |
| f. | Mesures suivant CA..... | 266 |
| g. | Mesures suivant CB..... | 267 |
| h. | Mesures suivant CC..... | 268 |
| i. | Mesures suivant CD..... | 269 |

| | | |
|------|--|-----|
| K. | Décryptage des clichés endoscopiques | 270 |
| L. | Résultats complets sur les segments de poutre B4S3 et B2S4 | 273 |
| a. | Segment de poutre B4S3..... | 273 |
| i. | Observation à l'endoscope..... | 275 |
| ii. | Observation à 90° du coulis et des vides | 279 |
| iii. | Résultats IE | 282 |
| b. | Segment de poutre B2S4..... | 289 |
| i. | Observation à l'endoscope..... | 291 |
| ii. | Résultats IE | 292 |

Table des symboles

| | |
|-------------------|---|
| Z_i | Impédance acoustique du milieu i |
| \emptyset | Diamètre moyen de la gaine étudiée |
| \emptyset_{max} | Diamètre maximum des gaines rainurées utilisées pour les échantillons en laboratoire |
| \emptyset_{min} | Diamètre minimum des gaines rainurées utilisées pour les échantillons en laboratoire |
| ΔT | Période d'échantillonnage durant les mesures IE |
| Δf_1 | Valeur théorique du décalage du pic image de l'épaisseur f_1 |
| h | Hauteur de l'échantillon |
| B | Largeur de la section de pièce étudiée par impact-écho |
| D | Profondeur de la pièce étudiée |
| L | Longueur de l'échantillon |
| N | Nombre de valeurs mesurées pour une mesure par IE |
| R | Coefficient de réflexion |
| d | Diamètre de la bille utilisée pour créer un impact |
| e/c | Rapport eau/ciment utilisé pour la formulation du coulis de ciment |
| f_1^* | Valeur du pic de fréquence image de l'épaisseur f_1 compensé par le décalage Δf_1 |
| f_{acier} | Fréquence due à l'écho de l'onde sur l'acier contenu dans la gaine (pleine) |
| f_i | Fréquence caractéristique du i -ème harmonique image de l'épaisseur de la pièce |
| f_{vide} | Fréquence due à l'écho de l'onde sur le haut d'une gaine vide |
| l | Largeur de l'échantillon |
| l' | Largeur la plus grande de l'échantillon (pour une forme irrégulière de l'échantillon) |
| p | Profondeur de la gaine par rapport à la surface étudiée (distance surface-centre de la gaine) |
| p_g | Distance entre la surface étudiée et la surface de la gaine |
| t_c | Durée du contact de la bille sur la surface d'essai (IE) lors de l'impact |
| v_p | Vitesse de propagation des ondes |
| α | Angle représentant la pente de remplissage graduel du coulis dans les blocs |
| β | Coefficient de forme |
| λ | Longueur d'onde |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| TABEAU 1.1- LISTE DES PROBLEMES POUVANT ETRE RENCONTRES DANS UNE POUTRE CAISSON DE PONT.. | 6 |
| TABEAU 1.2- LISTE DES METHODES APPLIQUEES AUX OUVRAGES EN POST-TENSION | 8 |
| TABEAU 1.3- DEFAUTS OU CARACTERISTIQUES DETECTES PAR DOMAINE | 11 |
| TABEAU 3.1- LONGUEUR D'ONDE CARACTERISTIQUE EN FONCTION DE LA FREQUENCE ETUDIEE POUR UNE VITESSE DE PROPAGATION DANS LE BETON DE 4000 m/s | 21 |
| TABEAU 3.2 – VALEUR DE β ET DES HARMONIQUES PAR RAPPORT A LA FREQUENCE CARACTERISTIQUE f_1 IMAGE DE L'EPAISSEUR DE LA PIECE POUR DIFFERENTS RATIOS D/B [35]..... | 28 |
| TABEAU 5.1 – NOMENCLATURE DES SEGMENTS DE POUTRES..... | 59 |
| TABEAU 5.2 - DIMENSIONS DES SEGMENTS DE POUTRES (REFERENCE A LA FIGURE 5.23) | 61 |
| TABEAU 5.3- MESURES EFFECTUEES SUR B2S3 AUTOUR DES GAINES..... | 65 |
| TABEAU 5.4- MESURES EFFECTUEES SUR B4S3 AUTOUR DES GAINES..... | 66 |
| TABEAU 5.5- MESURES EFFECTUEES SUR B2S4 AUTOUR DES GAINES..... | 69 |
| TABEAU 5.6- MESURES EFFECTUEES SUR B4S4 AUTOUR DES GAINES..... | 70 |
| TABEAU 5.7- RESOLUTION EN FREQUENCE DE L'INSTRUMENT IE EN FONCTION DES REGLAGES CHOISIS.... | 75 |
| TABEAU 5.8- f_{max} THEORIQUE OBTENUE A PARTIR DU DIAMETRE d DES BILLES DE L'INSTRUMENT IE ET DE L'EQUATION (3.6) | 76 |
| TABEAU 5.9- TERMES D'ABREVIATION DES PARAMETRES D'ACQUISITION | 87 |
| TABEAU 5.10 – VITESSES DE PROPAGATION v_p ETABLIES A PARTIR DES CYLINDRES | 89 |
| TABEAU 5.11- DONNEES ET FREQUENCES CARACTERISTIQUES DES PLAQUES..... | 90 |
| TABEAU 5.12- DONNEES ET FREQUENCES CARACTERISTIQUES DES GAINES POUR LES PLAQUES | 90 |
| TABEAU 5.13- DONNEES DES BLOCS | 91 |
| TABEAU 5.14- FREQUENCES CARACTERISTIQUES DES BLOCS..... | 92 |
| TABEAU 5.15- FREQUENCES CARACTERISTIQUES DES GAINES POUR LES BLOCS | 92 |
| TABEAU 5.16- DECALAGE Δf_1 SUIVANT LES POSITIONS DES GAINES ET LES DIMENSIONS DES BLOCS..... | 92 |
| TABEAU 6.1- RECAPITULATIF DES VALEURS EN FREQUENCE ATTENDUES POUR LES PLAQUES | 96 |
| TABEAU 6.2- CHOIX DES PARAMETRES POUR LES MESURES IE | 97 |
| TABEAU 6.3- VALEURS DES FREQUENCES OBTENUES POUR LA FIGURE 6.1..... | 97 |
| TABEAU 6.4- VALEURS DES FREQUENCES OBTENUES POUR LA FIGURE 6.2..... | 103 |
| TABEAU 6.5- DONNEES DES CYLINDRES DE COULIS DE CIMENT..... | 105 |
| TABEAU 6.6- VALEURS DES FREQUENCES OBTENUES POUR LA FIGURE 6.6..... | 110 |
| TABEAU 6.7- DECALAGE EN FREQUENCE RELEVE POUR LES PLAQUES..... | 110 |
| TABEAU 6.8- VALEURS THEORIQUES DES FREQUENCES IMAGE DE L'EPAISSEUR DU BLOC B | 113 |

| | |
|--|-----|
| TABLEAU 6.9 - REGLAGES DE LA MESURE DE L'ÉPAISSEUR DE L'ÉCHANTILLON B (FIGURE 6.8)..... | 113 |
| TABLEAU 6.10 - VALEUR DES PICS DE FREQUENCE IDENTIFIES SUR LA FIGURE 6.8 | 116 |
| TABLEAU 6.11- VALEURS THEORIQUES DES FREQUENCES IMAGE DE L'ÉPAISSEUR DU BLOC B EN PRENANT COMPTE DU DECALAGE Δf_1 DU A LA GAIN ESTIME A 10 % | 117 |
| TABLEAU 6.12- IDENTIFICATION DES VALEURS THEORIQUES ATTENDUES POUR LES FREQUENCES CARACTERISTIQUES DE VIDE EN HAUT DE GAIN (PROFONDEUR pg) ET DES BARRES D'ACIER DANS LA GAIN (PROFONDEUR p) DEPUIS LA SURFACE ETUDIEE | 117 |
| TABLEAU 6.13- REGLAGES UTILISES POUR LES MESURES AU-DESSUS (FIGURE 6.9) ET SUR LE COTE DE LA GAIN (FIGURE 6.10) | 118 |
| TABLEAU 6.14- VALEUR DES PICS DE FREQUENCE IDENTIFIES SUR LA FIGURE 6.9 | 120 |
| TABLEAU 6.15 IDENTIFICATION DES VALEURS THEORIQUES ATTENDUES POUR LES FREQUENCES CARACTERISTIQUES DE VIDE EN HAUT DE GAIN (PROFONDEUR pg) ET DES BARRES D'ACIER DANS LA GAIN (PROFONDEUR p) DEPUIS LA SURFACE ETUDIEE | 121 |
| TABLEAU 6.16- VALEUR DES PICS DE FREQUENCE IDENTIFIES SUR LA FIGURE 6.10 | 123 |
| TABLEAU 6.17- VALEURS THEORIQUES DES FREQUENCES IMAGE DE L'ÉPAISSEUR DU BLOC A (MESURE SUR LA HAUTEUR)..... | 126 |
| TABLEAU 6.18- REGLAGES DE LA MESURE DE L'ÉPAISSEUR SUR LA HAUTEUR DE L'ÉCHANTILLON A (FIGURE 6.12) | 126 |
| TABLEAU 6.19- VALEUR DES PICS DE FREQUENCE IDENTIFIES SUR LA FIGURE 6.12 | 128 |
| TABLEAU 6.20- VALEURS THEORIQUES DES FREQUENCES IMAGE DE L'ÉPAISSEUR DU BLOC A (MESURE SUR LA LARGEUR) | 129 |
| TABLEAU 6.21- REGLAGES DE LA MESURE DE L'ÉPAISSEUR SUR LA LARGEUR DE L'ÉCHANTILLON A (FIGURE 6.13) | 129 |
| TABLEAU 6.22- VALEUR DES PICS DE FREQUENCE IDENTIFIES SUR LA FIGURE 6.13 | 129 |
| TABLEAU 6.23- REGLAGES UTILISES POUR LES MESURES AU-DESSUS (FIGURE 6.14) ET SUR LE COTE DE LA GAIN (FIGURE 6.15) | 131 |
| TABLEAU 6.24- VALEURS THEORIQUES DES FREQUENCES IMAGE DE L'ÉPAISSEUR DU BLOC A EN PRENANT COMPTE DU DECALAGE Δf_1 DU A LA GAIN ESTIME A 5 % | 132 |
| TABLEAU 6.25- IDENTIFICATION DES VALEURS THEORIQUES ATTENDUES POUR LES FREQUENCES CARACTERISTIQUES DE VIDE EN HAUT DE GAIN (PROFONDEUR pg) ET DES BARRES D'ACIER DANS LA GAIN (PROFONDEUR p) DEPUIS LA SURFACE ETUDIEE | 133 |
| TABLEAU 6.26- VALEUR DES PICS DE FREQUENCE IDENTIFIES SUR LA FIGURE 6.14 | 133 |
| TABLEAU 6.27- VALEURS THEORIQUES DES FREQUENCES IMAGE DE L'ÉPAISSEUR DU BLOC A EN PRENANT COMPTE DU DECALAGE Δf_1 DU A LA GAIN ESTIME A 10 % | 134 |

| | |
|---|-----|
| TABLEAU 6.28 IDENTIFICATION DES VALEURS THEORIQUES ATTENDUES POUR LES FREQUENCES CARACTERISTIQUES DE VIDE EN HAUT DE GAINÉ (PROFONDEUR pg) ET DES BARRES D'ACIER DANS LA GAINÉ (PROFONDEUR p) DEPUIS LA SURFACE ETUDIEE | 136 |
| TABLEAU 6.29- VALEUR DES PICS DE FREQUENCE IDENTIFIES SUR LA FIGURE 6.15 | 136 |
| TABLEAU 6.30- VALEURS THEORIQUES DES FREQUENCES IMAGE DE L'ÉPAISSEUR DU BLOC C | 138 |
| TABLEAU 6.31- VALEURS THEORIQUES DES FREQUENCES IMAGE DE L'ÉPAISSEUR DU BLOC C EN PRENANT COMPTE DU DECALAGE Δf_1 DU A LA GAINÉ A ESTIME A 5 % | 138 |
| TABLEAU 6.32- IDENTIFICATION DES VALEURS THEORIQUES ATTENDUES POUR LES FREQUENCES CARACTERISTIQUES DE VIDE EN HAUT DE GAINÉ (PROFONDEUR pg) ET DES BARRES D'ACIER DANS LA GAINÉ (PROFONDEUR p) DEPUIS LA SURFACE ETUDIEE POUR LA GAINÉ A..... | 138 |
| TABLEAU 6.33- REGLAGES UTILISES POUR LES MESURES AU-DESSUS DE LA GAINÉ A (FIGURE 6.17)..... | 139 |
| TABLEAU 6.34- VALEUR DES PICS DE FREQUENCE IDENTIFIES SUR LA FIGURE 6.12 | 140 |
| TABLEAU 6.35- VALEURS THEORIQUES DES FREQUENCES IMAGE DE L'ÉPAISSEUR DU BLOC C EN PRENANT COMPTE DU DECALAGE Δf_1 DU A LA GAINÉ A ESTIME A 7 % | 141 |
| TABLEAU 6.36- IDENTIFICATION DES VALEURS THEORIQUES ATTENDUES POUR LES FREQUENCES CARACTERISTIQUES DE VIDE EN HAUT DE GAINÉ (PROFONDEUR pg) ET DES BARRES D'ACIER DANS LA GAINÉ (PROFONDEUR p) DEPUIS LA SURFACE ETUDIEE POUR LA GAINÉ B..... | 141 |
| TABLEAU 6.37- REGLAGES UTILISES POUR LES MESURES AU-DESSUS DE LA GAINÉ B (FIGURE 6.18), DE LA GAINÉ C (FIGURE 6.19) ET DE LA GAINÉ D (FIGURE 6.20) | 141 |
| TABLEAU 6.38- VALEUR DES PICS DE FREQUENCE IDENTIFIES SUR LA FIGURE 6.18 | 142 |
| TABLEAU 6.39- VALEURS THEORIQUES DES FREQUENCES IMAGE DE L'ÉPAISSEUR DU BLOC C EN PRENANT COMPTE DU DECALAGE Δf_1 DU A LA GAINÉ A ESTIME A 10 % | 144 |
| TABLEAU 6.40- IDENTIFICATION DES VALEURS THEORIQUES ATTENDUES POUR LES FREQUENCES CARACTERISTIQUES DE VIDE EN HAUT DE GAINÉ (PROFONDEUR pg) ET DES BARRES D'ACIER DANS LA GAINÉ (PROFONDEUR p) DEPUIS LA SURFACE ETUDIEE POUR LES GAINES C ET D | 144 |
| TABLEAU 6.41- VALEUR DES PICS DE FREQUENCE IDENTIFIES SUR LA FIGURE 6.19 | 145 |
| TABLEAU 6.42- VALEUR DES PICS DE FREQUENCE IDENTIFIES SUR LA FIGURE 6.20 | 146 |
| TABLEAU 6.43- FACTEURS MULTIPLICATIFS PERMETTANT DE DÉTERMINER LA VALEUR DES HARMONIQUES ATTENDUES POUR LES SEGMENTS DE POUTRE | 158 |
| TABLEAU 6.44 - RÉSULTATS DES ENDOSCOPIES OBTENUS POUR LE SEGMENT DE POUTRE B4S4..... | 162 |
| TABLEAU 6.45- RÉSULTATS DES ENDOSCOPIES OBTENUS POUR LE SEGMENT DE POUTRE B4S4 (VUES À 90°) | 169 |
| TABLEAU 6.46- VALEURS DES FRÉQUENCES THÉORIQUES IMAGE DE L'ÉPAISSEUR DE LA PIÈCE..... | 174 |

| | |
|--|-----|
| TABLEAU 6.47- RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LA GAINÉ B PAR ENDOSCOPIE AVEC LES FRÉQUENCES THÉORIQUES CALCULÉES ASSOCIÉES..... | 175 |
| TABLEAU 6.48- RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LA GAINÉ A PAR ENDOSCOPIE AVEC LES FRÉQUENCES THÉORIQUES CALCULÉES ASSOCIÉES..... | 177 |
| TABLEAU 6.49- RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LA GAINÉ C PAR ENDOSCOPIE AVEC LES FRÉQUENCES THÉORIQUES CALCULÉES ASSOCIÉES..... | 179 |
| TABLEAU 6.50- RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LA GAINÉ D PAR ENDOSCOPIE AVEC LES FRÉQUENCES THÉORIQUES CALCULÉES ASSOCIÉES..... | 181 |
| TABLEAU 6.51- RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LA GAINÉ E PAR ENDOSCOPIE AVEC LES FRÉQUENCES THÉORIQUES CALCULÉES ASSOCIÉE..... | 183 |
| TABLEAU 6.52- RÉSULTATS DES ENDOSCOPIES OBTENUS POUR LE SEGMENT DE POUTRE B2S3..... | 187 |
| TABLEAU 6.53- RÉSULTATS DES ENDOSCOPIES OBTENUS POUR LE SEGMENT DE POUTRE B2S3 (VUES À 90°) | 191 |
| TABLEAU 6.54- VALEURS DES FRÉQUENCES THÉORIQUES IMAGE DE L'ÉPAISSEUR DE LA PIÈCE..... | 192 |
| TABLEAU 6.55- RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LA GAINÉ B PAR ENDOSCOPIE AVEC LES FRÉQUENCES THÉORIQUES CALCULÉES ASSOCIÉE..... | 194 |
| TABLEAU 6.56- RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LA GAINÉ C PAR ENDOSCOPIE AVEC LES FRÉQUENCES THÉORIQUES CALCULÉES ASSOCIÉE..... | 196 |
| TABLEAU 6.57- RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LA GAINÉ D PAR ENDOSCOPIE AVEC LES FRÉQUENCES THÉORIQUES CALCULÉES ASSOCIÉE..... | 199 |
| TABLEAU 6.58- RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LA GAINÉ E PAR ENDOSCOPIE AVEC LES FRÉQUENCES THÉORIQUES CALCULÉES ASSOCIÉE..... | 199 |
| TABLEAU 6.59- OBSERVATION À L'ENDOSCOPE À LA COTE B160 (B4S3) | 202 |
| TABLEAU 6.60- OBSERVATION À L'ENDOSCOPE À LA COTE C60 (B4S3) | 202 |
| TABLEAU 6.61- RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LA GAINÉ A PAR ENDOSCOPIE AVEC LES FRÉQUENCES THÉORIQUES CALCULÉES ASSOCIÉE..... | 204 |
| TABLEAU 6.62 - RETOUR SUR LES MESURE IE POUR LES ÉCHANTILLONS EN LABORATOIRE | 219 |
| TABLEAU 6.63- RETOUR SUR LES RÉSULTATS IE DES ÉCHANTILLONS <i>IN-SITU</i> | 220 |
| TABLEAU 0.1- RÉSULTATS DES ENDOSCOPIES OBTENUS POUR LE SEGMENT DE POUTRE B4S3..... | 276 |
| TABLEAU 0.2- RÉSULTATS DES ENDOSCOPIES OBTENUS POUR LE SEGMENT DE POUTRE B4S3 (VUES À 90°) | 280 |
| TABLEAU 0.3- VALEURS DES FRÉQUENCES THÉORIQUES IMAGE DE L'ÉPAISSEUR DE LA PIÈCE..... | 283 |
| TABLEAU 0.4- RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LA GAINÉ A PAR ENDOSCOPIE AVEC LES FRÉQUENCES THÉORIQUES CALCULÉES ASSOCIÉE..... | 283 |

| | |
|---|-----|
| TABLEAU 0.5- RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LA GAINÉ B PAR ENDOSCOPIE AVEC LES FRÉQUENCES THÉORIQUES CALCULÉES ASSOCIÉE..... | 285 |
| TABLEAU 0.6- RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LA GAINÉ C PAR ENDOSCOPIE AVEC LES FRÉQUENCES THÉORIQUES CALCULÉES ASSOCIÉE..... | 287 |
| TABLEAU 0.7- RÉSULTATS DES ENDOSCOPIES OBTENUS POUR LE SEGMENT DE POUTRE B2S4..... | 291 |
| TABLEAU 0.8- VALEURS DES FRÉQUENCES THÉORIQUES IMAGE DE L'ÉPAISSEUR DE LA PIÈCE..... | 293 |
| TABLEAU 0.9- RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS PAR ENDOSCOPIE AVEC LES FRÉQUENCES THÉORIQUES CALCULÉES ASSOCIÉE | 293 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| FIGURE 1.1- RISQUES POTENTIELS DE DETERIORATION DANS UNE STRUCTURE EN BETON PRECONTRAIT PAR POST-TENSION [4] (ANNOTATIONS TABLEAU 1.1)..... | 5 |
| FIGURE 1.2- GAINÉ SEVEREMENT CORRODÉE DONT L'ACIER AVAIT COMMENCÉ À SE CORRODER [5]..... | 7 |
| FIGURE 1.3- DOMAINES DE DETECTION DES METHODES END | 12 |
| FIGURE 3.1- ONDES GÉNÉRÉES PAR UN IMPACT À LA SURFACE D'UN MATÉRIAU SEMI-INFINI, HOMOGENE ET ELASTIQUE ISOTROPE [30] | 15 |
| FIGURE 3.2- EXEMPLE DE MESURE PAR LA METHODE IMPACT-ECHO | 16 |
| FIGURE 3.3- EXEMPLE DE SIGNAL ETUDIÉ AVEC L'IMPACT-ECHO [11]. | 17 |
| FIGURE 3.4- SCHEMATISATION DU PRINCIPE DE BASE DE L'IMPACT-ECHO | 17 |
| FIGURE 3.5- BILLES DE DIFFÉRENTS DIAMÈTRES | 19 |
| FIGURE 3.6- COMPARAISON DES TEMPS DE CONTACT t_c POUR UNE BILLE DE 6 mm DE DIAMÈTRE (A) ET UNE BILLE DE 16 mm DE DIAMÈTRE (B) [31] | 19 |
| FIGURE 3.7- COMPARAISON DE LA VALEUR DE f_{max} OBTENU POUR LA BILLE DE 6 mm DE DIAMÈTRE ET LA BILLE DE 16 mm DE DIAMÈTRE [31] | 20 |
| FIGURE 3.8- ILLUSTRATION DE LA RÉFLEXION ET TRANSMISSION D'UNE ONDE (A) À L'INTERFACE ENTRE 2 MILIEUX AINSI QUE LA PARTICULARITÉ DE LA FORMATION DES ONDES-P ET -S À PARTIR D'UNE ONDE-P (B) [32]. | 22 |
| FIGURE 3.9- SCHEMATISATION DU CHANGEMENT DE PHASE ENTRE ONDE DE COMPRESSION ET ONDE DE TENSION POUR $R \ll 0$ [33] | 24 |
| FIGURE 3.10- SCHEMATISATION DU CHANGEMENT DE PHASE ENTRE ONDE DE COMPRESSION ET ONDE DE TENSION POUR $R \gg 0$ [33] | 25 |
| FIGURE 3.11 – EXEMPLE TYPIQUE D'UNE RÉPONSE EN FRÉQUENCE D'UN ACCELEROMETRE [34]. | 26 |
| FIGURE 3.12- SCHEMATISATION DE LA CARACTÉRISATION DES LONGUEURS D (HAUTEUR DE SECTION) ET B (LARGEUR DE SECTION). | 27 |
| FIGURE 3.13- VALEUR DES COEFFICIENTS β ET DES MULTIPLES DE f_1 POUR LES TROIS PREMIERS MODES DE VIBRATION DES PIÈCES EN FONCTION DU RATIO D/B [35]. | 30 |
| FIGURE 3.14- VARIATION DU SPECTRE DE FRÉQUENCE EN FONCTION DU "DEFAULT" RENCONTRE | 31 |
| FIGURE 3.15- ZONE OU LA PROFONDEUR p DU DEFAULT DÉTECTABLE EN FONCTION DE SA DIMENSION LATÉRALE D [36]. | 33 |
| FIGURE 3.16- ÉVALUATION DU DELAMINAGE PAR METHODE IMPACT-ECHO DU TABLIER DE PONT DU VAN BUREN ROAD BRIDGE (USA) [37] | 34 |

| | |
|---|----|
| FIGURE 3.17- INFLUENCE DE LA PRESENCE D'UNE GAINE (VIDE OU REMPLIE DE COULIS) SUR LA FREQUENCE CARACTERISTIQUE DE L'EPAISSEUR DE LA PIECE [30]. | 35 |
| FIGURE 3.18- VARIATION Δf_1 EN FONCTION DES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES ESTIME POUR [30]. | 37 |
| FIGURE 3.19- ANALYSE OBTENUE PAR SIBIE D'UNE POUTRE A SECTION CARREE EN LABORATOIRE [11] | 38 |
| FIGURE 4.1- FENETRAGE EFFECTUE SUR UN PONT EN POST-TENSION[23]. | 39 |
| FIGURE 4.2- ENDOSCOPES FLEXIBLES ET RIGIDES [41]. | 40 |
| FIGURE 4.3- SCHEMA DE L'UTILISATION D'UN ENDOSCOPE RIGIDE [7]. | 41 |
| FIGURE 4.4- EXEMPLE D'IMAGE VIDEO OBTENUE PAR ENDOSCOPIE A L'INTERIEUR D'UNE GAINE DE PRECONTRAINTE AU NIVEAU DE L'ANCRAGE [42]. | 42 |
| FIGURE 5.1- FABRICATION DES PLAQUES (EN HAUT : LES 3 PLAQUES PL1, EN BAS : LES 3 PLAQUES PL3) | 44 |
| FIGURE 5.2 - SCHEMATISATION D'UNE SECTION TRANSVERSALE D'UNE PLAQUE | 44 |
| FIGURE 5.3- CATEGORIES DES ECHANTILLONS PL | 46 |
| FIGURE 5.4- VUE AU-DESSUS DES GAINES APRES LE REMPLISSAGE AVEC LE COULIS DE CIMENT (POUR LES PLAQUES PL2) | 47 |
| FIGURE 5.5- SCHEMATISATION DU REMPLISSAGE D'UNE GAINE SUR SA LONGUEUR | 48 |
| FIGURE 5.6- SCHEMATISATION DE LA SECTION DU BLOC A | 49 |
| FIGURE 5.7- SCHEMATISATION DE LA SECTION DU BLOC B | 50 |
| FIGURE 5.8- SCHEMATISATION DE LA SECTION DU BLOC C | 51 |
| FIGURE 5.9- SCHEMATISATION DE LA SECTION DU BLOC D | 52 |
| FIGURE 5.10- BLOCS DE BETON APRES LA COULEE | 53 |
| FIGURE 5.11- PHOTOGRAPHIE DU "TREILLIS" UTILISE POUR LE BLOC D | 54 |
| FIGURE 5.12- FILM DE CAOUTCHOUC PLACE SUR LES GAINES DB ET DC POUR SIMULER LA PRESENCE D'UN PLAN DE FISSURE | 54 |
| FIGURE 5.13- POSITION DES ELEMENTS DANS LE BLOC D | 54 |
| FIGURE 5.14- SCHEMATISATION DE LA POSITION DE REMPLISSAGE DES GAINES ET DE L'ANGLE α (VOLUME TOTAL DE COULIS DE 4,5 L) | 55 |
| FIGURE 5.15- PREPARATION DU COULIS ET REMPLISSAGE DES GAINES | 56 |
| FIGURE 5.16- BLOC A : MISE EN PLACE POUR LE REMPLISSAGE DE COULIS | 56 |
| FIGURE 5.17- ETAPES DE REMPLISSAGE DES GAINES (VUES A L'ENTREE DE LA GAINE COTE « VIDE DE COULIS ») | 56 |
| FIGURE 5.18- VERIFICATION DE LA QUANTITE DE COULIS DANS LA GAINE | 57 |
| FIGURE 5.19- SECTION TYPE DE LA BRETELLE B2 [44]. | 58 |
| FIGURE 5.20- LOCALISATION DES PRELEVEMENTS DE SEGMENTS DE POUTRES SUR LA BRETELLE B2 [44]. | 59 |

| | |
|---|----|
| FIGURE 5.21- LOCALISATION DES PRELEVEMENTS DE SEGMENTS DE POUTRES ET DE DALLES SUR LA BRETELLE B4 [44] | 59 |
| FIGURE 5.22- ÉTAPE INTERMEDIAIRE POUR LE PRELEVEMENT D'UNE SECTION DE POUTRE DE LA BRETELLE B4 [44] | 60 |
| FIGURE 5.23 - SCHEMATISATION DES LONGUEURS APPARAISSANT AU LE TABLEAU 5.2 | 61 |
| FIGURE 5.24- SEGMENT DE POUTRE B2S3..... | 62 |
| FIGURE 5.25- SEGMENT DE POUTRE B4S3..... | 63 |
| FIGURE 5.26- GROS PLAN SUR LES GAINES A ET B (VOIR FIGURE 5.28) DU SEGMENT DE POUTRE B2S3 | 63 |
| FIGURE 5.27- VUE SUR LE PLAN DE FISSURATION (COTE NORD) DU SEGMENT DE POUTRE B4S3 | 63 |
| FIGURE 5.28- SCHEMATISATION DU SEGMENT DE POUTRE B2S3..... | 64 |
| FIGURE 5.29- SCHEMATISATION DU SEGMENT DE POUTRE B4S3..... | 64 |
| FIGURE 5.30- MESURES EFFECTUEES SUR LA FACE NORD DE LA SECTION DE POUTRE B2S3 | 65 |
| FIGURE 5.31- SEGMENT DE POUTRE B2S4..... | 67 |
| FIGURE 5.32- SEGMENT DE POUTRE B4S4..... | 67 |
| FIGURE 5.33- MICROFISSURATION LE LONG DES GAINES (TRACES HORIZONTAUX) SUR B4S4 | 67 |
| FIGURE 5.34- VUE SUR LES GAINES DE B2S4 | 68 |
| FIGURE 5.35 - SCHEMATISATION DU SEGMENT DE POUTRE B2S4..... | 68 |
| FIGURE 5.36- SCHEMATISATION DU SEGMENT DE POUTRE B4S4..... | 69 |
| FIGURE 5.37- VUE SUR LES ANCRAGES VISIBLES SUR LE SEGMENT DE POUTRE B2S7 | 71 |
| FIGURE 5.38- ANCRAGE SECTIONNE VISIBLE SUR LE SEGMENT DE POUTRE B4S2..... | 71 |
| FIGURE 5.39- SECTION DES ANCRAGES (COTE OPPOSE AUX ANCRAGES) | 72 |
| FIGURE 5.40- DIFFERENTES PARTIES ET CAPTEURS DE L'APPAREIL IMPACT-ECHO | 73 |
| FIGURE 5.41 - SCHEMATISATION DE L'UTILISATION DU DOUBLE CAPTEUR POUR L'ESTIMATION DE LA PROFONDEUR D'UNE FISSURE [39] | 74 |
| FIGURE 5.42- ETUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES D'ECHANTILLONNAGE ET DU CHOIX DE LA BILLE ($N = 2048$) | 78 |
| FIGURE 5.43- COMPARAISON ENTRE UNE MOYENNE SUR X MESURES (EN TIRETS CLAIRS) AVEC LA MOYENNE SUR 50 MESURES (TRAIT FONCE) | 80 |
| FIGURE 5.44 ECART ENTRE LES MOYENNES SUR 15 MESURES (TIRETS CLAIRS) ET 50 MESURES (TRAIT FONCE). | 81 |
| FIGURE 5.45- ECART ENTRE LES MOYENNES SUR 10 MESURES (TIRETS CLAIRS) ET 50 MESURES (TRAIT FONCE). | 81 |
| FIGURE 5.46- ECART ENTRE LES MOYENNES SUR 5 MESURES (TIRETS CLAIRS) ET 50 MESURES (TRAIT FONCE). | 82 |

| | |
|---|-----|
| FIGURE 5.47- COMMANDES..... | 83 |
| FIGURE 5.48- TETE DE L'ENDOSCOPE (OPTIQUE) | 83 |
| FIGURE 5.49- OUTIL D'OBSERVATION A 90°..... | 84 |
| FIGURE 5.50- EXEMPLE DE MESURE IMPACT-ECHO SUR LE DESSUS D'UNE GAINÉ | 86 |
| FIGURE 5.51- MESURES IE EFFECTUEES SUR UN CYLINDRE POUR LES PLAQUES (TRAIT PLEIN) ET UN AUTRE CYLINDRE POUR LES BLOCS (TIRETS-POINTILLES) | 88 |
| FIGURE 5.52- MESURES IE SUR CYLINDRES PRELEVES SUR LES SEGMENTS DE POUTRES | 88 |
| FIGURE 5.53- SCHEMATISATION DES MESURES IE EFFECTUEES SUR LE DESSUS DES PLAQUES..... | 90 |
| FIGURE 5.54- LOCALISATION DES MESURES EFFECTUEES AU-DESSUS DES GAINES POUR LES BLOCS..... | 91 |
| FIGURE 5.55 - EXEMPLE DE PRISE DE MESURE IE SUR LE SEGMENT DE POUTRE B2S3 AU-DESSUS DE LA GAINÉ C..... | 93 |
| FIGURE 5.56 - PERÇAGE D'UN SEGMENT DE POUTRE À L'AIDE D'UNE PERCEUSE HILTI MUNIE D'UNE MÊCHE À BÉTON | 94 |
| FIGURE 6.1- MESURES IE AU-DESSUS DES GAINES SUR LES PLAQUES (2E1TPB2) | 98 |
| FIGURE 6.2- MESURES IE AVEC CAPTEUR 24KHZ AU-DESSUS DES GAINES SUR LES PLAQUES (2E5TPB1) | 102 |
| FIGURE 6.3- MESURES IE EFFECTUEES SUR LES CYLINDRES DE COULIS DE CIMENT FABRIQUES AU LABORATOIRE..... | 105 |
| FIGURE 6.4- RELEVÉ DE MESURES EFFECTUEES AVEC LE CAPTEUR UDES | 107 |
| FIGURE 6.5- CALIBRATION DU CAPTEUR 24 KHZ DE L'UNIVERSITE DE SHERBROOKE | 108 |
| FIGURE 6.6- MESURES IE SUR LES EPAISSEURS DES PLAQUES (2E5TB3) | 109 |
| FIGURE 6.7- POSITIONNEMENT DES MESURES EFFECTUEES SUR LE BLOC B | 112 |
| FIGURE 6.8 - MESURE DE L'EPAISSEUR DU BLOC B EFFECTUEE AUX COTES 15 <i>cm</i> (COTE GAINÉ VIDE) ET 145 <i>cm</i> (COTE GAINÉ PLEINE)..... | 115 |
| FIGURE 6.9- MESURE EFFECTUEE SUR LE BLOC B AU-DESSUS DE LA GAINÉ A 15 <i>cm</i> (GAINÉ VIDE) ET 145 <i>cm</i> (GAINÉ PLEINE)..... | 119 |
| FIGURE 6.10 MESURE EFFECTUEE SUR LE BLOC B SUR LE COTE DE LA GAINÉ A 15 <i>cm</i> (GAINÉ VIDE) ET 145 <i>cm</i> (GAINÉ PLEINE) | 122 |
| FIGURE 6.11- POSITIONNEMENT DES MESURES EFFECTUEES SUR LE BLOC A | 125 |
| FIGURE 6.12- MESURE DE L'EPAISSEUR DU BLOC A SUR SA HAUTEUR EFFECTUEE AUX COTES 15 <i>cm</i> (COTE GAINÉ VIDE) ET 145 <i>cm</i> (COTE GAINÉ PLEINE)..... | 127 |
| FIGURE 6.13 MESURE DE L'EPAISSEUR DU BLOC A SUR SA LARGEUR | 130 |
| FIGURE 6.14- MESURE EFFECTUEE SUR LE BLOC A AU-DESSUS DE LA GAINÉ A 15 <i>cm</i> (GAINÉ VIDE) ET 145 <i>cm</i> (GAINÉ PLEINE)..... | 132 |

| | |
|---|-----|
| FIGURE 6.15- MESURE EFFECTUEE SUR LE BLOC A SUR LE COTE DE LA GAINES A 15 <i>cm</i> (GAINES VIDE) ET 145 <i>cm</i> (GAINES PLEINE) | 135 |
| FIGURE 6.16- POSITIONNEMENT DES MESURES EFFECTUEES SUR LE BLOC C | 137 |
| FIGURE 6.17- MESURE EFFECTUEE SUR LE BLOC C AU-DESSUS DE LA GAINES A A 15 <i>cm</i> (GAINES VIDE) ET 145 <i>cm</i> (GAINES PLEINE) | 139 |
| FIGURE 6.18- MESURE EFFECTUEE SUR LE BLOC C AU-DESSUS DE LA GAINES B A 15 <i>cm</i> (GAINES VIDE) ET 145 <i>cm</i> (GAINES PLEINE) | 142 |
| FIGURE 6.19- MESURE EFFECTUEE SUR LE BLOC C AU-DESSUS DE LA GAINES C A 15 <i>cm</i> (GAINES VIDE) ET 145 <i>cm</i> (GAINES PLEINE) | 145 |
| FIGURE 6.20- MESURE EFFECTUEE SUR LE BLOC C AU-DESSUS DE LA GAINES D A 15 <i>cm</i> (GAINES VIDE) ET 145 <i>cm</i> (GAINES PLEINE) | 146 |
| FIGURE 6.21- RÉSULTATS IE OBTENUS LE LONG D'UNE GAINES REGROUPÉS SUR UN GRAPHIQUE 2D | 148 |
| FIGURE 6.22- RÉSULTATS IE OBTENUS LE LONG D'UNE GAINES REGROUPÉS SUR UN GRAPHIQUE 3D | 149 |
| FIGURE 6.23- RÉSULTATS IE OBTENUS LE LONG D'UNE GAINES REGROUPÉS SUR UN GRAPHIQUE 3D « MIS À PLAT » | 150 |
| FIGURE 6.24- RÉSULTATS OBTENUS LE LONG DE LA GAINES SUIVANT LA MESURE BH | 151 |
| FIGURE 6.25- RÉSULTATS OBTENUS LE LONG DE LA GAINES SUIVANT LA MESURE BB | 152 |
| FIGURE 6.26- RÉSULTATS OBTENUS LE LONG DE LA GAINES SUIVANT LA MESURE CC | 153 |
| FIGURE 6.27- RÉSULTATS OBTENUS LE LONG DE LA GAINES SUIVANT LA MESURE CA | 155 |
| FIGURE 6.28- RÉSULTATS OBTENUS LE LONG DE LA GAINES SUIVANT LA MESURE CB | 156 |
| FIGURE 6.29- PHOTOGRAPHIES TIREES DE L'ENDOSCOPIE DE LA GAINES DU BLOC B..... | 157 |
| FIGURE 6.30- FISSURE OBSERVÉE SUR LA GAINES E DU SEGMENT DE POUTRE B4S4 ENTRE LES CENTIMÈTRES 110 ET 130..... | 160 |
| FIGURE 6.31 - SEGMENT DE POUTRE B4S4 PERCÉ SUIVANT LES DIFFÉRENTS ENDROITS D'ÉTUDE POUR L'ENDOSCOPIE | 161 |
| FIGURE 6.32- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B4S4, GAINES B | 176 |
| FIGURE 6.33- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B4S4, GAINES A | 178 |
| FIGURE 6.34 - RÉSULTATS IE DU SEGMENT B4S4, GAINES C | 180 |
| FIGURE 6.35- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B4S4, GAINES D | 182 |
| FIGURE 6.36- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B4S4, GAINES E | 184 |
| FIGURE 6.37- SURFACE D'ÉTUDE DE LA POUTRE B2S3 | 186 |
| FIGURE 6.38 - SEGMENT DE POUTRE B2S3 PERCÉ EN DIFFÉRENTS ENDROITS D'ÉTUDE POUR L'ENDOSCOPIE | 186 |

| | |
|--|-----|
| FIGURE 6.39- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B2S3, GAINÉ B | 194 |
| FIGURE 6.40- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B2S3, GAINÉ C | 197 |
| FIGURE 6.41- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B2S3, GAINÉ D | 198 |
| FIGURE 6.42- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B2S3, GAINÉ E | 200 |
| FIGURE 6.43- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B4S3, GAINÉ A | 204 |
| FIGURE 6.44- CAROTTES OBTENUES DU SEGMENT DE POUTRE B2S4..... | 205 |
| FIGURE 6.45- RÉCUPÉRATION DE LA GAINÉ E DU SEGMENT DE POUTRE B4S4 | 206 |
| FIGURE 6.46- GAINES RÉCUPÉRÉES SUR LES SEGMENTS DE POUTRE..... | 207 |
| FIGURE 6.47- OUVERTURE DE LA GAINÉ B2S4F DE LA COTE 150 À 210 | 208 |
| FIGURE 6.48- SECTION DE LA GAINÉ B4S4E À LA COTE 110 | 209 |
| FIGURE 6.49- OBSERVATION DE LA QUALITÉ D'INJECTION AUTOUR DES TORONS (GAINÉ B2S4F) | 209 |
| FIGURE 6.50- ZOOM SUR LE « CŒUR » DES TORONS À LA COUPE B4S4E110..... | 210 |
| FIGURE 6.51- DÉCOUPE DE LA GAINÉ B2S3A À LA COTE 120 | 211 |
| FIGURE 6.52- VUE DE L'INTÉRIEUR DE LA GAINÉ B2S3A..... | 211 |
| FIGURE 6.53- ECHANTILLONS DE COULIS RÉCUPÉRÉS À L'INTÉRIEUR DE LA GAINÉ B4S3A ENTRE LES COTES 75 ET 125..... | 212 |
| FIGURE 6.54- ECHANTILLONS DE COULIS DE LA GAINÉ B4S4E ENTRE LES COTES 110 ET 180..... | 213 |
| FIGURE 6.55- OUVERTURE DE DEUX DES ANCRAGES DU SEGMENT DE POUTRE B2S7 | 214 |
| FIGURE 6.56- ARRIÈRE DE L'ANCRAGE SITUÉ EN HAUT DU SEGMENT DE POUTRE B2S7 | 215 |
| FIGURE 6.57- ARRIÈRE DE L'ANCRAGE SITUÉ AU BAS DU SEGMENT DE POUTRE B2S7..... | 215 |
| FIGURE 6.58- TÊTE D'ANCRAGE OUVERTE EN BAS DU SEGMENT B4S1..... | 216 |
| FIGURE 6.59- TÊTE D'ANCRAGE OUVERTE AU BAS DU SEGMENT DE POUTRE B2S2..... | 217 |
| FIGURE 0.1- SURFACE D'ÉTUDE DE LA POUTRE B2S3 | 273 |
| FIGURE 0.2 - SEGMENT DE POUTRE B4S3 : EXTRÉMITÉ DU SEGMENT COTÉ NORD..... | 274 |
| FIGURE 0.3- PLAN DE FISSURATION AU-DESSUS DES GAINES DU BLOC B4S3 | 275 |
| FIGURE 0.4- CLICHÉ DU PLAN DE FISSURATION AU-DESSUS DES GAINES OBTENU PAR ENDOSCOPIE (OBSERVATION À 90°) À LA COTE B85..... | 282 |
| FIGURE 0.5- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B4S3, GAINÉ A | 284 |
| FIGURE 0.6- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B4S3, GAINÉ B | 286 |
| FIGURE 0.7- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B4S3, GAINÉ C | 288 |
| FIGURE 0.8- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B4S3, GAINÉ D | 289 |
| FIGURE 0.9- FISSURES OBSERVÉES SUR LE SEGMENT DE POUTRE B2S4 | 290 |
| FIGURE 0.10- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B2S4, GAINÉ A | 295 |
| FIGURE 0.11- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B2S4, GAINÉ B | 296 |

| | |
|---|-----|
| FIGURE 0.12- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B2S4, GAINÉ C | 297 |
| FIGURE 0.13- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B2S4, GAINÉ D | 298 |
| FIGURE 0.14- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B2S4, GAINÉ E | 299 |
| FIGURE 0.15- RÉSULTATS IE DU SEGMENT B2S4, GAINÉ F..... | 300 |
| | |
| FIGURE A- ICONE DU PROGRAMME IMPACT-E | 250 |
| FIGURE B- ECRAN PRINCIPAL DU PROGRAMME IMPACT-E | 251 |
| FIGURE C- ECRAN DE CREATION OU D'OUVERTURE D'UN FICHIER DE DONNEES..... | 251 |
| FIGURE D- ECRAN DES PARAMETRES D'ACQUISITION DES DONNEES | 252 |
| FIGURE E- VUE SUR LE BOUTON POUSSOIR (AU NIVEAU DU POUCE DE L'UTILISATEUR) SUR LE CAPTEUR « DROIT »..... | 253 |
| FIGURE F- ECRAN D'ACQUISITION DES MESURES | 254 |
| FIGURE G- ECRAN DE SAUVEGARDE DE LA MESURE | 255 |
| FIGURE H- ECRAN PRINCIPAL DE LA SAUVEGARDE DES FICHIERS SOUS UN NOUVEAU FORMAT | 256 |
| FIGURE I- ECRAN DE SAUVEGARDE DES FICHIERS .XLS | 256 |

Introduction

Le Québec compte environ 12 000 ponts dont un peu plus de 9 300 sont gérés par le Ministère des Transports du Québec (MTQ). Ces ponts comprennent l'ensemble du réseau routier municipal des municipalités de moins de 100 000 habitants et le réseau routier supérieur. Sur l'ensemble des ponts gérés par le MTQ, il a été recensé qu'environ 50% des ouvrages étaient déficients (chiffres 2005 [1]). Cela n'implique pas forcément qu'ils sont hors d'usage. Pour la plupart de ces ponts, la déficience qualifie la nécessité de réparer l'ouvrage d'ici les cinq prochaines années et non un péril immédiat. Cette situation provient de l'âge du parc d'infrastructures routières (figure 1). En effet, à partir de la fin des années 1940, l'évolution de l'industrie, des moyens et des techniques de construction a permis de développer rapidement le réseau routier existant. Actuellement, un nombre important de ces structures a atteint ou dépasse les 40 années de vie pour lesquelles elles ont été conçues. Il n'est donc pas étonnant d'inventorier autant d'ouvrages déficients. Dans ce mémoire, une attention plus particulière est portée aux ouvrages en béton précontraint dont la mise en œuvre a été développée au cours des années 1950-1980.

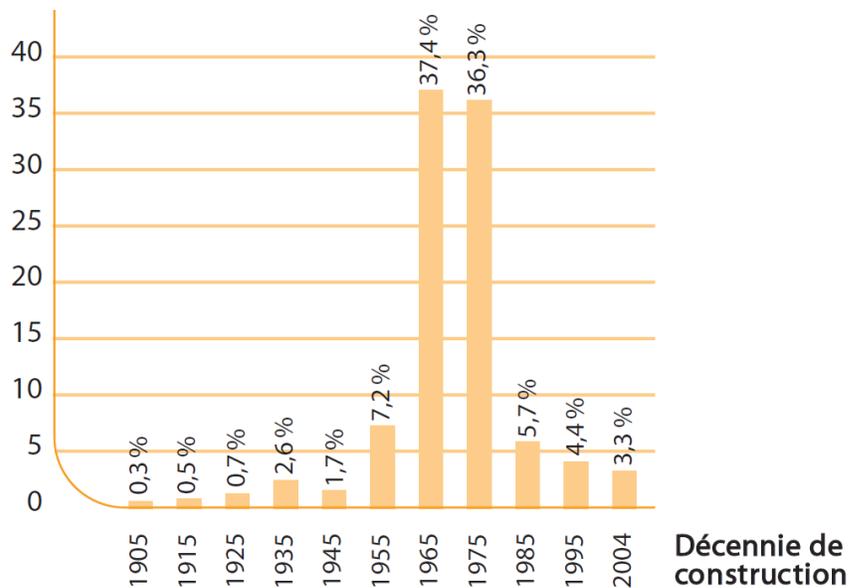


Figure 1- Distribution de la valeur des structures par décennie de construction (en %) [2]

Les structures se détériorent dès leur mise en service. Outre le vieillissement usuel, cette dégradation a été accentuée par l'augmentation des charges routières (poids et fréquence) et par l'emploi de sels dégelants. Cette dégradation est constatée le plus souvent lors d'inspections effectuées périodiquement sur les ouvrages (une fois par an environ). Ces contrôles sont effectués dans le but de garantir la fiabilité des structures, la sécurité du public mais aussi de prolonger la vie utile des structures. Ces activités d'inspection permettent de récolter des informations pour la planification d'interventions futures afin de diminuer les coûts afférents à des réparations importantes ou à une reconstruction (partielle ou totale).

L'auscultation de la précontrainte par post-tension interne des ponts (type d'ouvrage très répandu) est donc primordiale mais est encore très difficile. Effectivement, la spécificité de la post-tension interne consiste techniquement en des câbles d'acier noyés dans du coulis de ciment à l'intérieur de gaines (le plus souvent métalliques) situées à l'intérieur de la masse de béton entre les aciers passifs. L'inaccessibilité des câbles pour leur inspection oblige le recours à une auscultation destructive par fenêtrage ou perçage. Il s'agit d'opération délicates qui ne doivent pas entraîner de blessures aux câbles et qui doivent être menées avec minutie lors de l'obturation des ouvertures réalisées afin d'éviter toute infiltration d'eau dans le futur. Dans ce contexte, le recours à des méthode d'évaluation non destructive (END) semble être une alternative intéressante qui ce doit d'être examiné.

Les méthodes non destructives, débutées dans les années 1970, sont toujours en développement. Plusieurs chercheurs ont participé activement à leur progrès tels que Nicholas J. Carino et Mary J. Sansalone qui sont des références dans le monde de l'auscultation END des bétons. De plus, plusieurs centres de recherche tels que le GRAI (Groupe de Recherche en Auscultation et Instrumentation) de l'Université de Sherbrooke et le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) de Nantes poursuive la recherche dans ce domaine. Le nombre de méthodes d'auscultation non destructive est important. Certaines sont d'ailleurs utilisées couramment mais ne sont pas adaptées à l'auscultation l'intérieur des gaines de post-contrainte. L'ouvrage [3] de N.J. Carino rassemble d'ailleurs la plupart des méthodes (ou du moins les familles de méthodes) existant à l'heure actuelle.

Le but de cette recherche est donc d'étudier les différentes méthodes d'auscultation END qui peuvent être utilisées dans le cas de la post-tension afin de déterminer laquelle (ou lesquelles) serait la plus pertinente et d'établir un protocole de mesures adapté à l'auscultation de la précontrainte par post-tension interne.

Ce mémoire s'articule de la façon suivante : après une recherche bibliographique sur les différentes méthodes END appliquées aux structures en post-tension (chapitre 1), les objectifs de l'étude effectuée sont présentés au chapitre 2 ; par la suite, les chapitres 3 et 4 présentent les 2 méthodes sélectionnées pour l'étude. Enfin, les deux dernières parties du mémoire présentent les essais réalisées (chapitre 5) et les résultats qui en découlent (chapitre 6).

1. Etat des connaissances sur les méthodes END

Les méthodes END sont privilégiées aux méthodes d'évaluation destructive (ED) en raison de leur caractère non destructif. De plus, les mesures associées à ces méthodes peuvent être réalisées sur une zone plus étendue de la structure, en comparaison par exemple avec un carottage ponctuel.

De nombreuses méthodes non destructives sont utilisées en général. Toutefois, aucune méthode n'est établie comme parfaite et chacune détecte une gamme de défauts. De plus, une méthode END s'utilise rarement sur l'ensemble d'une structure en raison de sa mise en œuvre ou des limites d'application. Par exemple, certaines techniques nécessitent d'avoir accès aux deux côtés de l'élément ausculté ou encore ne peuvent être utilisés sur des surfaces verticales. C'est pourquoi, il est impératif de connaître quels défauts sont à observer pour choisir la méthode END à appliquer puisque chaque méthode a son domaine d'application et ses limites.

1.1. Défauts rencontrés sur les ponts en béton précontraints

Un pont en béton précontraint par post-tension interne est un ouvrage complexe. Durant toute son utilisation, l'ensemble des matériaux le composant vont évoluer. Ainsi, des défauts peuvent apparaître en raison de différents phénomènes tels que les variations de température journalière ou saisonnière ou encore l'augmentation incessante des charges d'utilisation (trafic routier) sur l'ouvrage.

Comme tous les ouvrages en béton armé, les ponts en béton précontraint peuvent présenter différents défauts. Ceux-ci peuvent être présents dès le début de la vie de l'ouvrage en raison de défauts de mise en œuvre ou bien apparaître plus tard en raison de la dégradation du béton, donnant lieu à du délaminage ou des fissures, ainsi que la corrosion de l'acier présent dans la structure.

Aussi, la présence de gaines de précontrainte augmente le nombre de défauts pouvant empêcher l'utilisation en service d'un ouvrage. Effectivement, si une gaine de précontrainte

est endommagée, alors seul le coulis de ciment présent dans la gaine continuera à protéger les câbles d'acier contre la corrosion. Ainsi, il est important de pouvoir vérifier le bon remplissage en coulis des gaines mais aussi sa qualité. De plus, il faut pouvoir constater le niveau de corrosion des câbles de précontrainte dans la gaine.

La figure 1.1 jumelée au tableau 1.1 récapitule l'ensemble des problèmes pouvant survenir sur un ouvrage en béton précontraint. Cette recherche portant sur l'état de la précontrainte, les deux sections 1.1.1 et 1.1.2 présentent plus en détail les problèmes rencontrés à ce niveau.

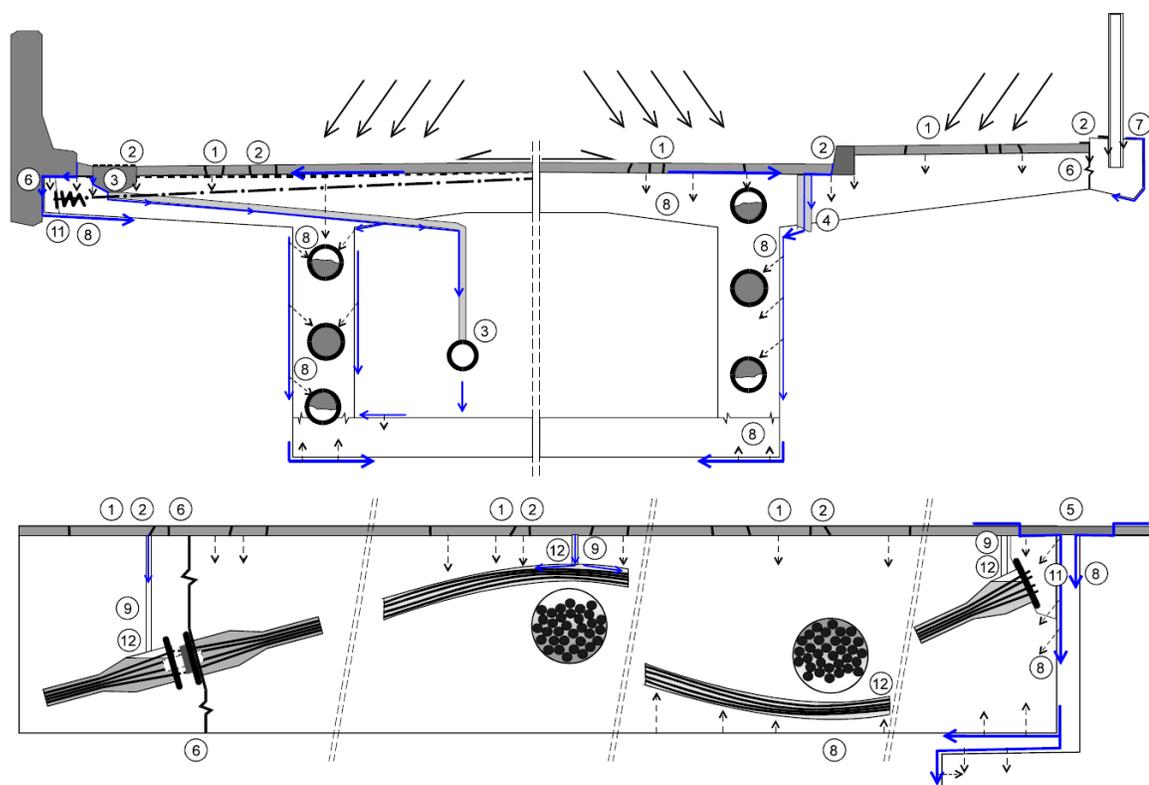


Figure 1.1- Risques potentiels de détérioration dans une structure en béton précontraint par post-tension [4] (annotations tableau 1.1)

Tableau 1.1- Liste des problèmes pouvant être rencontrés dans une poutre caisson de pont

| Eléments non structuraux | Corrosion du système de protection |
|--|--|
| 1. Couche de revêtement défectueuse | 8. Recouvrement de béton défectueux |
| 2. Membrane imperméable défectueuse ou manquante | 9. Entrées et sorties des ouvertures de mise en place du coulis de ciment partiellement ou totalement ouvertes |
| 3. Canalisations et prises défectueuses | 10. Fuite et endommagement des gaines métalliques mécaniquement ou par corrosion |
| 4. Mauvais placement des évacuations d'eau | 11. Poches de béton fissuré et poreux |
| 5. Fuite des joints d'expansion | 12. Vides de coulis de ciment aux points hauts et bas des gaines |
| 6. Fissuration ou fuites des joints de l'ouvrage | |
| 7. Inserts (pour les câbles électriques) | |

1.1.1. Mauvais remplissage des gaines

Lors de la construction, les gaines sont remplies de coulis de ciment afin de protéger de la corrosion l'acier de précontrainte. Lors de l'auscultation d'ouvrages de ce type, il a été constaté que le coulis de ciment n'a pas toujours été correctement injecté. Les problèmes de remplissage peuvent provenir de plusieurs raisons : mauvaise technique d'injection, mauvaise qualité du produit de remplissage, mauvais matériel d'injection, etc. Un mauvais remplissage mène à la présence de vides de coulis qui ne permet plus la protection contre l'eau et les agents agressifs.

Certaines techniques d'auscultation non destructives sont employées afin de déterminer les vides de coulis. Il est courant que des méthodes destructives soient utilisées ponctuellement afin de valider les résultats d'une méthode END.

1.1.2. Détérioration de l'acier de précontrainte

Les câbles et torons sont les pièces qui assurent la précontrainte dans l'ouvrage. Il est donc primordial que ceux-ci restent en bon état. Malheureusement, la pénétration d'agents agressifs et d'eau peuvent entraîner leur corrosion. Fragilisés par ce phénomène ainsi que par les nombreux cycles de fatigue, il arrive que les câbles se fissurent allant même jusqu'à leur rupture.

Les gaines métalliques ont deux rôles principaux : garantir l'adhérence du câblage avec l'élément de béton afin d'assurer le transfert des efforts de précontrainte et aider à la mise en œuvre de la précontrainte par post-tension. De plus, la gaine permet aussi d'ajouter une protection à l'intrusion des agents agressifs et de l'eau à proximité de l'acier de précontrainte en plus du béton et du coulis de ciment.

Les ancrages sont aussi des zones propices à la corrosion qu'il faut protéger adéquatement. Les dangers de corrosion apparaissant au niveau des ancrages arrivent quand la protection est mal posée ou encore, lorsqu'après une auscultation d'ancrage, l'ouverture est mal refermée.

Etant donné le positionnement dans l'ouvrage, il est difficile d'observer l'état de l'acier de précontraint. Afin de faciliter leur auscultation, des méthodes END ont été développées et appliquées aux ouvrages en post-tension.



Figure 1.2- Gaine sévèrement corrodée dont l'acier avait commencé à se corroder [5]

1.2. Recensement des méthodes END existantes appliquées aux ouvrages précontraints par post-tension interne

Dans le tableau 1.2, les méthodes END les plus utilisées pour l'auscultation des ponts en béton ont été regroupées. On y décrit le principe de chaque méthode, ce qu'elle permet de détecter ainsi que ses principales limites. Il est possible d'obtenir plus d'informations sur ses méthodes dans la référence [6].

Tableau 1.2- Liste des méthodes appliquées aux ouvrages en post-tension

| Méthode <i>Références</i> | Principe | Aptitudes | Limites | Rapidité <i>Coût</i> |
|---------------------------------------|---|--|--|--|
| Radiographie <i>[7] [8]</i> | Radiographie du béton (par rayons gamma ou X) | <ul style="list-style-type: none"> • Imagerie obtenue identique à la réalité du squelette de l'ouvrage et des vides (dont à l'intérieur des gaines) | <ul style="list-style-type: none"> • Demande une protection accrue de l'environnement et des techniciens • Mise en place des appareils parfois difficile | Lent (zone de mesure très limitée) <i>Elevé</i> |
| Chain drag <i>[9]</i> | Chaînes trainées le long d'une surface. Détection des défauts en fonction du bruit créé par le frottement | <ul style="list-style-type: none"> • Simplicité • Localisation du délaminage précise | <ul style="list-style-type: none"> • Limité aux surfaces supérieures • Très subjectif • Influencé par le revêtement | Moyen <i>Bas</i> |
| Coin tap test <i>[9]</i> | Marteau frappé à la surface dont le son ressortant indique la présence de défaut | <ul style="list-style-type: none"> • Simplicité • Localisation du délaminage précise | <ul style="list-style-type: none"> • Très subjectif | Lent (point par point) <i>Bas</i> |
| Ondes guidées (EA) <i>[7] [10]</i> | Mesure des ondes réfléchies par les défauts sur un câble de précontrainte | <ul style="list-style-type: none"> • Rupture, fissuration des câbles de précontrainte | <ul style="list-style-type: none"> • Très limité | Lent (mesure fil par fil) <i>Moyen</i> |

Tableau 1.2 (suite)- Liste des méthodes appliquées aux ouvrages en post-tension

| Méthode <i>Références</i> | Principe | Aptitudes | Limites | Rapidité <i>Coût</i> |
|---|---|--|--|--|
| Impact-écho [11, 12] | Mesure de la propagation des ondes réfléchies à basse fréquence | <ul style="list-style-type: none"> • Détermination de l'épaisseur d'une pièce • Détection des défauts dans la matrice de béton | <ul style="list-style-type: none"> • Limitation de la méthode lorsqu'il y a un revêtement d'asphalte • Résultats complexes | Lent (point par point) <i>Moyen</i> |
| Ultrason (Vitesse d'une impulsion ultrasonore / Tomographie ultrasonore) [4] [13] | Mesure de la propagation des ondes ultrasonores traversant le béton | <ul style="list-style-type: none"> • Vérifier l'homogénéité du béton, la présence de fissure ou de vides • Déterminer la résistance du béton | <ul style="list-style-type: none"> • Nombre de capteurs importants pour une seule mesure • Difficulté d'interprétation des résultats (tomographie) | Lent (pont par point) <i>Moyen</i> |
| Pachomètre [14] [15] | Induction d'un champ magnétique et détection des perturbations causées par les armatures de surface | <ul style="list-style-type: none"> • Détermination de la position et du diamètre de l'acier passif et de la position des gaines métalliques • Estimation de la corrosion de l'acier passif | <ul style="list-style-type: none"> • Détection limitée à de petites profondeurs | Rapide <i>Bas</i> |
| Radar [16] [17] [18] | Propagation d'ondes radio électromagnétiques à travers le béton et récupération de l'écho du signal | <ul style="list-style-type: none"> • Cartographie du squelette de l'ouvrage • Détermination de l'épaisseur des pièces • Vérification de l'homogénéité du béton | <ul style="list-style-type: none"> • Une densité d'acier passif importante affectera la profondeur des mesures | Rapide (pour de grandes surfaces) <i>Moyen</i> |

Tableau 1.2 (suite)- Liste des méthodes appliquées aux ouvrages en post-tension

| Méthode <i>Références</i> | Principe | Aptitudes | Limites | Rapidité <i>Coût</i> |
|---|---|--|---|--|
| Magnétisme rémanent <i>[19] [20] [5]</i> | Saturation des aciers de précontrainte en champs magnétique et mesure des fuites de champ | <ul style="list-style-type: none"> • Détection des défauts sur des câbles de post-contrainte interne | <ul style="list-style-type: none"> • Une densité d'acier passif importante et le nombre de câble affectera la profondeur des mesures | Moyen <i>Elevé</i> |
| Thermographie <i>[21] [22]</i> | Mesure du gradient thermique occasionné dans le béton par une variation de température | <ul style="list-style-type: none"> • Localisation des défauts dans le béton • Interaction minimale sur le trafic routier | <ul style="list-style-type: none"> • Détection à proximité de la surface et aucune donnée sur la profondeur du défaut • Astreint aux conditions environnementales | Très rapide <i>Moyen</i> |
| Monitoring (Emissions Acoustiques - EA) <i>[23]</i> | Mesure de l'énergie relâchée lors de la rupture d'un câble | <ul style="list-style-type: none"> • Localisation et détection des ruptures en temps réel | <ul style="list-style-type: none"> • Nombre de fracture indéterminé avant la mise en place du système | Continu dans le temps <i>Elevé</i> |
| Potentiel de corrosion (demi-pile) <i>[24] [25] [26]</i> | mesure de la différence de potentiel entre différents points de la surface du béton et l'acier d'armature | <ul style="list-style-type: none"> • Evaluation des zones potentielles de corrosion | <ul style="list-style-type: none"> • Qualité des résultats dépendant des propriétés de conduction du revêtement | Moyen <i>Elevé</i> |
| Essai de polarisation linéaire <i>[24] [27]</i> | le courant de corrosion mesuré est un indicateur du taux de corrosion | <ul style="list-style-type: none"> • Evaluation du taux de corrosion des armatures | <ul style="list-style-type: none"> • Pas de résultat si présence d'un revêtement | Lent (point par point) <i>Elevé</i> |
| Résistivité électrique <i>[28] [29]</i> | mesure de la résistance électrique du matériau | <ul style="list-style-type: none"> • Détection des zones à forte teneur en humidité et à forte teneurs en ions | <ul style="list-style-type: none"> • Qualité des résultats dépendante de l'espacement entre les électrodes | Lent (point par point) <i>Elevé</i> |

Parmi toutes ses méthodes, il faut déterminer laquelle sera la plus judicieuse à choisir pour le protocole d'auscultation. Les méthodes END sont utilisées pour des domaines spécifiques (acier, béton,...) lors de l'auscultation d'une structure. Mais une méthode utilisée pour quantifier la dégradation du béton, par exemple, ne sera pas aussi effective pour l'étude de la corrosion des barres d'acier. Ainsi, pour chaque domaine, différents défauts ou caractéristiques sont définis au tableau 1.3 et la figure 1.3 récapitule les domaines de détection de chaque méthode recensée dans cette recherche bibliographique.

Tableau 1.3- Défauts ou caractéristiques détectés par domaine

| Caractéristiques | Béton | Acier passif | Post-tension |
|------------------------------------|--------------------------------|---------------------|------------------------|
| Epaisseur de la pièce | Fissures | Corrosion | Vides de coulis |
| Epaisseur de recouvrement | Vides | Détection | Corrosion des câbles |
| Positionnement de l'acier passif | Délaminage | | Fissuration des câbles |
| Positionnement des défauts | Homogénéité | | Rupture des câbles |
| Positionnement de la précontrainte | Détermination de la résistance | | |
| | Forte teneur en humidité | | |
| | Amas de granulat | | |

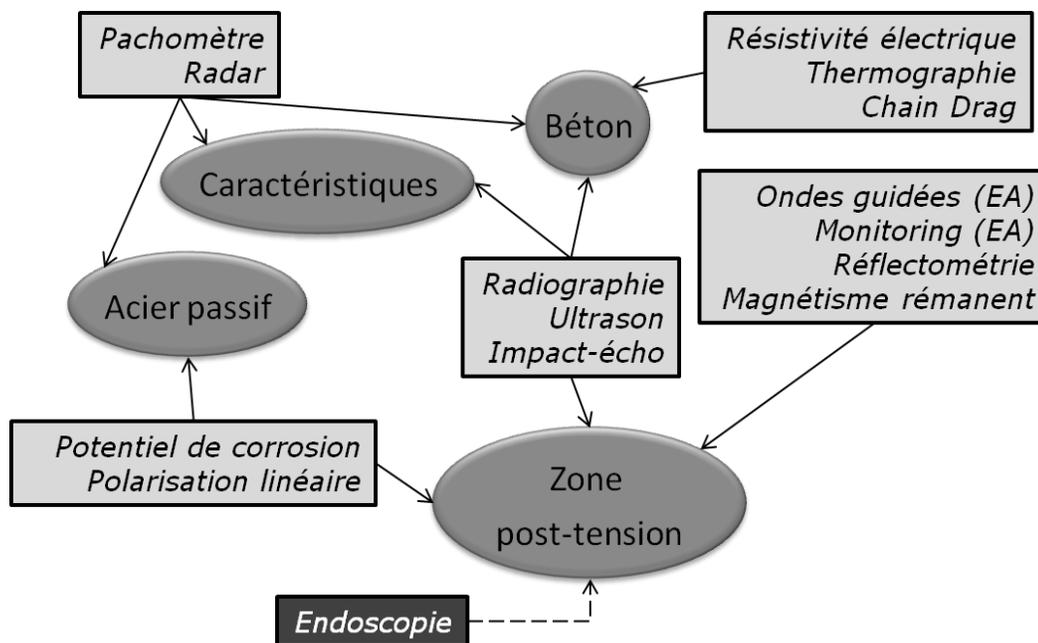


Figure 1.3- Domaines de détection des méthodes END

Note : l'endoscopie ajoutée sur la figure est une méthode qualifiée de semi-destructive mais est fortement utilisée pour l'auscultation de la post-tension interne

1.3. Choix de la méthode la mieux adaptée

Sur l'ensemble des méthodes citées ci-dessus, toutes ne sont donc pas adaptées à l'auscultation de la post-tension interne. Parmi les 9 méthodes qui sont liées au domaine de la post-tension sur la figure 1.3, le choix d'une méthode END à utiliser est fait suivant la meilleure application pour l'étude de l'état de la post-tension interne.

Ainsi, les méthodes de mesure du potentiel de corrosion, de mesure de la résistance de la polarisation linéaire du béton et des ondes guidées (par émission acoustique) ont été écartées en raison de leur application très limitée en profondeur. Ensuite, la méthode du magnétisme rémanent a aussi été mise de côté car elle est encore à l'état expérimental et qu'il n'existe pas d'appareillage existant dans l'industrie pour le moment. La méthode de mesure en continu (monitoring) a du être écartée car elle ne permet pas de connaître le nombre de fractures des câbles de post-tension apparu avant la pause des instruments de mesure. Quant à la radiographie, elle a été mise de côté en raison des importants dispositifs

de sécurité à mettre en place afin de protéger la main d'œuvre, et toute personne avoisinant le site, des rayons émanant de la radiographie. Pour finir, les méthodes par ultrason demandant un nombre important de points de mesures pour chaque essai et par conséquent un temps important de mise en œuvre ont également été écartées.

Suite à l'élimination successive de ces méthodes due à leur domaine d'application ou limitations, la méthode impact-écho se présente comme une méthode END présentant un potentiel intéressant pour l'auscultation de la post-tension.

Afin de confirmer les résultats issus de cette méthode, il a été choisi de la combiner à une seconde méthode d'investigation dite « semi-destructive » : l'endoscopie. Cela consiste à percer des trous de petit diamètre jusqu'aux gaine et d'en inspecter l'intérieur à l'aide d'une caméra à fibre optique.

2. Hypothèse et objectifs

Dans le présent document, le protocole de mesures lié à l'auscultation de la précontrainte par post-tension est passé sur deux méthodes : une première non destructive qui permet d'évaluer la post-tension de l'ouvrage dans son ensemble sans le dégrader et une seconde, cette fois destructive, qui permet de vérifier les résultats issus de la première méthode de façon ponctuelle et ainsi d'augmenter le nombre d'informations obtenues sur l'état de la post-contrainte. Le tandem impact-écho et endoscopie semble le duo le plus approprié pour l'auscultation de la post-contrainte interne.

Afin de confirmer cela, cette recherche portera plusieurs parties qui seront divisées suivant trois objectifs premiers :

- Appliquer la méthode impact-écho sur des segments de poutres à disposition pour les essais ;
- Vérifier l'exactitude des résultats obtenus par impact-écho rapidement par endoscopie ;
- Vérifier l'exactitude des résultats obtenus à l'aide des méthodes combinés par des essais destructifs.

Un retour plus précis sur les méthodes impact-écho et endoscopie sont fait aux chapitres 3 et 4 respectivement. Par la suite, les expérimentations effectuées sont présentées au chapitre 5 suivit des résultats discutés au chapitre 6.

3. La méthode impact-écho

Développée à partir des années 1980, la méthode impact-écho repose sur l'analyse fréquentielle de la réponse d'une structure ou d'un élément de structure soumis à un choc. Cette méthode est bien adaptée à la mesure d'épaisseur de dalles et à la recherche de délaminage ou à la détection de contrastes d'impédance mécanique de l'élément étudié.

3.1. Propagation des ondes dans le béton

Il existe trois types d'ondes de contrainte, ou ondes mécaniques, qui se propagent dans le béton lorsque ce dernier est soumis à un impact. L'onde de Rayleigh, très énergétique, est une onde de surface dont l'amplitude décroît exponentiellement avec la profondeur. Contrairement à l'onde de Rayleigh (onde-R), les ondes de compression (onde-P pour Pressure ou « Primary wave ») et de cisaillement (onde-S pour Shear ou « Secondary wave ») se propagent dans le volume. Ces ondes sont réfléchies lorsqu'elles rencontrent un milieu de densité différente. Ceci survient dans un matériau homogène, lorsqu'il y a présence d'un défaut de dimension suffisante ou au contact du fond de la pièce étudiée.

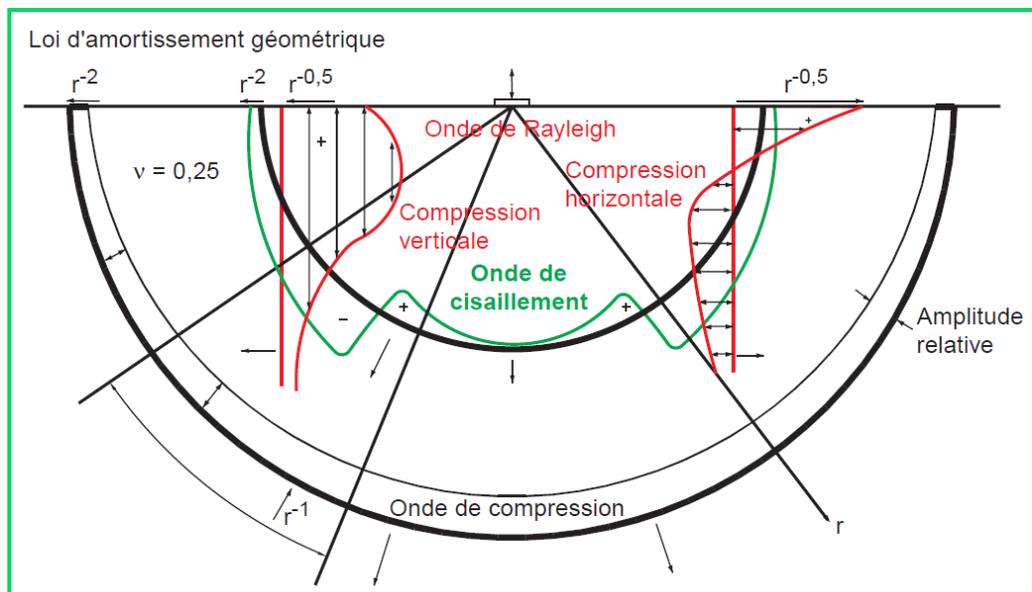


Figure 3.1- Ondes générées par un impact à la surface d'un matériau semi-infini, homogène et élastique isotrope [30]

Sur la figure 3.1, on peut observer la propagation des ondes dans un matériau idéal. De haut en bas, les ondes de compression verticale et horizontale sont les ondes de Rayleigh, suivent les ondes-S et les ondes-P.

Les ondes-P se propagent beaucoup plus rapidement dans le matériau que les ondes-S (rapport de vitesse relative de 0,62 entre les 2 types d'ondes [31]). Ce sont ces premières qui sont étudiées durant les mesures d'impact-écho puisqu'elles sont enregistrées plus rapidement. Il faut noter que les ondes de compression (ondes-P) peuvent, à l'interface entre deux milieux, devenir des ondes de tension et inversement. Ceci est important quant à l'interprétation des mesures. La section 3.2.4 du présent document donne plus de détail à cet égard.

3.2. Principe et fonctionnement de la méthode

3.2.1. Le b.a.-ba

Comme son nom l'indique, la méthode impact-écho consiste à produire un impact (à l'aide d'une bille métallique ou d'un marteau) et d'étudier l'écho qui en résulte. C'est l'étude des ondes-P qui est effectuée ici car elles traversent l'épaisseur de la pièce et sont plus rapides que les ondes-S. De plus, l'impact et la mesure d'ondes sont effectués sur la même surface de la pièce (cf. figure 3.2) ce qui facilite son application *in-situ*.



Figure 3.2- Exemple de mesure par la méthode impact-écho

L'originalité de cette méthode est de travailler dans le domaine des basses fréquences (cf. figure 3.3), c'est-à-dire en dessous de 100 kHz, ce qui permet de ne pas être gêné par les

discontinuités internes (voir le sous-chapitre 3.2.3). Un transducteur est utilisé pour détecter les échos des ondes propagées dans le béton et le signal récupéré est traité par Transformée de Fourier Rapide (FFT : Fast Fourier Transform).

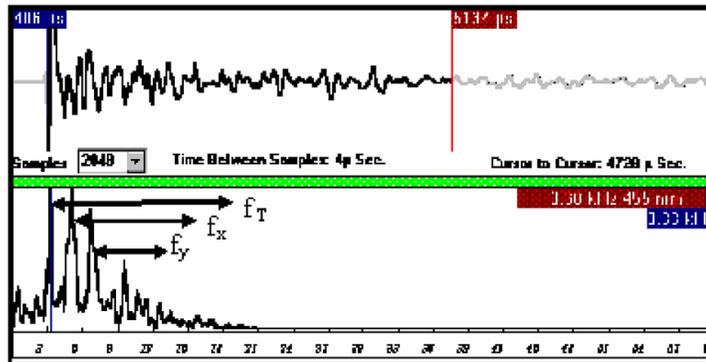


Figure 3.3- Exemple de signal étudié avec l'impact-écho [11].

L'utilisation de la méthode impact-écho est répandue car elle est régie par une simple équation reliant la vitesse de propagation des ondes dans un matériau v_p , la distance parcourue par l'onde ($2D$) et le temps t que met l'onde à faire se parcourt (figure 3.4).

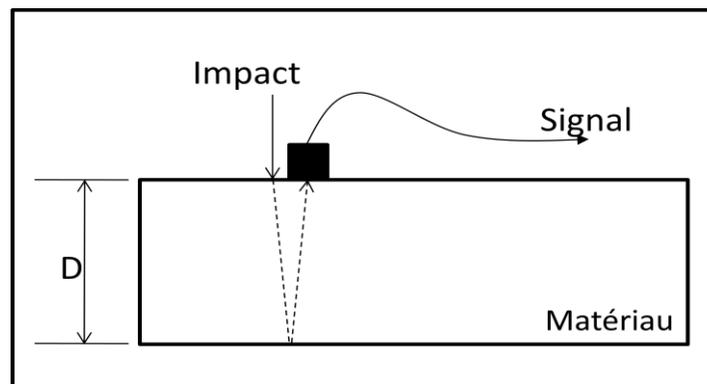


Figure 3.4- Schématisation du principe de base de l'impact-écho

Par relation entre les unités des trois variables : mètre par seconde pour v_p , mètre pour d et seconde pour t , on peut établir l'équation suivante :

$$v_p = \frac{2D}{t} \quad (3.1)$$

où v_p est exprimé en mètre par seconde, D en mètre et t en seconde.

Or, les fréquences étant liées au temps par la relation $f = 1/t$, la relation (3.1) peut se réécrire sous la forme suivante :

$$f = \frac{v_p}{2D} \quad (3.2)$$

Etant donné que la forme de la pièce étudiée est aussi une caractéristique importante (puisqu'elle agit sur la réflexion de l'onde), un coefficient multiplicateur β est ajouté comme correcteur de forme. La valeur de β sera abordée aux sections 3.3 et 0.

L'équation (3.3) est donc l'équation fondamentale caractérisant les relevés de mesure par impact-écho :

$$f = \frac{\beta v_p}{2D} \quad (3.3)$$

De façon générale, l'analyse en fréquence d'un signal temporel rend l'interprétation de ce signal plus aisée. La figure 3.3 permet de faire ce même constat. Dans la partie du haut est représenté le signal dans le temps alors que la partie du bas représente le signal après traitement. Dans ce dernier cas, des fréquences caractéristiques sont clairement identifiées. Ici, f_T est la fréquence image de l'épaisseur de la pièce étudiée tandis que f_x et f_y sont les images de défauts ou d'harmoniques de f_T .

3.2.2. Choix du projectile pour générer l'impact

Pour générer l'impact lors d'un essai impact-écho, plusieurs billes métalliques de différent diamètre peuvent être utilisées. Ces billes sont généralement fournies par la compagnie vendant l'appareillage impact-écho bien que l'utilisateur ait le loisir de choisir tout générateur d'impact qui lui convient. Un exemple est donné sur la figure 3.5 avec un éventail de 10 billes allant de 3 à 19 mm de diamètre.

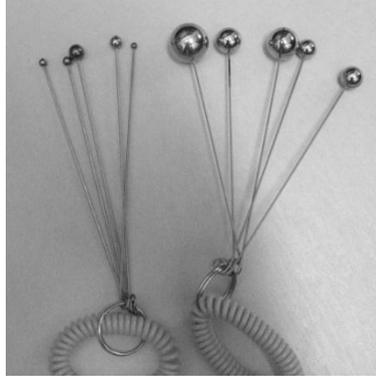


Figure 3.5- Billes de différents diamètres

La taille de la bille est une caractéristique importante car elle régit le domaine de fréquence sur lequel vont être obtenus les résultats [31]. En effet, le temps de contact t_c de la bille sur la surface étudiée au moment de l'impact dépend du diamètre d de la bille : plus le diamètre est important, plus t_c sera important (figure 3.6). Or, le temps de contact va définir la quantité d'énergie cinétique transmise au béton lors de l'impact. C'est cette énergie qui produit les ondes de contrainte dans la pièce de béton et, par conséquent, l'étendue des fréquences pouvant être détectées (figure 3.7).

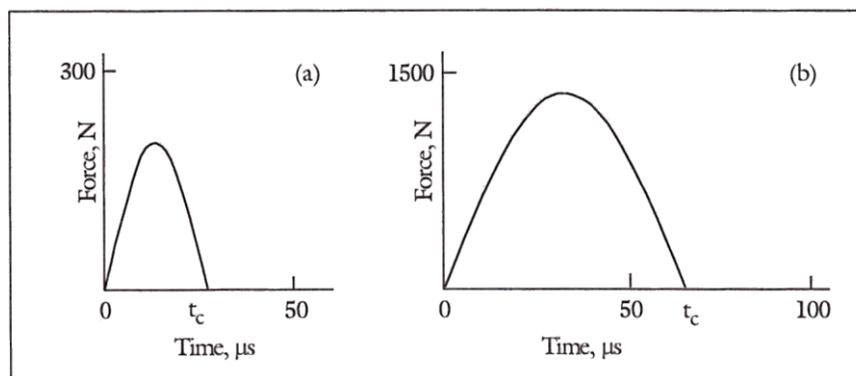


Figure 3.6- Comparaison des temps de contact t_c pour une bille de 6 mm de diamètre (a) et une bille de 16 mm de diamètre (b) [31]

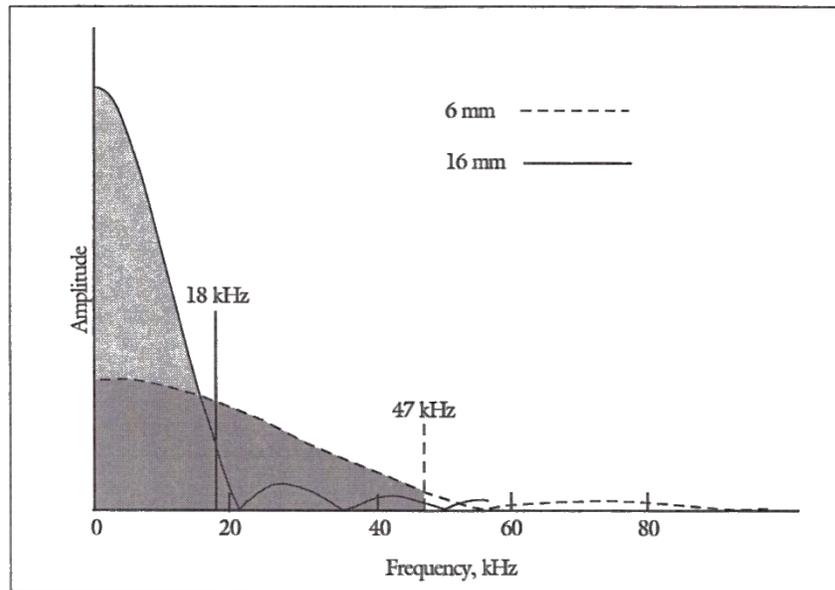


Figure 3.7- Comparaison de la valeur de f_{max} obtenu pour la bille de 6 mm de diamètre et la bille de 16 mm de diamètre [31]

Le temps d'impact d'une bille et la fréquence maximale pouvant être identifiée sont régis par les relations suivantes :

$$t_c = 0,0043 \times d \quad (3.4)$$

$$f_{max} = \frac{1,25}{t_c} \quad (3.5)$$

t_c est en seconde, d en mètre et f_{max} en Hertz.

La combinaison de ces deux relations permet d'obtenir :

$$f_{max} = \frac{291}{d} \quad (3.6)$$

Cette dernière équation permet de choisir la bille utilisée pour l'impact en fonction de la gamme de fréquence que l'on souhaite étudier.

3.2.3. Importance de la longueur d'onde λ

La longueur d'onde λ (en mètre) définit la taille minimum du défaut détecté. Elle est fonction de la vitesse de propagation des ondes v_p (en mètre par seconde) et de la fréquence étudiée f (en Hertz) :

$$v_p = f\lambda \quad (3.7)$$

Ainsi, à chaque fréquence étudiée, seuls certains détails seront détectés en fonction de leur dimension et de leur profondeur. Effectivement, on peut observer dans le tableau 3.1 que plus la fréquence observée est faible, plus la longueur d'onde est importante.

Tableau 3.1- Longueur d'onde caractéristique en fonction de la fréquence étudiée pour une vitesse de propagation dans le béton de 4000 m/s

| Fréquence (kHz) | Longueur d'onde (m) |
|-----------------|---------------------|
| 1 | 4,0 |
| 10 | 0,4 |
| 50 | 0,2 |
| 100 | 0,04 |

L'examen du tableau 3.1 montre que la longueur d'onde ne devient pas inférieure au centimètre. Cette constatation indique que la microstructure du béton (microfissure, zone interstitielle,...) ne peut pas créer d'interférence dans les résultats. Il s'agit là d'un atout majeur de la méthode impact-écho qui œuvre dans le domaine des basses fréquences ($f \leq 100 \text{ kHz}$).

3.2.4. Interfaces et impédances

En premier lieu, il s'agit de préciser ce que l'on appelle interface et impédance :

- Interface : limite entre deux milieux dont les impédances diffèrent ;

- Impédance, ou plus précisément impédance acoustique Z : paramètre caractérisant le matériau qui consiste en la densité (en kg/m^3) du matériau multipliée par la vitesse de propagation des ondes (en m/s) dans ce même matériau.

L'impédance caractérise donc la propagation des ondes dans un matériau. Or, à chaque interface de deux matériaux (par exemple béton/air), il y a changement dans les impédances. Cela crée une « dispersion » des ondes dont une certaine quantité va être réfléchi à l'interface tandis que le reste sera transmis dans le matériau suivant (voir figure 3.8 A).

Il faut aussi prendre en compte le fait que les ondes-P et -S qui se propagent dans un matériau créent de nouvelles ondes à chaque interface. Ce qui veut dire qu'une onde-P réfléchira et transmettra une onde-P ainsi qu'une onde-S (figure 3.8 B). Il en est de même pour une onde-S.

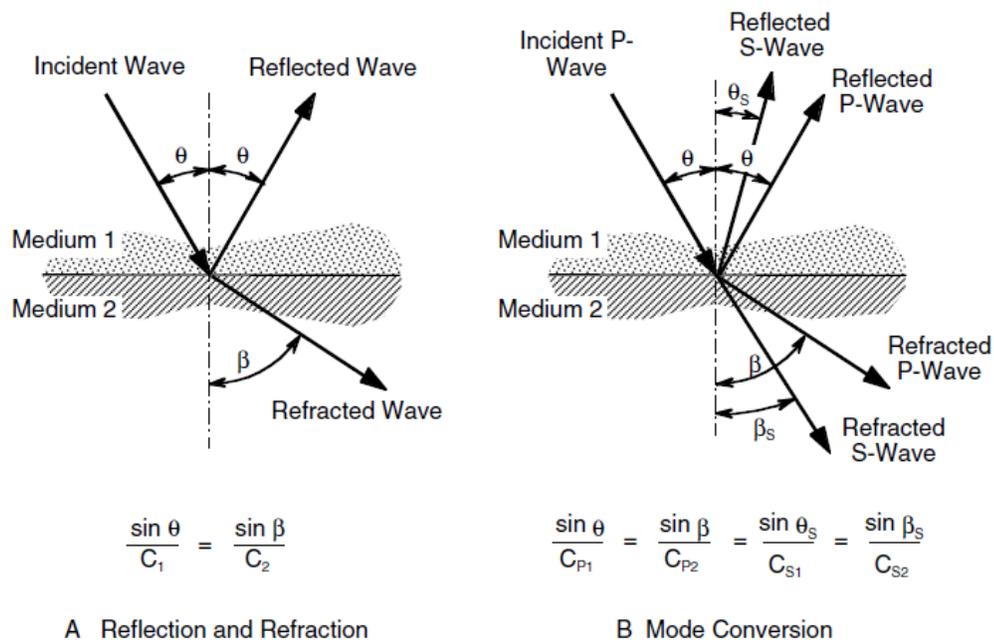


Figure 3.8- Illustration de la réflexion et transmission d'une onde (A) à l'interface entre 2 milieux ainsi que la particularité de la formation des ondes-P et -S à partir d'une onde-P (B) [32].

Sachant que Z_1 et Z_2 correspondent respectivement aux impédances des milieux 1 (onde incidente et réfléchi) et 2 (onde réfractée), il est possible de définir un coefficient de réflexion R comme suit (équation (3.8) [31]).

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.8)$$

Selon la valeur de ce coefficient de réflexion, le comportement de l'onde à l'interface peut différer. Ce changement de comportement est identifié par le changement de phase de l'onde-P. En effet, une onde-P peut avoir deux phases différentes : une phase en compression et une phase en tension. Lors de l'impact, l'onde-P se propage en phase de compression. Par la suite, ce sont les différentes interfaces rencontrées et les coefficients de réflexion qui en découlent à chaque fois qui peut entraîner le changement de phase de l'onde. Lors d'un essai impact-écho, le changement de phase se distingue par le changement de signe du signal enregistré.

3.2.4.1. Cas où $R \simeq 0$ ($Z_1 \simeq Z_2$)

Les impédances étant si proches l'une de l'autre, l'onde peut se propager sans contrainte à l'interface. La quasi-totalité (voir la totalité) de l'onde sera transmise au milieu 2 et donc sera réfractée. Il n'y a pas de changement de phase.

3.2.4.2. Cas où $R \ll 0$ ($Z_1 \gg Z_2$)

Dans le cas où $R \ll 0$, l'onde-P change de phase. C'est le cas pour une interface béton/air ($Z_1 \gg Z_2$).

La figure 3.9 montre deux couches de matériaux d'impédances Z_1 et Z_2 tel que R est inférieur à zéro. L'équation (3.9) permettant d'identifier le pic de fréquence image de l'épaisseur T_1 est identique à l'équation (3.2).

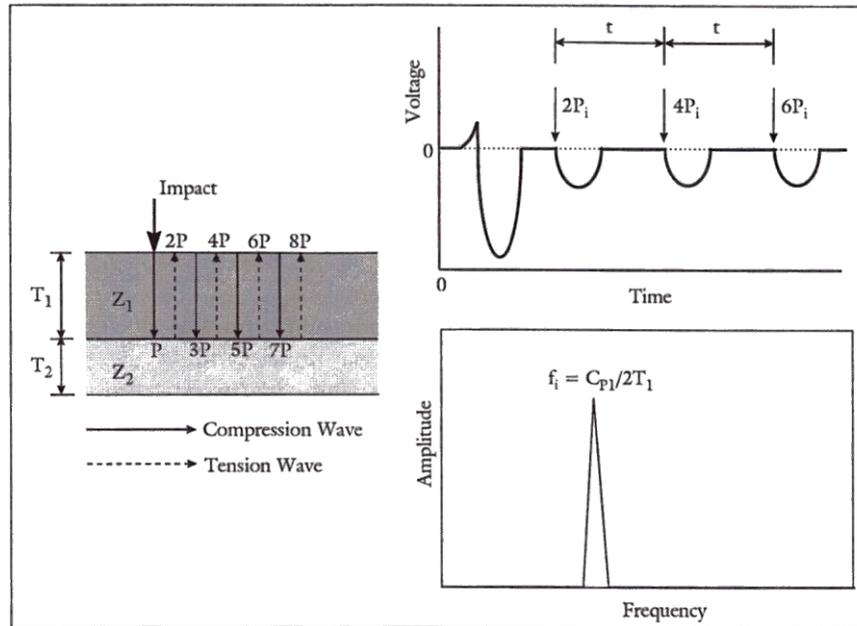


Figure 3.9- Schématisation du changement de phase entre onde de compression et onde de tension pour $R \ll 0$ [33]

$$f = \frac{v_p}{2D} \quad (3.9)$$

Dans ce cas, le diagramme temporel obtenu de l'écho est composé de semi-sinusoïdes du même signe. Ces semi-sinusoïdes sont la réflexion de l'onde-P, qui a changé deux fois de phases sur un seul « aller-retour ».

3.2.4.3. Cas où $R \gg 0$ ($Z_1 \ll Z_2$)

Dans le cas où $R \gg 0$, l'onde-P ne change pas de phase. Ainsi, pour deux matériaux pour lesquels $Z_1 \ll Z_2$, il faudra que l'onde se réfléchisse sur la surface d'essai (c'est-à-dire sur une interface béton/air) pour que la phase l'onde-P se voit modifiée (figure 3.10).

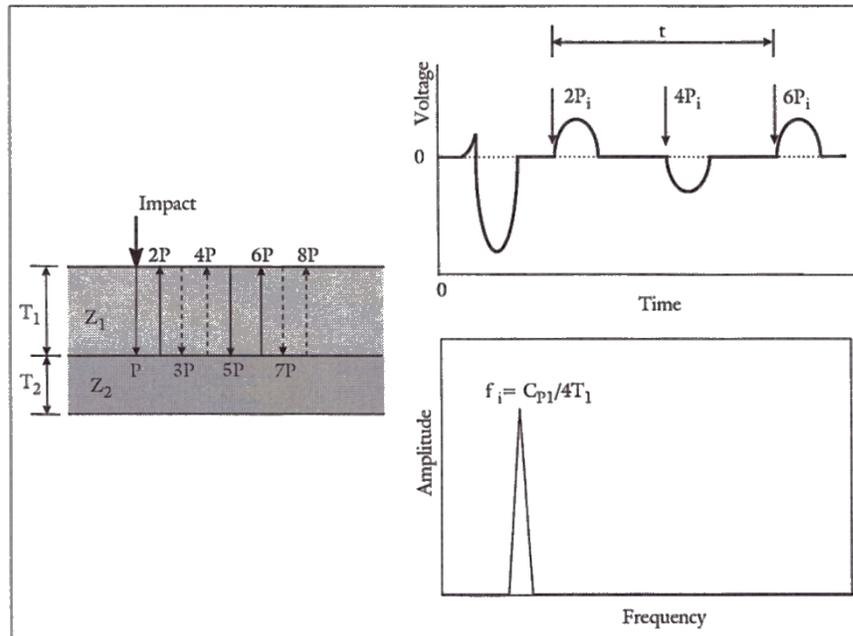


Figure 3.10- Schématisation du changement de phase entre onde de compression et onde de tension pour $R \gg 0$ [33]

Lorsqu'à une interface l'onde ne change pas de phase, ce qui revient à dire qu'elle en change de phase qu'une seule fois sur un « aller-retour », le signal temporel récupéré est différent de celui présenté auparavant. Une onde-P en phases de compression ou de tension provenant initialement du même signal a le même comportement (dans le cas d'un impact à l'aide d'une bille, le signal enregistré est de forme semi-sinusoidale). Ces phase seront de même forme mais de signes opposées ; la compression étant l'inverse de la tension. Le signal temporel présente une alternance entre semi-sinusoidale positive et semi-sinusoidale négative. De ce fait, la transformée de Fourier ne se fait plus sur un seul « aller-retour », mais sur deux ; les deux semi-sinusoides alternées étant lues comme un seul signal sinusoidal. Dans ce cas, l'équation caractéristique du pic de fréquence image de l'épaisseur T_1 est modifiée.

En reprenant l'équation (3.1), et en considérant que l'onde parcourt $4D$ (ou $4T_1$) pour le temps t identifié par la FFT, cela donne :

$$v_p = \frac{4D}{t} \quad (3.10)$$

Donc :

$$f = \frac{v_p}{4D} \quad (3.11)$$

Par exemple, un coefficient de réflexion R positif est caractéristique d'une interface béton/acier. Ces interfaces apparaissent lors de la présence de barres d'armatures ou encore de câbles de précontrainte par post-tension dans des pièces en béton.

3.2.5. Le choix du transducteur

Il est important de définir quelles fréquences vont être propagées dans le matériau, mais il est tout aussi important de récupérer les signaux grâce à un capteur adapté. En effet, chaque capteur possède une réponse en fréquence qui lui est propre, c'est-à-dire une gamme de fréquence qu'il est à même de détecter. La figure 3.11 présente l'exemple d'un accéléromètre pour lequel les fréquences inférieures à 10 Hz et supérieures à 10 kHz seront très atténuées.

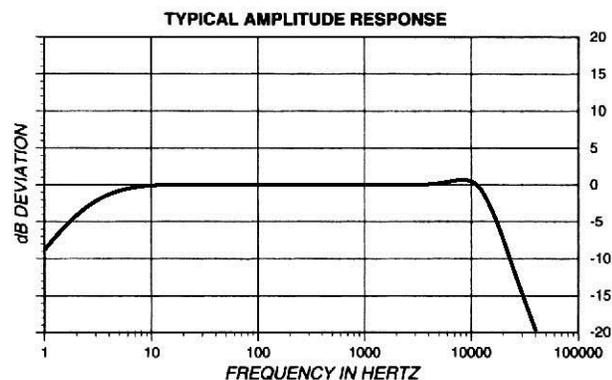


Figure 3.11 – Exemple typique d'une réponse en fréquence d'un accéléromètre [34]

3.3. Influence de la taille et des proportions des pièces étudiées sur la mesure de leur épaisseur

Les échantillons de laboratoire ou les pièces d'ouvrages étudiés par impact-écho peuvent être divisés suivant 4 catégories : les dalles, les simili-dalles, les pièces larges et les pièces élancées. Ces catégories sont établies à partir du rapport des dimensions des sections des spécimens étudiés D/B (figure 3.12). Effectivement, la réponse obtenue avec l'impact-écho est de plus en plus difficile à interpréter suivant que la taille des pièces examinées augmente.

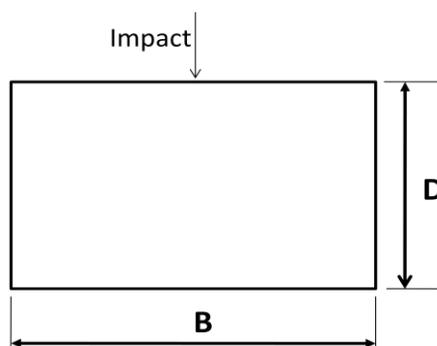


Figure 3.12- Schématisation de la caractérisation des longueurs D (hauteur de section) et B (largeur de section).

Ces catégories permettent d'établir la valeur du coefficient β de l'équation (3.3). Ce coefficient permet d'effectuer une correction de l'estimation de la valeur de la fréquence caractéristique de l'épaisseur de la pièce en fonction de ses dimensions (facteur de forme). Egalement, il permet de déterminer la présence possible d'harmoniques provenant d'échos dus aux dimensions des pièces.

Les différentes valeurs de β et des harmoniques sont regroupées au tableau 3.2 de la section 3.3.5 du présent document.

3.3.1. Les dalles

Les dalles sont plus simples à étudier en raison de leur faible dimension D . Ces éléments sont caractérisés par un rapport D/B inférieur à 0,2. Dans ce cas, le coefficient β a toujours la même valeur : $\beta = 0,96$.

3.3.2. Les simili-dalles

Les simili-dalles sont des pièces plus épaisses sans être massive. Leur rapport D/B est compris entre 0,20 et 0,60. Le comportement de ces pièces est identique à celui des plaques. Ainsi, $\beta = 0,96$.

Par contre, l'augmentation de D par rapport à B induit la présence d'un second harmonique égal à 2 fois la fréquence caractéristique f_1 image de l'épaisseur de l'élément étudié.

3.3.3. Les pièces larges

Les pièces larges sont les spécimens dont le rapport D/B est compris entre 0,60 et 2,00. Dans un tel cas d'étude, la valeur de β varie en fonction de D/B (tableau 3.2). De plus, un nombre important d'harmoniques intervient dans les mesures. Celles-ci aussi sont fonction de D/B .

3.3.4. Les pièces élancées

Les pièces élancées ont un rapport B/D supérieur à 2,00. β possède une valeur de 0,96 et les harmoniques présents sont des multiples de la fréquence fondamentale f_1 .

3.3.5. Valeur de β et des harmoniques

Le tableau 3.2 liste les valeurs de β et des harmoniques f_i images de l'épaisseur de la pièce étudiée en fonction du rapport D/B .

Tableau 3.2 – Valeur de β et des harmoniques par rapport à la fréquence caractéristique f_1 image de l'épaisseur de la pièce pour différents ratios D/B [35].

| D/B | β de la fréquence caractéristique f_1 | f_2 | f_3 | f_4 | f_5 | f_6 |
|---------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $< 0,20$ | $\beta = 0,96$ | | | | | |
| $0,20 < 0,60$ | $\beta = 0,96$ | $2f_1$ | | | | |
| 0,60 | $\beta = 0,84$ | $1,07f_1$ | $1,43f_1$ | $1,48f_1$ | $1,86f_1$ | $1,91f_1$ |
| 0,75 | $\beta = 0,75$ | $1,19f_1$ | $1,60f_1$ | $1,66f_1$ | $1,98f_1$ | $2,02f_1$ |
| 0,80 | $\beta = 0,77$ | $1,45f_1$ | $1,96f_1$ | $2,01f_1$ | $2,41f_1$ | $2,46f_1$ |
| 0,83 | $\beta = 0,80$ | $1,44f_1$ | $1,94f_1$ | $1,98f_1$ | $2,38f_1$ | $2,44f_1$ |
| 0,87 | $\beta = 0,82$ | $1,43f_1$ | $1,93f_1$ | $1,95f_1$ | $2,36f_1$ | $2,41f_1$ |
| 0,91 | $\beta = 0,87$ | $1,42f_1$ | $1,92f_1$ | $1,92f_1$ | $2,34f_1$ | $2,47f_1$ |
| 1,00 | $\beta = 0,90$ | $1,41f_1$ | $1,90f_1$ | $2,45f_1$ | $2,83f_1$ | $2,34f_1$ |
| 1,10 | $\beta = 0,92$ | $1,43f_1$ | $1,92f_1$ | $2,34f_1$ | $2,52f_1$ | $2,69f_1$ |
| 1,20 | $\beta = 0,94$ | $1,45f_1$ | $1,94f_1$ | $2,38f_1$ | $2,58f_1$ | $2,73f_1$ |
| 1,33 | $\beta = 0,94$ | $1,49f_1$ | $1,98f_1$ | $2,02f_1$ | $2,45f_1$ | $2,62f_1$ |
| 1,67 | $\beta = 0,95$ | $1,66f_1$ | $2,11f_1$ | $2,32f_1$ | $2,74f_1$ | $2,74f_1$ |
| 2,00 | $\beta = 0,96$ | $1,81f_1$ | $2,06f_1$ | $2,23f_1$ | $2,56f_1$ | $2,92f_1$ |
| $> 2,00$ | $\beta = 0,96$ | $2f_1$ | $3f_1$ | $4f_1$ | $5f_1$ | $6f_1$ |

Il est possible de déterminer β par interpolation mathématique pour les autres valeurs D/B qui ne sont pas affichées dans le tableau excepté pour D/B compris entre 0,75 et 0,80 (voir figure 3.13). Il en est de même pour les harmoniques.

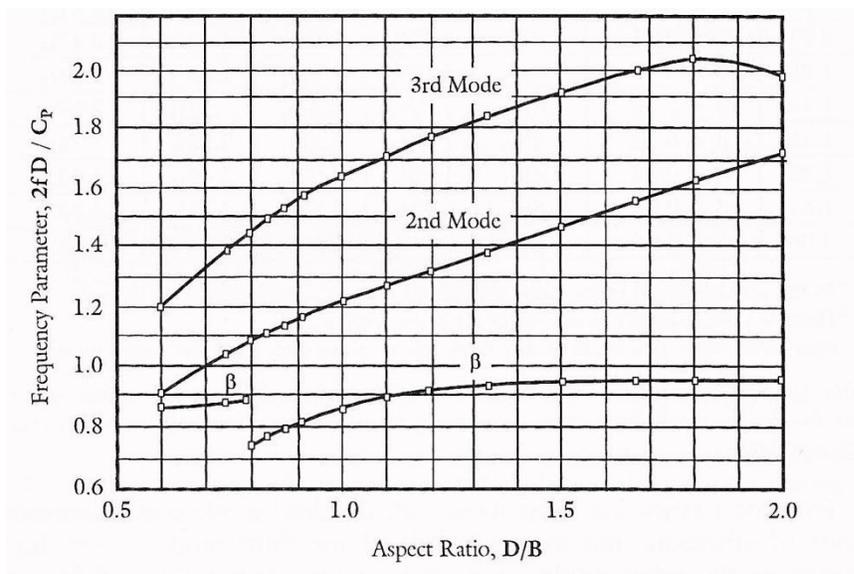


Figure 3.13- Valeur des coefficients β et des multiples de f_1 pour les trois premiers modes de vibration des pièces en fonction du ratio D/B [35]

3.4. Détection de vide de coulis dans les gaines de précontrainte par post-tension interne

La précontrainte par post-tension d'un élément en béton est constituée d'une gaine (le plus souvent métallique mais qui peut aussi être en plastique) dans laquelle se trouve des câbles d'aciers mis en traction. Ses câbles sont noyés dans du coulis de ciment afin d'assurer une protection supplémentaire dans le cas où de l'eau s'introduirait dans la gaine. La figure 3.14 présente trois situations différentes pouvant survenir dans un élément précontraint par post-tension (avec une gaine métallique).

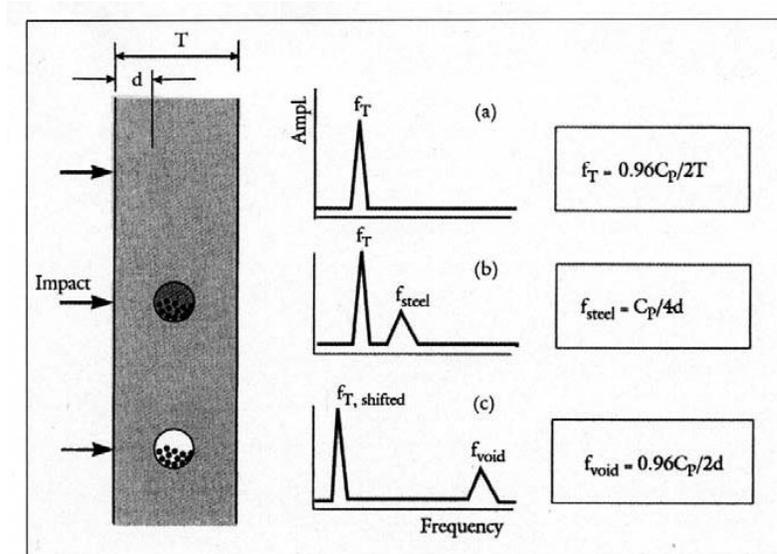


Figure 3.14- Variation du spectre de fréquence en fonction du "défaut" rencontré
pièce sans défaut, b) présence d'une gaine métallique injecté de coulis, c) présence d'une gaine
métallique vide [12]

Note : sur la figure, la profondeur de la gaine est représentée par d ; par la suite, la profondeur d'une gaine ou d'un défaut sera identifiée par p .

Dans le cas a), la zone étudiée ne comporte ni défaut, ni composant particulier dans la pièce. Ainsi, il n'y a que la valeur de f_1 qui est mesuré, nommée ici f_T (graphique au centre). Aux vues des dimensions de la pièce, β est égal à 0,96. Lors d'une telle mesure, si l'épaisseur D (ou T) est connue, il est possible de déterminer la valeur de la vitesse de propagation de ondes v_p (ou C_p) grâce à l'équation (3.3).

Dans le cas b), une gaine comblée de coulis interfère sur la trajectoire de l'onde bien que celle-ci parvienne jusqu'à la surface opposée à celle étudiée. C'est pourquoi deux pics de fréquence sont obtenus (au centre) : f_T pour l'épaisseur et f_{steel} (appelé par la suite f_{acier}) qui représente la réflexion de l'onde propagée à l'interface entre le béton et l'acier. Dans un tel cas, le coefficient de réflexion étant positif, l'équation de f_{steel} est identique à l'équation (3.11) où D représente la profondeur de la gaine p (ou d).

Dans le cas c), la gaine de précontrainte est située à la même profondeur dans la pièce, mais cette fois-ci, elle est vide. De ce fait, il y a une réflexion qui se crée à l'interface entre la pièce et le vide. Le coefficient de réflexion étant négatif cette fois-ci, la fréquence caractéristique image du vide f_{void} (appelé par la suite f_{vide}) est établie grâce à l'équation (3.9). Quant à la valeur de la fréquence image du pic de l'épaisseur, celle-ci diffère des deux cas précédents. Effectivement, la présence du vide dans la gaine va empêcher l'onde d'effectuer la trajectoire la plus courte (c'est-à-dire $2T$). La distance parcourue par l'onde étant plus grande jusqu'à la réflexion sur la surface opposée (l'onde « contourne » la gaine), la valeur caractéristique de f_T se trouve décalée vers une valeur plus faible. L'étude de ce décalage sera vu à la section 3.5.2.

3.5. Exemples d'applications de la méthode

Il est possible, avec la méthode impact-écho, déterminer la profondeur d'un défaut (fissures, vides,...) ainsi que la taille approximative de celui-ci. Selon la référence [36], la profondeur d'une fissure plane ou d'un vide n'est déterminée que si sa dimension latérale est au moins égale à 1/3 de sa profondeur (figure 3.15). A l'inverse, pour un défaut dont la dimension latérale est plus de 1,5 fois sa profondeur, il risque d'être considéré comme la limite inférieure de la pièce (limite « infinie »). Pour des défauts de largeur comprise entre ces deux paramètres, on peut détecter les défauts et en déterminer leur profondeur.

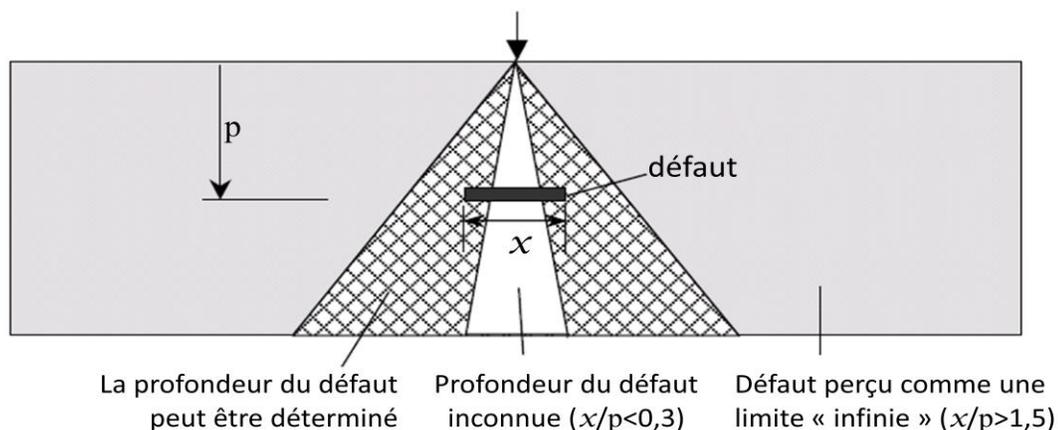


Figure 3.15- Zone où la profondeur p du défaut détectable en fonction de sa dimension latérale d [36].

3.5.1. Détection de délaminage

La figure 3.16 est un exemple de relevé de mesure après interprétation des résultats effectués sur le tablier d'un pont de 17,7 m de long. Une mesure a été effectuée tous les 60 cm. En gris foncé sont représentés les points des mesures où la méthode détecte du délaminage. Les tracés d'un trait foncé représentent les zones réelles de délaminage. On remarque que les résultats obtenus avec l'impact-écho sont très proches de la réalité. Il n'y a que quelques petites zones de délaminage qui n'ont pas été détectés en raison du choix de l'espacement entre les points de mesures.

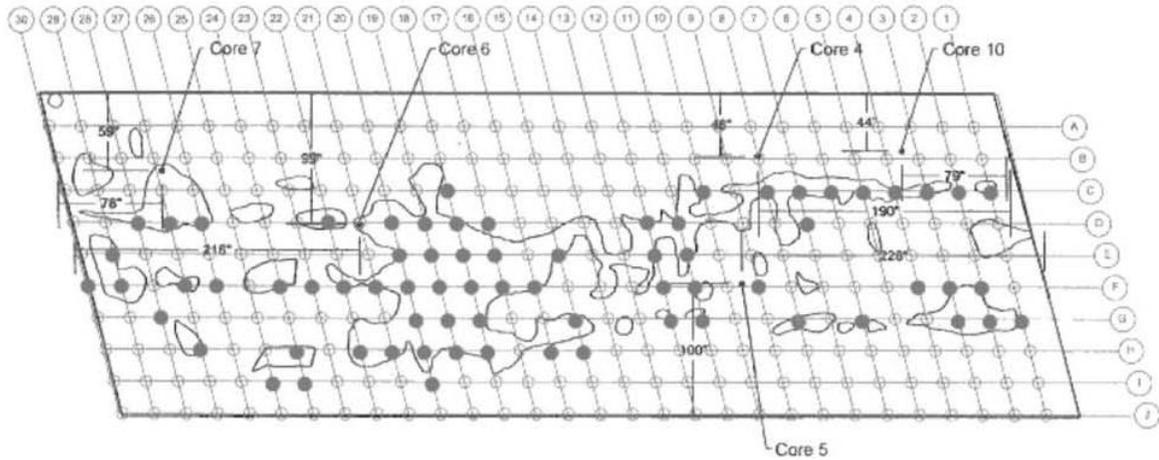


Figure 3.16- Evaluation du délaminage par méthode impact-écho du tablier de pont du Van Buren Road Bridge (USA) [37]

Les méthodes acoustiques peuvent être fortement réduites voir même inefficaces lors de l'inspection de tabliers de ponts en raison de la couche de revêtement d'asphalte [37].

3.5.2. Détection de vide de précontrainte

La méthode impact-écho a également été utilisée pour détecter les vides de coulis dans les gaines. Les vides de coulis sont déterminables de deux manières. Une première méthode consiste à étudier la fréquence caractéristique f_{vide} vue précédemment à la section 3.4 [38]. Une autre méthode consiste à étudier la variation Δf_1 de la fréquence caractéristique de l'épaisseur de la pièce f_1 en fonction des défauts rencontrés.

La variation Δf_1 est calculée comme tel :

$$\Delta f_1 = \frac{100}{f_1} \times (f_1 - f_1^*) \quad (3.12)$$

avec f_1 la valeur de la fréquence image de l'épaisseur déterminée par calcul et f_1^* la valeur obtenue durant les mesures.

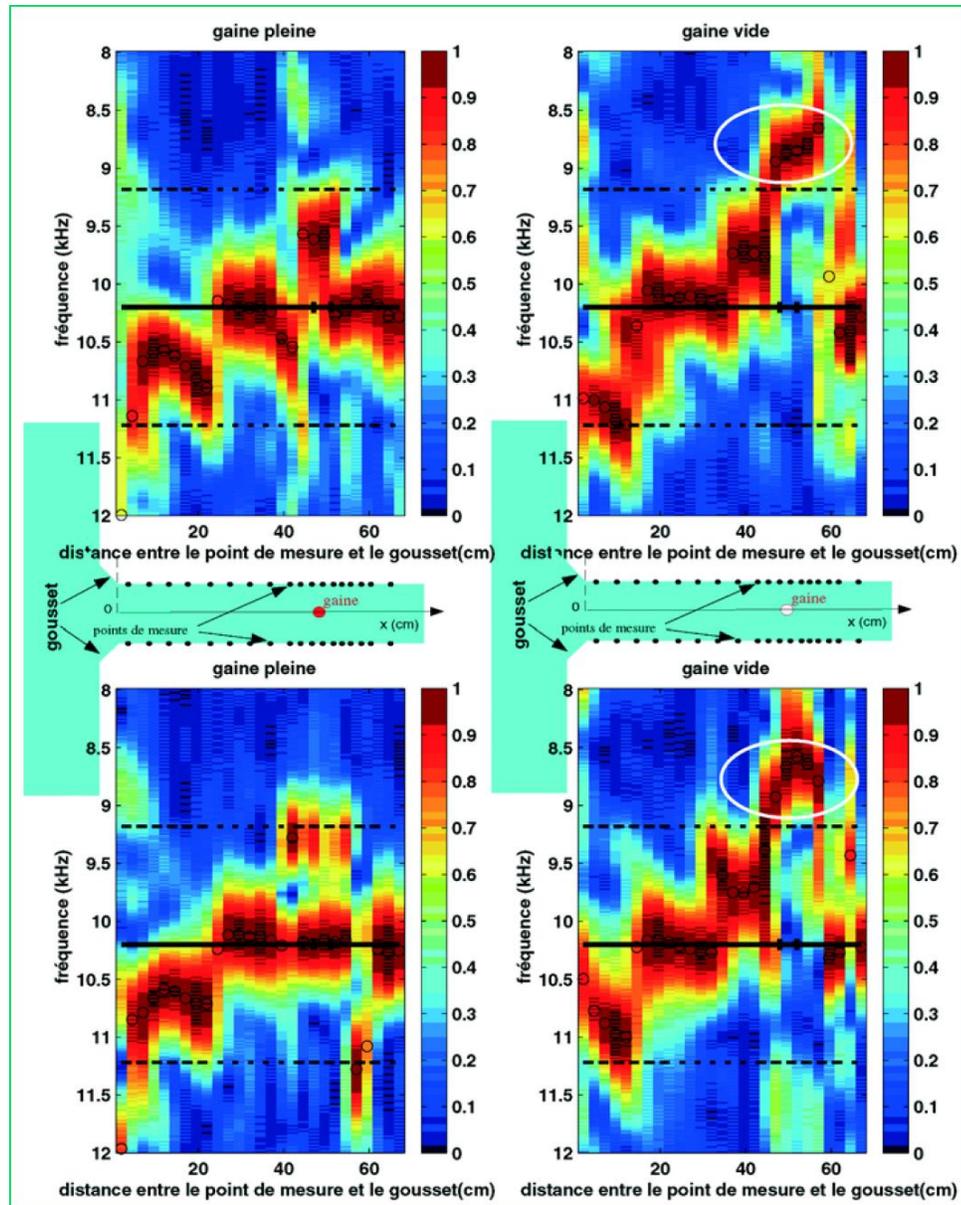


Figure 3.17- Influence de la présence d'une gaine (vide ou remplie de coulis) sur la fréquence caractéristique de l'épaisseur de la pièce [30].

Effectivement, des essais menés par Abraham et Cote [30] a permis de mettre en évidence la variation important de f_1 lorsqu'il y a un vide de coulis dans une gaine. Des mesures ont été effectuées sur une poutre post-contrainte démembrée (munie d'une gaine en plastique) et les résultats obtenus pour la valeur de f_1 ont été affichés à la figure 3.17. La figure

contient 4 graphiques, chacun représentant les valeurs de f_1 mesurées à plusieurs endroits le long d'une section de la poutre. Sur la gauche, les mesures ont été effectuées à une section où la gaine était correctement injectée, sur les deux côtés de la poutre (graphique du haut et du bas) et, sur la droite, les mesures ont été effectuées à l'identique au niveau d'une section où la gaine était mal injectée.

La valeur de la fréquence f_1 avait été estimée proche de $10,2 \text{ kHz}$. Sur les graphiques de gauche, les valeurs de f_1 sont à cette valeur ou en reste assez proche. Les variations de f_1 sont dues à la présence de la gaine ainsi que celle du gousset, mais Δf_1 ne dépasse pas 10 %. Or sur les graphiques de droite, bien que Δf_1 reste inférieur à 10 % dans le cas de gousset (comportement identique au cas précédent), la présence de la gaine vide influe sur f_1 induisant une augmentation de Δf_1 supérieure à 16 %. Ainsi, une différence importante peut être notée entre les deux cas.

La valeur de Δf_1 est contrainte par la géométrie de la pièce. La figure 3.18 montre les résultats obtenus par calculs par éléments finis de l'estimation de Δf_1 en fonction de la profondeur de la pièce, du diamètre de la gaine et de sa profondeur par rapport à la surface étudiée.

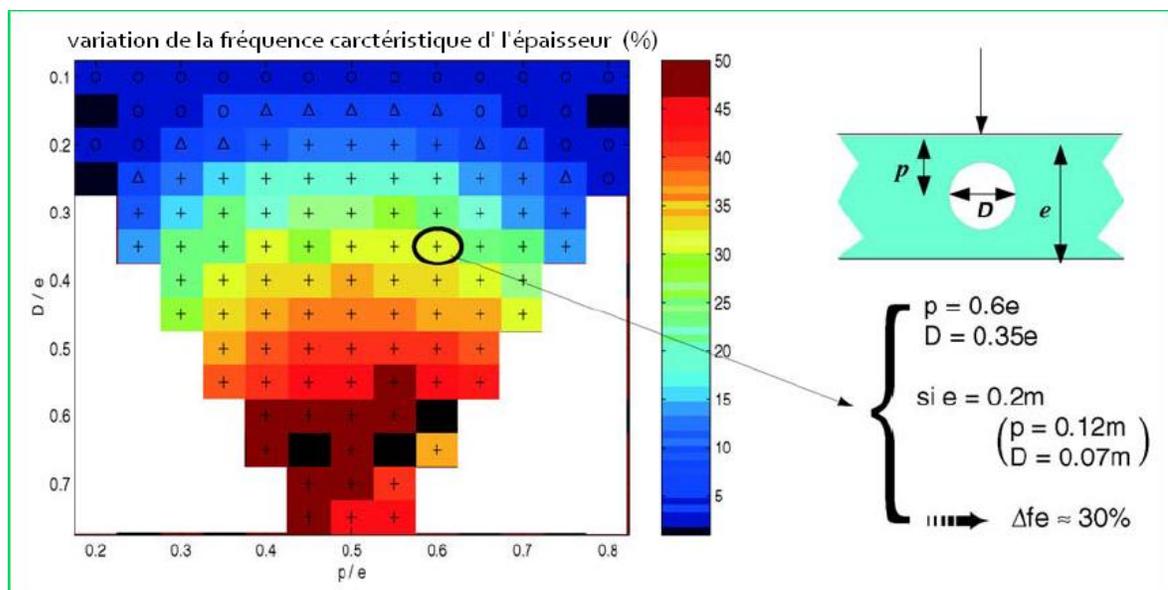


Figure 3.18- Variation Δf_1 en fonction des caractéristiques géométriques estimé pour [30].

Note : Valeurs obtenues par calculs par éléments finis. p a été pris variant de 0,02 à 0,18 m et D variant de 0,02 à 0,16 m (indices de la figure).

D'après les résultats obtenus, il est préférable que la gaine occupe 35 % de la section pour avoir une variation significative Δf_1 de 30%. Ce type de mesure, bien que beaucoup plus simple d'interprétation, ne peut être mis en place qu'au niveau des âmes des poutres. Effectivement, dès que le diamètre de la gaine est de dimension inférieure au quart de l'épaisseur de la pièce, Δf_1 est inférieure à 15 %, ce qui donne beaucoup de difficulté à la détection de vides.

3.5.3. Autres références

La méthode impact-écho est beaucoup utilisée dans le domaine des structures. Par exemple, elle a été utilisée pour déterminer la profondeur des fissures dans les ponts [38] ou encore dans les murs des barrages [39]. Dans le cas d'un barrage de Taïwan ([39]), des profondeurs de fissures ont été mesurée jusqu'à 2,31 m de profondeur.

3.6. Interprétation des mesures : exemple du modèle SIBIE

Dans ce mémoire, l'étude des résultats de mesures par impact-écho a été limitée au traitement du signal par FFT. Cependant, il existe des études plus poussées à partir des signaux impact-écho. Le modèle SIBIE en est un exemple.

La lecture du spectre de fréquence n'est pas toujours évidente. L'utilisation de cette méthode demande un personnel spécialisé. Cependant, il existe des traitements de signaux encore plus poussés se basant sur les amplitudes spectrales récupérées lors du traitement des mesures. Ainsi, la méthode SIBIE [11] (Stack Imaging of spectral amplitude Based on the Impact-Echo) donne une image de la section en fonction du point d'impact. Sur la figure 3.19, on tente de déterminer la présence de vide dans une gaine plastique en laboratoire. En raison de la difficulté d'interprétation des résultats, il est recommandé de faire effectuer ces analyses par du personnel spécialisé.

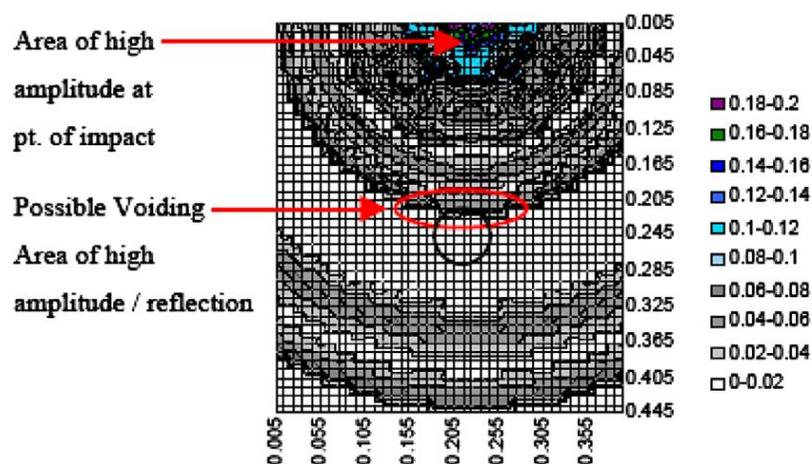


Figure 3.19- Analyse obtenue par SIBIE d'une poutre à section carrée en laboratoire [11]

La difficulté de mise en œuvre de la méthode ainsi que l'interprétation des résultats fait que la méthode impact-écho est plus couramment utilisée pour évaluer l'état du béton que pour mettre en évidence les vides de coulis. Pourtant, cette méthode est déjà fortement utilisée pour certain cas de construction tel que des poutres caisson dont les âmes ont de petites épaisseurs [40]. Les études de signaux aussi poussées que le modèle SIBIE restent au stade expérimental à ce jour.

4. L'endoscopie : méthode d'évaluation semi-destructive complémentaire

Les méthodes END permettent d'ausculter les structures ou parties de structures sans altérer leur intégrité. Toutefois, parfois, la ou les méthodes utilisées lors de ces auscultations ne sont pas adaptées ou suffisamment précises pour bien apprécier l'état des éléments à l'étude. C'est particulièrement le cas des éléments précontraints par post-tension interne en ce qui concerne l'état des gaines, coulis et câbles de précontrainte. Dans ces conditions, le recours aux méthodes d'évaluation destructive (ED) est alors nécessaire.

4.1. Influence des ED

La réalisation d'ouvertures (exemple de fenêtrage à la figure 4.1) jusqu'aux gaines de précontrainte permet d'observer localement l'état de l'acier. Cette façon de faire peut porter un préjudice à l'ouvrage car l'acier de précontrainte par post-tension est mis à nu durant cette opération. Il peut donc être fragilisé en cas de forte humidité (une averse par exemple). Il faut ajouter à cela le risque de blesser l'acier lors de la mise en œuvre de l'ouverture. De plus, lorsque le fenêtrage est refermé, si les gaines sont mal scellées l'eau pourra s'infiltrer et atteindre facilement les armatures de précontrainte permettant ainsi aux conditions propices à la corrosion de se mettre en place.

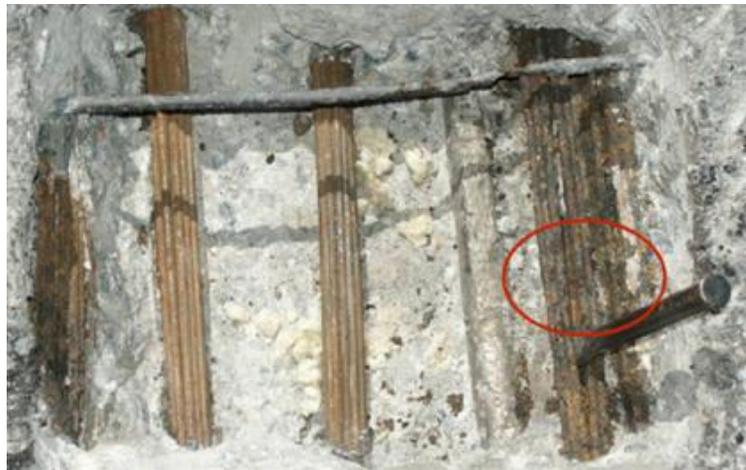


Figure 4.1- Fenêtrage effectué sur un pont en post-tension[23].

Par ailleurs, l'ouverture des gaines permet de récupérer le coulis. Ce coulis peut être étudié en laboratoire afin de connaître ses propriétés comme, par exemple, sa teneur en ions chlorure. Cela permet d'évaluer encore plus précisément la durée de vie de l'acier de précontrainte.

4.2. Méthode alternative semi-destructive

L'introduction d'un système microscopique à l'intérieur des gaines de précontrainte, afin d'obtenir une observation visuelle de l'état de la précontrainte, s'avère être une alternative très intéressante puisqu'il permet d'éviter l'ouverture de larges fenêtres sur ces ouvrages. Ce procédé nommé endoscopie consiste, à l'aide de perforations de petites tailles, à accéder à la gaine puis à déplacer le système optique (l'endoscope) à l'intérieur de la gaine en profitant d'un espace libre souvent dû à un vide de coulis.

4.2.1. Types d'endoscopes

Il existe deux types d'endoscopes (figure 4.2). Le premier type d'endoscope est rigide. Il est introduit dans l'ouvrage jusqu'à la gaine et permet d'observer le coulis d'injection et les câbles à proximité. Le second type d'endoscope est souple. Il est constitué d'une petite caméra ainsi que d'une fibre optique qui permet d'éclairer la zone observée. Ce second endoscope permet d'aller beaucoup plus loin dans la zone d'investigation puisqu'on peut l'introduire plus en profondeur dans la gaine (dans le cas de vide de coulis important).

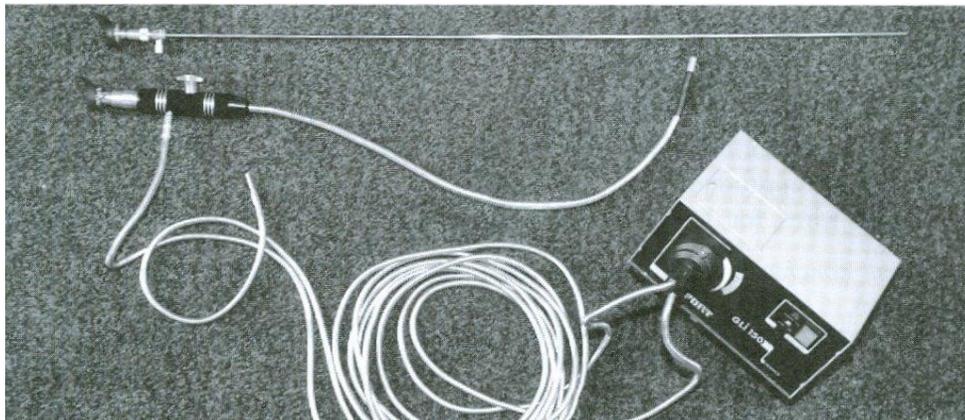


Figure 4.2- Endoscopes flexibles et rigides [41].

4.2.2. Technique d'exploration

La méthode d'investigation à l'aide des deux types d'endoscopes est similaire. Tout d'abord, cette opération étant locale, il faut déterminer les endroits où l'on souhaite étudier les gaines de précontrainte. Il est préférable d'effectuer une visualisation de l'intérieur de la gaine aux endroits où il y a des vides de coulis d'injection (localisés par exemple par impact-écho) car c'est à ces endroits précis que les câbles de précontrainte risquent d'être abimés. De plus, la visualisation du coulis permet d'observer s'il y a eu ségrégation de celui-ci et d'observer sa couleur qui peut donner des informations importantes sur la probabilité de corrosion des câbles. Pour finir, en observant la surface du coulis dans le cas d'un vide partiel, il est possible de vérifier s'il y a eu lessivage de la surface impliquant donc une intrusion d'eau répétitive dans la gaine.

Une fois les zones à ausculter déterminées, il faut effectuer un forage jusqu'à la gaine. Etant donné les diamètres des endoscopes (une dizaine de millimètre) une ouverture de 25 mm est suffisant [7]. L'opération de forage doit être effectuée avec minutie afin d'éviter la perforation des câbles. Il est d'usage d'avoir recours à un système électrique qui arrête automatiquement le marteau perforateur lorsque celui-ci atteint l'acier.

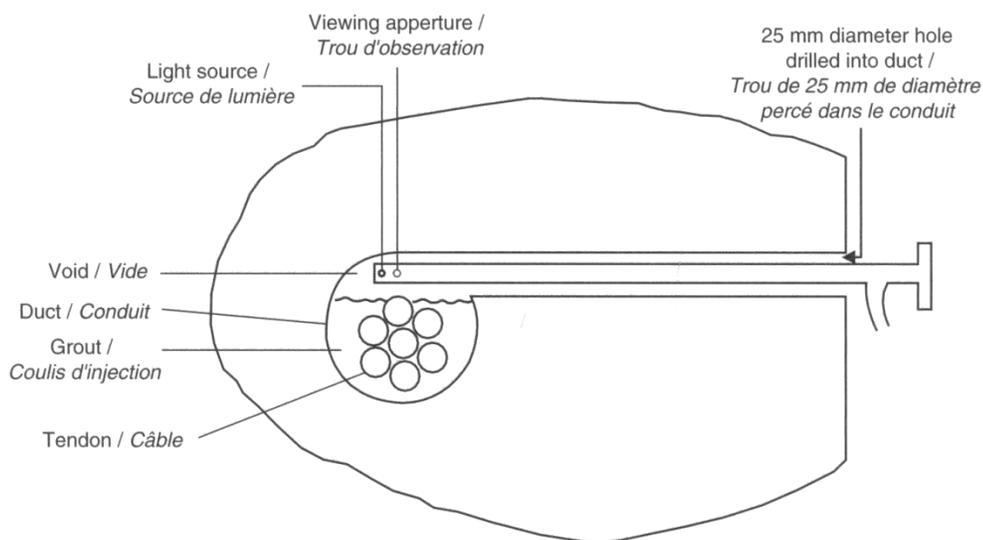


Figure 4.3- Schéma de l'utilisation d'un endoscope rigide [7].

Lorsque le forage est terminé, l'endoscope est introduit dans la gaine (figure 4.3). La visualisation de l'état des câbles est effectuée à partir d'un moniteur. Il est alors possible de faire des acquisitions d'images (exemple figure 4.4) ou de faire un enregistrement vidéo selon le modèle d'endoscope.

Lorsque le forage est terminé, l'endoscope est introduit dans la gaine (figure 4.3). La visualisation de l'état des câbles est effectuée à partir d'un moniteur. Il est alors possible de faire des acquisitions d'images (exemple figure 4.4) ou de faire un enregistrement vidéo selon le modèle d'endoscope.

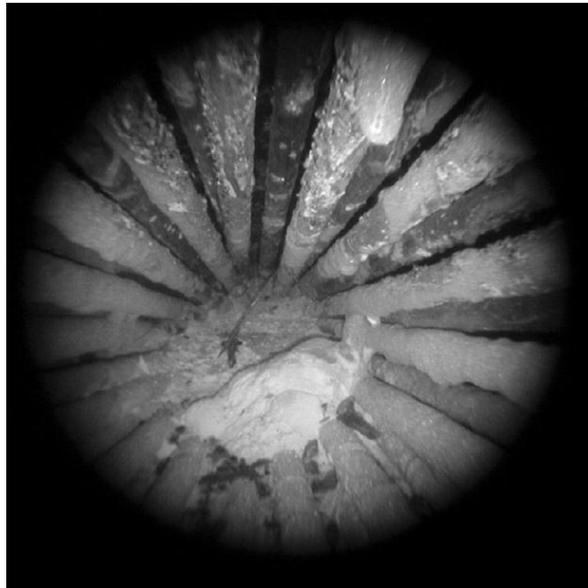


Figure 4.4- Exemple d'image vidéo obtenue par endoscopie à l'intérieur d'une gaine de précontrainte au niveau de l'ancrage [42].

Finalement, un scellement approprié des ouvertures permet d'éviter toute infiltration d'eau.

Cette méthode, bien que très ponctuelle, permet d'observer l'intérieur des gaines à partir de moyens très peu destructifs. De plus, à l'aide d'un endoscope souple, il est possible d'observer l'étendue des vides de coulis.

5. Expérimentations

Le volet expérimental de l'étude s'est déroulé en 2 étapes. D'abord, il a fallu prendre en main l'appareillage nouvellement acquis par le laboratoire que ce soit pour l'impact-écho ou pour l'endoscope. Ensuite, une phase d'expérimentation a été réalisée afin d'appliquer les deux méthodes. Au préalable, des échantillons ont été fabriqués en laboratoire et une sélection d'échantillons a été effectuée sur des structures.

5.1. Echantillons de l'étude

Les échantillons ont été classés en trois catégories différentes afin de pratiquer la méthode impact-écho sur des spécimens de plus en plus complexes. Ainsi, les essais ont été réalisés en premier sur des plaques, puis sur des blocs de dimensions plus importantes et enfin sur des segments de poutres provenant d'ouvrages démembrés.

Des endoscopies ont été pratiquées sur un des blocs du laboratoire et sur les segments de poutres. Ces endoscopies ont été effectuées afin d'une part de valider la méthode elle-même comme technique d'évaluation puis en second lieu afin de comparer les résultats obtenus à ceux générés par l'impact-écho.

5.1.1. Plaques PL (laboratoire)

5.1.1.1. Choix et classification des prototypes

Le but de ces échantillons est de déterminer la validité des mesures impact-écho pour la détection de vides de coulis dans les gaines métalliques de précontrainte interne. Pour ce faire, plusieurs prototype ont été choisi : avec ou sans barres métalliques 15M dans la gaine (simulant la présence de câbles de précontrainte) et avec gaine vide ou remplie de coulis.

Les plaques ont été conçues afin d'avoir des échantillons très simples à réaliser et à examiner. Pour ce faire, des morceaux de gaines métalliques d'une cinquantaine de centimètres de long ont été positionnés dans des dalles de béton (figure 5.1). Ces dalles ont

pour dimensions $165 \text{ mm} \times 360 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ ($h \times l \times L$) et contiennent une gaine en leur centre (figure 5.2).



Figure 5.1- Fabrication des plaques (en haut : les 3 plaques PL1, en bas : les 3 plaques PL3)

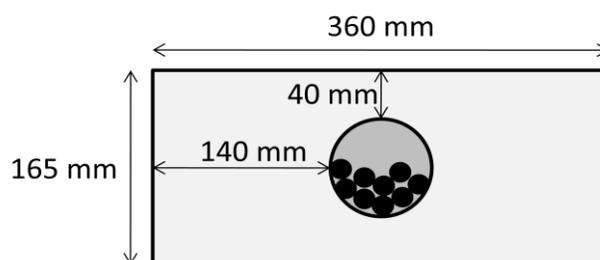


Figure 5.2 - Schématisation d'une section transversale d'une plaque

Les dimensions des plaques ont été choisies en fonction du diamètre moyen des gaines à disposition (gaines métalliques rainurées $\phi_{min} = 81 \text{ mm}$ et $\phi_{max} = 87 \text{ mm}$), de la position de ces dernières et du rapport D/B de la section. Effectivement, en se référant au

chapitre 3 (page 15), ces caractéristiques permettent d'identifier les résultats en fréquence escomptés de la méthode impact-écho.

Puisque $D/B = 165/360 = 0,46$, les plaques sont de la catégorie type « simili-dalles ». Les résultats devraient donc mettre en évidence les fréquences f_1 et f_2 de même que les fréquences caractéristiques dues à la présence de la gaine et à son type de remplissage. Le diamètre moyen des gaines utilisées dans cette étude est de 84 mm , ce qui conduit à un rapport \emptyset/D de 0,5. Ce rapport combiné à celui représentant la position de la gaine dans la plaque (p/D), où p égal 82 mm ($p_g + \emptyset = 40 \text{ mm} + 84/2 \text{ mm}$), permet d'anticiper un décalage en fréquence Δf_1 de l'ordre de 40% selon O. Abraham [30] (figure 3.18).

5.1.1.2. Désignation des échantillons

Les dalles ont été classées en quatre catégories suivant les matériaux présents à l'intérieur de la gaine (figure 5.3) :

- plaques PL1 : gaine remplie de coulis, sans barre ;
- plaques PL2 : gaine remplie de coulis, avec 9 barres ;
- plaques PL3V : gaine sans coulis, sans barre ;
- plaque PL3Bx : gaine sans coulis, avec x barre(s).

Dans le but de vérifier la reproductibilité des mesures, il a été choisi de fabriquer 3 échantillons par catégorie. De plus, seulement 3 types de plaque PL_i ont été fabriquées : PL1, PL2 et PL3, puisque les mêmes plaques PL3 sont utilisées pour les catégories PL3V et PL3Bx. Afin de dissocier les échantillons, chaque plaque a été identifiée a , b ou c par type PL_i .

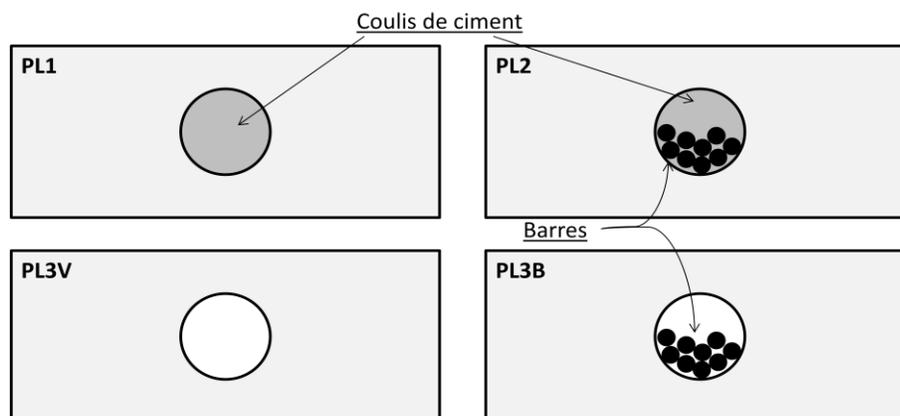


Figure 5.3- Catégories des échantillons PL¹

L'étude porte donc sur un total de 9 échantillons pour 4 catégories d'études différentes.

5.1.1.3. Fabrication des échantillons

Les échantillons ont été fabriqués au laboratoire du Département de Génie Civil. Les gaines ont été préalablement remplies de coulis pour 6 d'entre elles (PL1 et PL2). Ensuite, elles ont été placées dans les coffrages prévus à cet effet afin d'y placer le béton frais (figure 5.1).

Le ciment utilisé pour fabriquer le coulis provient de la compagnie BASF (type Masterflow 1205 – Annexe A). La quantité d'eau ajoutée au ciment lors du malaxage du coulis a été préalablement déterminée par la méthode « Flow Cone » de la norme ASTM C 939 [43]. Un coulis très fluide permettant sa mise en place aisément a été réalisé, l'écoulement obtenu durant le test ATSM C 939 a pris 21 *sec* pour un rapport e/c de 0,35 (voir Annexe B, page 237).

Le coulis de ciment a été introduit à l'intérieur des gaines par gravité (et non par injection). Les gaines avaient été préalablement positionnées à la verticale avec l'extrémité inférieure

¹ Par la suite, les résultats seront affichés graphiquement dans le même ordre que ci-dessus : ligne du dessus : présence de coulis, ligne du dessous : vide de coulis ; colonne de gauche : sans barre, colonne de droite : avec barres.

obstruée par un bouchon. Les barres métalliques ont été placées les unes contre les autres, au nombre de neuf, dans les 3 gaines utilisées pour les plaques PL2 avant d'y introduire le coulis (figure 5.4).



Figure 5.4- Vue au-dessus des gaines après le remplissage avec le coulis de ciment (pour les plaques PL2)

Un coulis fabriqué en une seule gâchée a permis de remplir toutes les gaines des plaques PL1 et PL2 et a permis la fabrication d'un cylindre témoin (diamètre 100 *mm* par 200 *mm* de hauteur) afin d'effectuer des tests de vitesse de propagation des ondes dans le coulis et d'évaluer la masse volumique du matériau.

Après mûrissement du coulis, les gaines ont été placées dans les coffrages afin de couler le béton. Une seule gâchée de béton a été réalisée pour l'ensemble des plaques. La formulation du béton se compose de pierre calcaire 5-14mm, de sable, de ciment GU et contient un entraîneur d'air ainsi qu'un superplastifiant. Le mélange est précisé en détail dans l'Annexe C, page 238.

Le béton a été fabriqué dans le malaxeur 300 L du laboratoire. Il a servi à fabriquer les plaques PL, mais aussi des cylindres (diamètre 100 *mm* par 200 *mm* de hauteur) afin d'étudier la résistance en compression du béton, la vitesse de propagation des ondes dans un échantillon de béton, ainsi que la masse volumique du matériau.

5.1.2. Blocs (laboratoire)

5.1.2.1. Choix des prototypes

Les blocs étudiés ont été choisis pour leurs dimensions plus importantes comparées aux plaques PL. Ainsi, la profondeur des échantillons de béton est augmentée et il en va de même de la profondeur des gaines (c'est-à-dire leur position par rapport à la surface des échantillons : p augmente).

De plus, la fabrication de certains blocs a été complexifiée : d'une part, en introduisant de l'armature passive en la surface du bloc et la gaine présente afin de simuler la présence de ferrailage, ou encore, en introduisant une fissure dans le béton au niveau du gainage afin de simuler la présence de défauts.

Pour l'ensemble des blocs, le pourcentage de remplissage des gaines est variable selon l'axe longitudinal de ceux-ci, soit sur 1600 mm de long. Cette façon de faire a été choisie afin de déterminer si la méthode impact-écho est apte à détecter un vide d'injection plus ou moins important dans une gaine.

La figure 5.5 montre le remplissage des gaines dans les blocs de béton sur les 1600 mm de long. Ainsi, à l'intérieur de chaque gaine, en plus de 10 barres 15M simulant la présence de torons de précontrainte, le remplissage du coulis d'injection se présente comme suit.

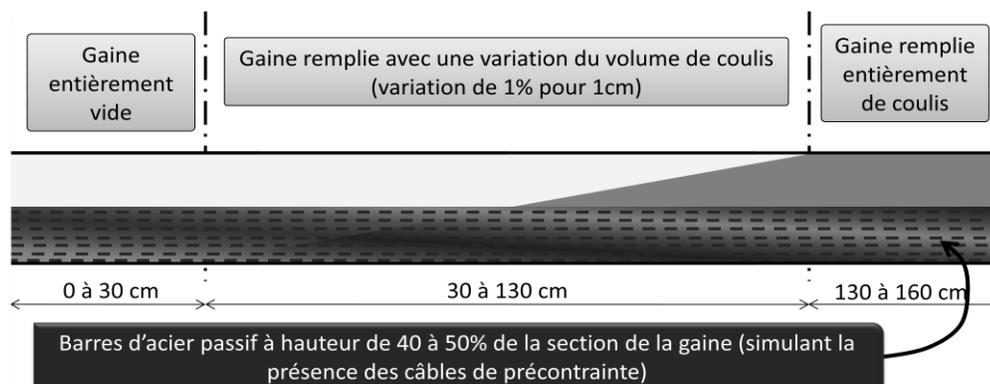


Figure 5.5- Schématisation du remplissage d'une gaine sur sa longueur

Les barres 15M présentant dans les gaines sont en quantité important de sorte de reproduire, dans la mesure du possible, la quantité d'armature de précontrainte retrouvée dans les segments de poutres à l'étude à la section 5.1.3. Le remplissage variable de coulis dans les gaines permettra de comparer les échos dus à une gaine vide à ceux d'une gaine pleine et à ceux d'un remplissage partiel eu coulis.

5.1.2.2. Désignation et classification des blocs

Quatre prototypes ont été réalisés. Les blocs les plus simples sont les blocs de type A (figure 5.6) et B (figure 5.7) qui ne contiennent qu'une seule gaine. Les blocs de type C (figure 5.8) et D (figure 5.9) contiennent respectivement quatre et trois gaines.

- Bloc A :

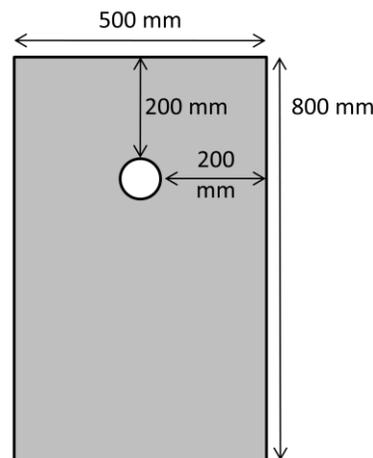


Figure 5.6- Schématisation de la section du Bloc A

Le bloc A possède une profondeur importante. Cette caractéristique du bloc a pour but de valider la détection possible des vides de coulis aux points hauts ou points bas du profil des gaines de poutres passives en post-tension. Ces zones sont les plus faciles à étudier puisque, dans ce cas, la gaine de précontrainte est près de la surface du béton et que ce sont les endroits où les vides de coulis sont occasionnés dans le cas d'injections non totalement réussies.

La géométrie donne les valeurs $D/B = 1,60$, $\phi/D = 0,1$ et $p/D = 0,3$. Cela implique que le bloc A appartient à la catégorie des pièces larges avec un β de 0,95, et donc plusieurs fréquences f_i en présence. La variation Δf_1 est attendue à moins de 5%.

- Bloc B :

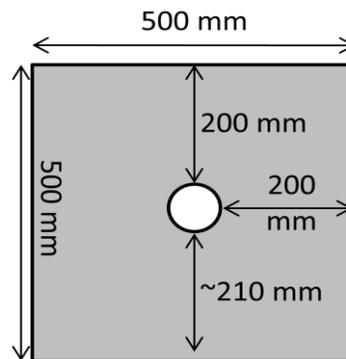


Figure 5.7- Schématisation de la section du Bloc B

Le bloc B a été réalisé dans le but d'étudier un échantillon qui fait la transition entre les plaques PL et le bloc A. En effet, le bloc A est d'autant plus complexe qu'il est profond et permet une plus grande dispersion des ondes dans l'échantillon. Le bloc B ayant une section carrée, le rapport $D/B = 1$ le classe dans la section des pièces larges tout en restant un échantillon plus simple à étudier que le bloc A. On a donc un β de 0,90, impliquant plusieurs fréquences f_i . Aussi, les rapports $\phi/D = 0,2$ et $p/D = 0,5$ donnent une valeur théorique de 10 % à Δf_1 .

- Bloc C :

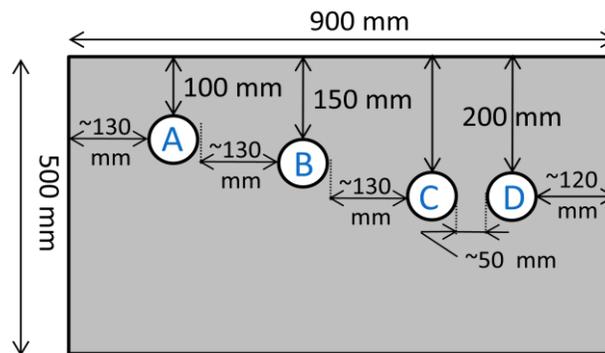


Figure 5.8- Schématisation de la section du Bloc C

Le bloc C a été réalisé afin de comparer la qualité des essais pour des gaines à différentes profondeurs (comparer les résultats du bloc B avec les gaines A et B du bloc C), mais aussi pour observer l'impact de la proximité d'une gaine par rapport à une autre (gainés C et D de l'échantillon).

Afin de distinguer les gaines étudiées sur le bloc C, elles sont identifiées par la lettre du bloc suivi de la lettre les identifiant à la figure 5.8 : CA, CB, CC et CD.

En raison de la complexité du prototype, les harmoniques de l'épaisseur de la pièce n'apparaîtront pas forcément sur le diagramme en fréquence, mais il faudra tout de même s'en assurer. Ainsi, on note une valeur de D/B à 0,56 (catégorie simili-dalles : $\beta = 0,96$) donnant deux fréquences caractéristiques f_1 et f_2 .

Aussi, la vérification de la variation de f_1 sera étudié pour l'ensemble des gaines. Comme pour le bloc B, pour les gaines C et D, $\Delta f_1 = 10\%$. Aussi $p/D = 0,3$ et $0,35$, respectivement pour les gaines A et B, et $\phi/D = 0,2$. Ceci donne des variations Δf_1 de 5 et 7 % pour CA et CB respectivement.

- Bloc D :

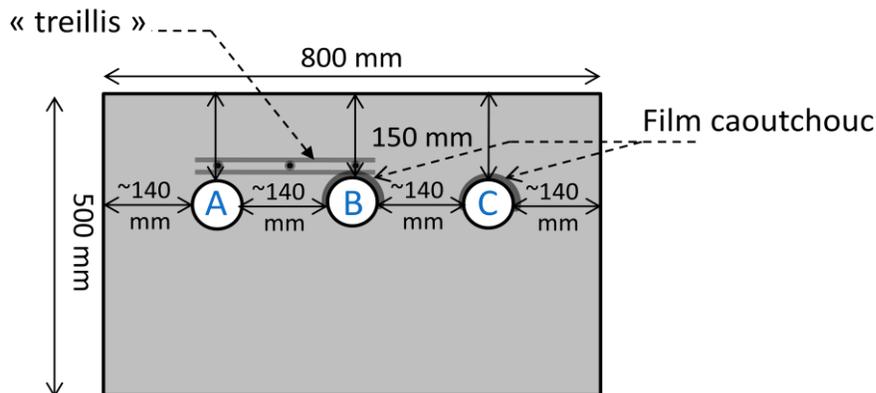


Figure 5.9- Schématisation de la section du bloc D

Afin de pouvoir tester la méthode impact-écho sur une morphologie de structure similaire aux segments de poutres de la section 5.1.3, le bloc D a été conçu avec 3 gaines : les gaines A et B sont superposées de barres métalliques simulant un treillis, les gaines B et C présentent une couche supérieure simulant la présence possible d'une fissure sur le plan des gaines. Plus de détails sont donnés à cet effet à la section 5.1.2.3.

Afin de distinguer les gaines étudiées sur le bloc D, elles sont identifiées par la lettre du bloc suivie de la lettre les identifiant à la figure 5.9 : DA, DB, DC.

Les dimensions du bloc, donnent un rapport de $D/B = 0,63$, donc $\beta = 0,82$ par interpolation, et $\Delta f_1 = 7\%$ comme dans le cas de CB. Comme pour le bloc C, la complexité de cet échantillon donne à penser que l'ensemble des fréquences f_i (pièce type large) ne seront pas aisément retrouvées sur le diagramme en fréquence obtenu après traitement des mesures.

5.1.2.3. Fabrication des échantillons

En raison des dimensions des échantillons, un seul exemplaire est fabriqué par bloc. Contrairement aux plaques PL, les blocs ont été coulés avant le remplissage des gaines en raison du type de remplissage des gaines.

Le béton utilisé pour fabriquer les blocs n'a pas été produit au laboratoire mais dans une usine à béton et livré par camion en raison du volume nécessaire (3 m^3 environ). La fiche quantité de l'usine est présente à l'annexe D du document.

L'ensemble des blocs, ainsi que quelques cylindres (diamètre 100 mm par 200 mm de hauteur) ont été coulés à l'aide de la même gâchée. Les blocs B, C et D ont été coulés en position alors que le bloc A a été coulé à la verticale (figure 5.10). Des crochets métalliques ont été placés aux tiers de la longueur des blocs afin de pouvoir les déplacer à l'aide d'un chariot élévateur. Sur le bloc A, les crochets sont positionnés sur un côté de l'échantillon et un troisième crochet a été introduit afin de repositionner le bloc à la verticale pour les essais impact-écho.



Figure 5.10- Blocs de béton après la coulée

En ce qui concerne le bloc D, le ferrailage ainsi que la simulation des fissures ont été effectués avant la coulée du béton. Le « treillis » (figure 5.11) se compose comme suit : barres 15M sur 3 étages, espacées de 125 mm , avec en longueur 3 barres de 1500 mm et en largeur deux fois 15 barres de 300 mm . Les fissures ont été simulées par une fine membrane de caoutchouc de quelques millimètres d'épaisseur (figure 5.12) placée sur la moitié supérieure des gaines. Cette membrane va réagir de la même manière qu'un film d'air (coefficient de réflexion négatif). Le ferrailage a été simplement appuyé sur les gaines DA et DB lors de la coulée (figure 5.13).



Figure 5.11- Photographie du "treillis" utilisé pour le bloc D



Figure 5.12- Film de caoutchouc placé sur les gaines DB et DC pour simuler la présence d'un plan de fissure.

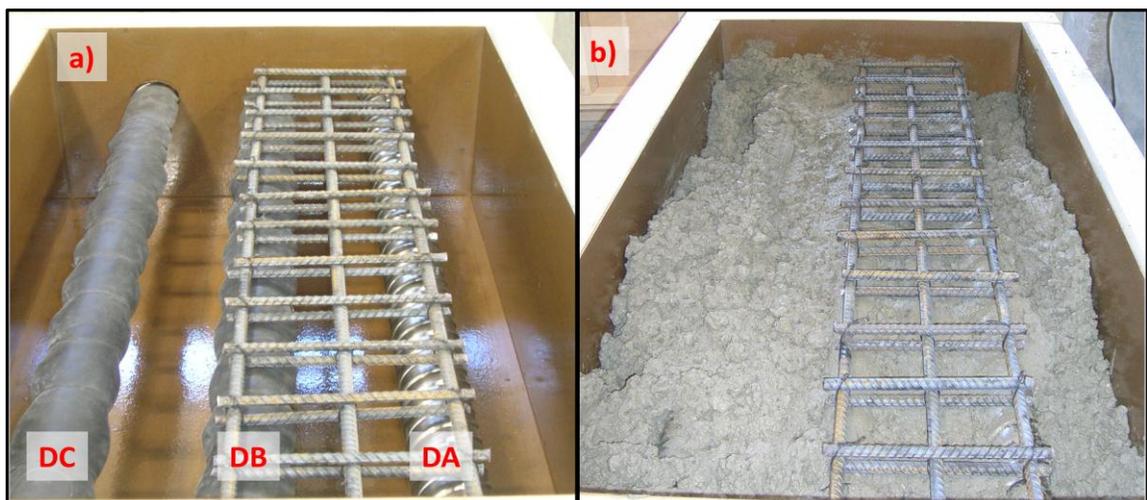


Figure 5.13- Position des éléments dans le bloc D

a) positionnement théorique : b) positionnement au cours de la coulée de béton

Les cylindres de béton ont été fabriqués en vue d'essais de résistance en compression ainsi que pour estimer la vitesse de propagation des ondes et la masse volumique du matériau.

En ce qui concerne le coulis, il a été introduit dans les gaines après murissement du béton. Afin d'obtenir un pourcentage de remplissage des gaines variable sur une grande partie de la longueur de la gaine, les échantillons ont d'abord été inclinés d'un angle α (figure 5.14) de 5° . Le mélange de coulis utilisé ainsi que son procédé de fabrication ont été les mêmes que pour les plaques ($e/c = 0,35$). Un récipient a été taré à $4,5 L$ et borné à plus et moins 10% afin d'obtenir un remplissage similaire pour toutes les gaines. De plus à l'extrémité inférieure des gaines, un bouchon a été mis en place afin de bloquer l'écoulement du coulis.

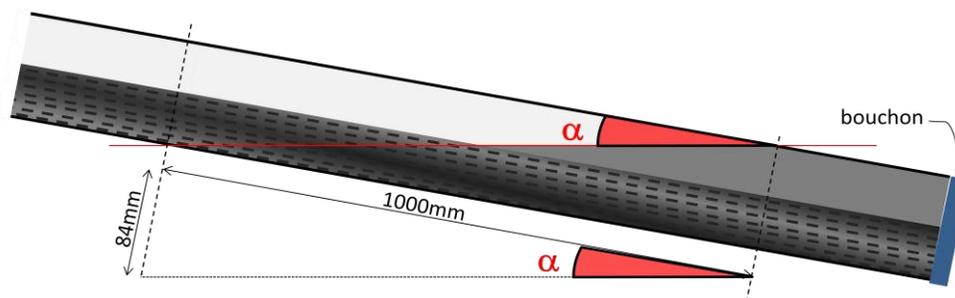


Figure 5.14- Schématisation de la position de remplissage des gaines et de l'angle α (volume total de coulis de $4,5 L$)

Les gaines ont été remplies par gravité (non injectées) en raison de la précision voulue sur le volume de coulis dans les gaines. La procédure a été suivie comme tel : après malaxage de coulis (figure 5.15 a)), ce dernier a été pompé par le malaxeur dans le récipient taré (figure 5.15 b)) ; le coulis a été introduit dans les gaines à l'aide d'un entonnoir (figure 5.15 c)) suite au positionnement du bloc à l'angle α souhaité (figure 5.16).

Suite à l'ajout d'une barre 15M, le coulis a été vibré à l'aide 'un vibreur en contact avec la barre dans le but de s'assurer une répartition homogène et uniforme du coulis sur la section des gaines et ainsi éviter toute accumulation de coulis dans les rainures internes des gaines aux endroits non souhaités (figure 5.17 a) et b)). Finalement, les autres barres d'armature ont été introduites dans les gaines (figure 5.17 c)).

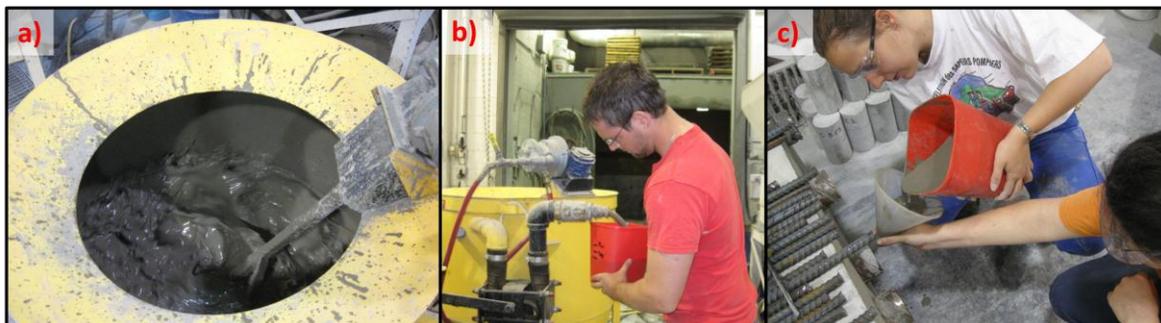


Figure 5.15- Préparation du coulis et remplissage des gaines



Figure 5.16- Bloc A : mise en place pour le remplissage de coulis

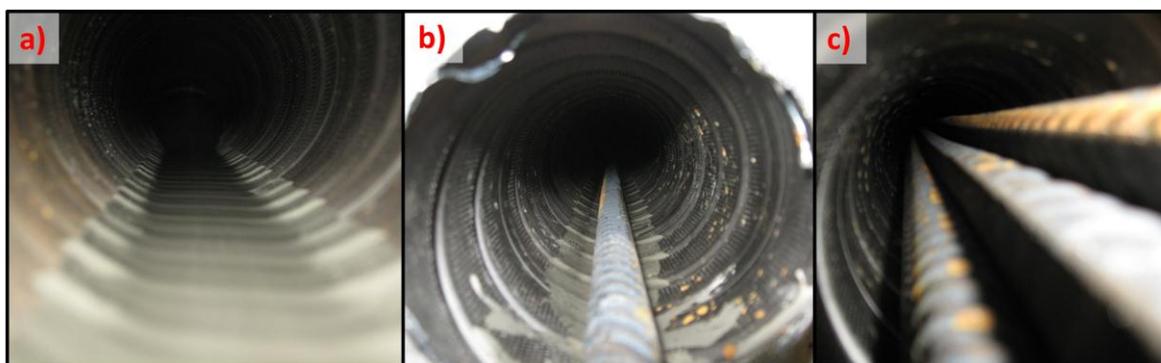


Figure 5.17- Etapes de remplissage des gaines (vues à l'entrée de la gaine côté « vide de coulis »)

Afin de s'assurer de la bonne qualité de remplissage de la gaine, la barre la plus haute dans la gaine a été retirée : l'enrobage de coulis dont elle dispose étant à peu près en son milieu (figure 5.18) le remplissage a été considéré comme très satisfaisant.



Figure 5.18- Vérification de la quantité de coulis dans la gaine

Sur la même gâchée de coulis, un cylindre de coulis a été fait afin de procéder à des essais impact-écho pour estimer la vitesse de propagation des ondes dans le coulis et pour connaître la masse volumique du matériau.

5.1.3. Segments de poutres (*in situ*)

5.1.3.1. Provenance des échantillons

Les segments de poutres à disposition pour les essais proviennent des échangeurs Dufferin-Montmorency désassemblés il y a environ 2 ans en raison d'une réorganisation de l'espace de circulation routière du côté Est de la ville de Québec.

Ces échantillons ont été mis à disposition par le MTQ car ils font partie d'une étude effectuée sur les échangeurs afin de qualifier l'état de ces derniers après une mise en service d'environ 40 ans. Cette étude avait également pour but de comparer l'état de différentes parties de ces échangeurs ayant été soumises à diverses conditions de service. Certaines portions avaient été soumises à la circulation routière et aux conditions environnementales de même qu'à l'utilisation de sel déverglaçants alors que d'autres

portions, n'ayant jamais été ouvertes à la circulation routière, n'avait été soumises qu'aux variations de température journalière et saisonnière.

Les études réalisées à ce jour sur ces portions d'échangeurs sont présentés en détail à la référence [44].

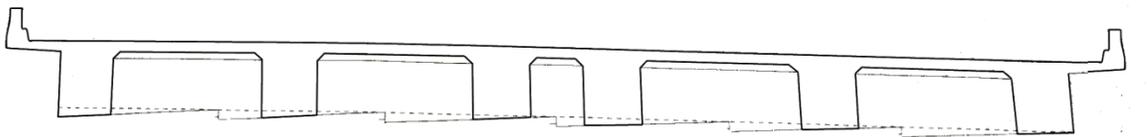


Figure 5.19- Section type de la bretelle B2 [44]

Les segments de poutres prélevées sont des segments de poutres massives (exemple figure 5.19) précontraintes par post-tension au niveau des points hauts et des points bas des profils des câbles de précontrainte de même qu'aux ancrages de ceux-ci. Les dimensions moyennes de chaque pièce sont de 1,1 à 1,5 m de large par 1,6 m de haut et de 2 à 3 m de long. La dalle fait aussi partie intégrante des segments de poutres prélevés.

Les segments associés aux points haut et bas ont été utilisés pour l'étude de l'application des méthodes impact-écho et endoscopie. Les segments associés aux ancrages ont été prélevés afin de vérifier la qualité de l'injection aux extrémités des segments de poutres.

5.1.3.2. Désignation des segments

Tel que mentionné, les échantillons proviennent donc de deux échangeurs : l'un ayant été utilisé pour la circulation routière (bretelle B2), le second n'ayant jamais été ouvert à la circulation (bretelle B4). Plusieurs segments ont été prélevés sur la bretelle B2 et la bretelle B4. La localisation de ces segments de même que leur nomenclature sont précisées aux figures 5.20 et 5.21 de même qu'au tableau 5.1.

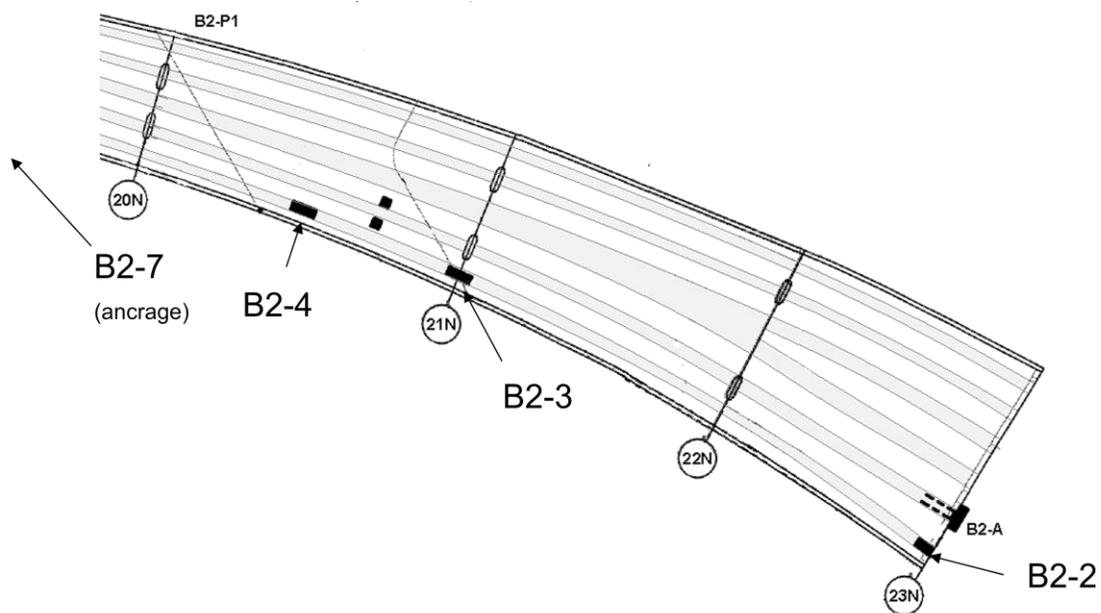


Figure 5.20- Localisation des prélèvements de segments de poutres sur la bretelle B2 [44]

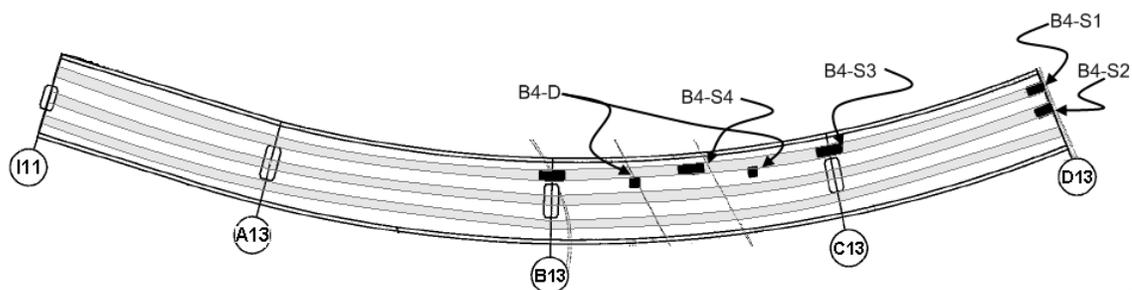


Figure 5.21- Localisation des prélèvements de segments de poutres et de dalles sur la bretelle B4 [44]

Tableau 5.1 – Nomenclature des segments de poutres

| Bretelle B2 | | Bretelle B4 | |
|-------------|------|-------------|------|
| Ancrages | B2S2 | Ancrages | B4S1 |
| | B2S7 | | B4S2 |
| Point haut | B2S3 | Point haut | B4S3 |
| Point bas | B2S4 | Point bas | B4S4 |

5.1.3.3. Etat et caractéristiques des segments de poutres

Le prélèvement des segments de poutres sur les bretelles a été effectué à l'aide de grues après avoir préalablement scié longitudinalement, ou déchiqueté avec les mâchoires hydrauliques, les tabliers et réduit leur section aux environs du point de moment minimal (figure 5.22). Ensuite, le sciage des segments cibles a été effectué et l'ensemble des segments de poutres a été transféré au Centre des Services du MTQ de Québec et y sont demeurés entreposés, à l'extérieur, durant une période d'environ 2 ans. Finalement, avant la réalisation des essais par impact-écho et endoscopie, il a fallu, dans certains cas, modifier l'orientation des segments de segments de poutres afin de faciliter les essais. Par exemple, en s'assurant que les surfaces de béton sélectionnées étaient facilement accessibles pour la réalisation des essais.



Figure 5.22- Étape intermédiaire pour le prélèvement d'une section de poutre de la bretelle B4 [44]

Les dimensions mesurées des segments de poutres sont inscrites dans le tableau 5.2. Les segments associés aux points hauts et points bas mesurent 3 m de long ce qui va permettre une étude sur un grand nombre de points de mesure lors des essais impact-écho, mais aussi pour l'endoscopie. Les segments d'ancrages, quant à eux, ont des dimensions plus petites puisque seule une de leurs extrémités est à l'étude. Les gaines utilisées lors de la construction sont métalliques et de géométrie crénelée de 83 mm de diamètre moyen.

Tableau 5.2 - Dimensions des segments de poutres (référence à la figure 5.23)

| Type | Nom | h (m) | L (m) | l (m) | l' (m) |
|------------|------|---------|---------|---------|----------|
| Ancrage | B2S2 | 1,50 | 2,05 | 1,75 | 1,25 |
| | B2S7 | 1,85 | 2,00 | 1,90 | 1,40 |
| | B4S1 | 1,60 | 2,45 | 1,50 | 1,10 |
| | B4S2 | 1,70 | 2,40 | 2,25 | 1,10 |
| Point haut | B2S3 | 1,60 | 3,00 | 1,45 | 1,10 |
| | B4S3 | 1,55 | 3,10 | 1,60 | 1,10 |
| Point bas | B2S4 | 1,60 | 3,00 | 1,45 | 1,10 |
| | B4S4 | 1,60 | 3,05 | 1,40 | 1,10 |

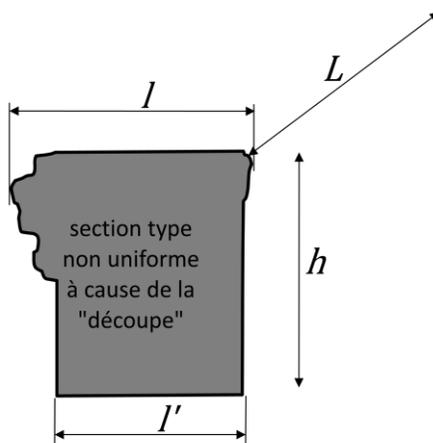


Figure 5.23 - Schématisation des longueurs apparaissant au le tableau 5.2

En ce qui concerne le rapport D/B des points hauts et bas, en prenant $D = 1,60$ m et $B = 1,10$ m, on obtient $D/B = 1,45$. Ainsi $\beta = 0,94$, ce qui entraîne théoriquement l'apparition de plusieurs harmoniques f_i .

Etant donné les dimensions des segments de poutres, la variation Δf_1 ne peut apparaître. Effectivement, le rapport ϕ/D est inférieur à 0,1 et p/D est inférieur ou égale à 0,1. En outre, en raison de la complexité des sections, étudier la profondeur de la pièce à l'aide de l'impact-écho devient une tâche difficile.

- Les points hauts :

Les deux segments de poutres associés aux points hauts de profil des câbles de précontrainte ont été débarrassés de leur membrane routière dont il reste quelques fragments en surface (figure 5.24 a)). Par conséquent les surfaces d'étude ne sont pas aussi nettes que des surfaces de coffrage (surfaces souvent utilisées pour l'impact-écho). Les figures 5.24 et 5.25 montrent que les gaines de précontrainte se situent dans le bas du tablier et qu'un grand nombre de barres d'acier passif est visible en raison du rognage effectué lors du démembrage des segments de poutres.

Les gaines d'un diamètre de 83 mm contiennent 19 torons qui occupent une grande partie de la section de la gaine (un peu plus de 50 % de la section). La figure 5.26 montre que les gaines contenues dans les points hauts présentent des vides partiels de coulis. Les vides apparaissant dans les gaines aux deux extrémités des sections de poutres, il semble que le vide de coulis soit présent sur toute la longueur des sections. Toutefois, les câbles sont adéquatement protégés car le coulis enrobe l'ensemble des torons. Par contre, en raison des coupes et d'un entreposage en plein air, le coulis présente, en partie supérieure, un effritement important. Les mêmes constatations ont été faites autant sur l'échantillon B2S3 que sur B4S3. Par contre, un plan de fissuration horizontal sur le dessus des gaines était présent sur l'échantillon B4S3 (figure 5.27). Ces fissures ont été estimées présentes non pas en raison d'un défaut de fabrication mais initiées au moment du démembrage.

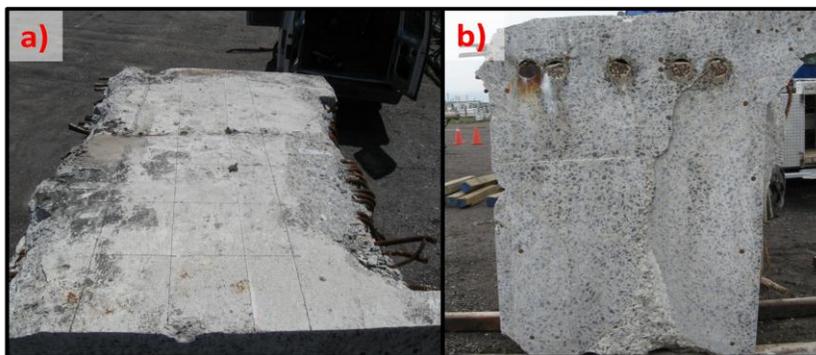


Figure 5.24- Segment de poutre B2S3
a) surface supérieure ; b) section côté Nord



Figure 5.25- Segment de poutre B4S3

a) vue côté Est (évacuation d'eau au centre) ; b) Section côté Nord ; c) surface supérieure



Figure 5.26- Gros plan sur les gaines A et B (voir figure 5.28) du segment de poutre B2S3



Figure 5.27- Vue sur le plan de fissuration (côté Nord) du segment de poutre B4S3

Afin de pouvoir identifier adéquatement chacune des gaines de précontrainte associées aux divers segments de poutres, la nomenclature suivante a été choisie : le nom du segment de poutre à l'étude suivi d'une lettre. Les lettres associées à chacune des gaines sont montrées aux figures 5.28 et 5.29 pour les segments de poutres B2S3 et B4S3 respectivement. Egalement, l'orientation des segments de poutres (Nord-Sud) est indiquée sur ces mêmes figures.

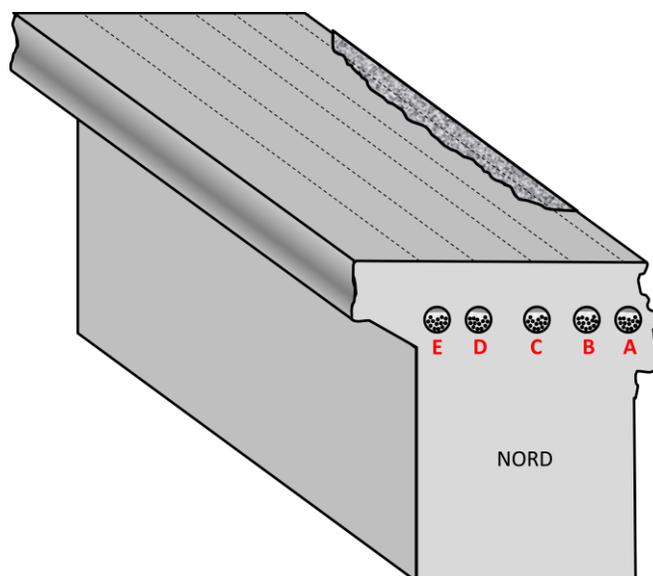


Figure 5.28- Schématisation du segment de poutre B2S3

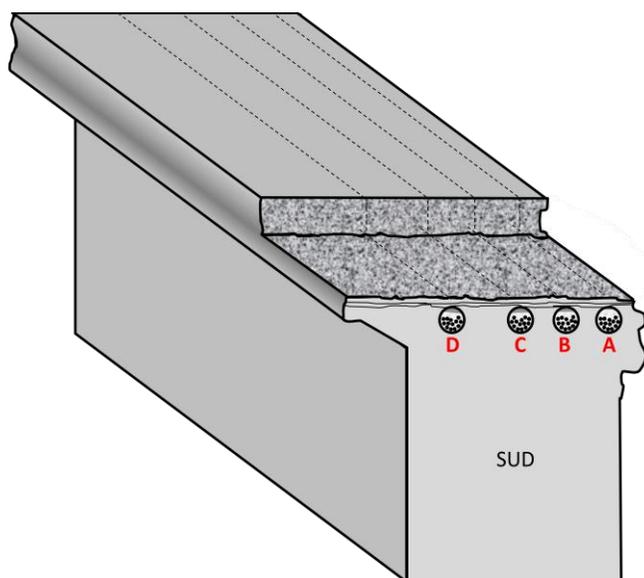


Figure 5.29- Schématisation du segment de poutre B4S3

La position de chacune des gaines des deux segments de poutres a été mesurée (mesures illustrées à la figure 5.30). Les tableaux 5.3 et 5.4 rassemblent l'ensemble des informations recueillis. On y retrouve la position des gaines depuis la face supérieure des segments de poutres. De même que l'espace mesuré à mi-hauteur des gaines, depuis les faces (Est et Ouest) ou entre les diverses gaines.

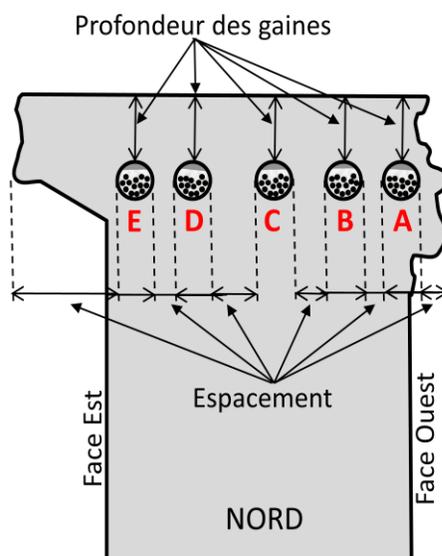


Figure 5.30- Mesures effectuées sur la face Nord de la section de poutre B2S3

Tableau 5.3- Mesures effectuées sur B2S3 autour des gaines

| | Zone Sud | | | | | | |
|----------------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| | extrémité | gaine A | gaine B | gaine C | gaine D | gaine E | extrémité |
| Profondeur des gaines (mm) | | 170* | 183 | 188 | 200 | 202 | |
| Espacement (mm) | 150 | 25 | 160 | 150 | 55 | 270 | |
| | Zone Nord | | | | | | |
| | extrémité | gaine E | gaine D | gaine C | gaine B | gaine A | extrémité |
| Profondeur des gaines (mm) | | 185 | 178 | 175* | 180* | 178* | |
| Espacement (mm) | 300 | 70 | 185 | 105 | 25 | 150 | |

(*) valeur approximative en raison de l'état de surface du segment de poutre à l'extrémité

Tableau 5.4- Mesures effectuées sur B4S3 autour des gaines

| | | Zone Sud | | | | | |
|-------------------------------------|--|-----------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| | | extrémité | gaine D | gaine C | gaine B | gaine A | extrémité |
| Profondeur des gaine (<i>mm</i>)s | | 158* | 135* | 125* | 135* | | |
| Espacement (<i>mm</i>) | | 380 | 250 | 60 | 65 | 290 | |
| | | Zone Nord | | | | | |
| | | extrémité | gaine A | gaine B | gaine C | gaine D | extrémité |
| Profondeur des gaines (<i>mm</i>) | | 166 | 163* | 190* | 152* | | |
| Espacement (<i>mm</i>) | | 200 | 55 | 40 | 255 | 370 | |

(*) valeur approximative en raison de l'état de surface du segment de poutre à l'extrémité

- Points bas :

Les segments de poutres associés au point bas du profil des câbles de précontrainte ont été retournés sur eux-mêmes afin de présenter les faces inférieures coffrées des poutres sur le haut des échantillons et ainsi rendre possible la prise de données à l'aide de l'impact-écho. Toutefois, il est à noter que le démembrement de ces segments de poutres, de même que leur basculement, a entraîné un désagrément des surfaces exposées (figures 5.31 et 5.32). Egalement, il est noté des microfissures le long du tracé des gaines (figure 5.33).

Tout comme les segments de poutres associés aux points hauts, les segments de poutres associées aux points bas contiennent un grand nombre de barres d'armature passive. Par contre, il n'y a pas présence de fissures sur le plan des gaines. De plus, les gaines semblent entièrement remplies de coulis (figure 5.34). Globalement, les segments associés aux points bas montrent un meilleur état de conservation que ceux associés aux points hauts.



Figure 5.31- Segment de poutre B2S4

a) section retournée côté Nord ; b) surface d'étude (côté inférieur) ; c) section retournée côté Sud



Figure 5.32- Segment de poutre B4S4

a) vue côté Est ; b) section côté Sud ; c) surface d'étude (côté inférieur)



Figure 5.33- Microfissuration le long des gaines (tracés horizontaux) sur B4S4



Figure 5.34- Vue sur les gaines de B2S4

De même manière que précédemment, les gaines présentes dans les segments de poutres sont identifiées à l'aide du nom du segment de poutre suivi d'une lettre. Les figures 5.35 et 5.36 montrent l'identification de chaque gaine. La localisation plus précise de ces gaines se retrouve à l'aide des paramètres des tableaux 5.5 et 5.6.

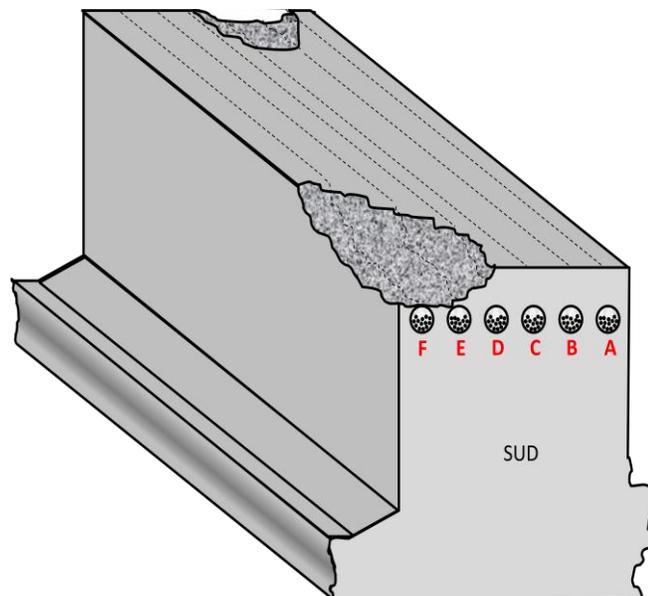


Figure 5.35 - Schématisation du segment de poutre B2S4

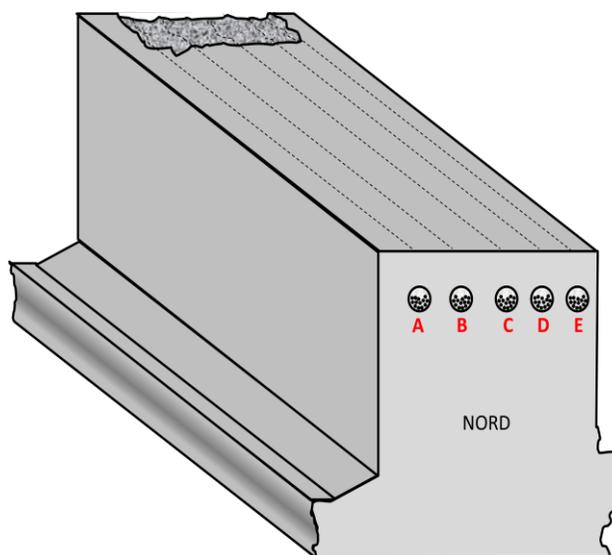


Figure 5.36- Schématisation du segment de poutre B4S4

Tableau 5.5- Mesures effectuées sur B2S4 autour des gaines

| | | Zone Sud | | | | | | | |
|--|--|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| | | extrémité | gaine F | gaine E | gaine D | gaine C | gaine B | gaine A | extrémité |
| Profondeur des gaines (<i>mm</i>) | | | 70* | 70* | 70* | 75* | 75 | 84 | |
| Espacement (<i>mm</i>) | | 100 | 40 | 40 | 150 | 50 | 45 | 135 | |
| | | Zone Nord | | | | | | | |
| | | extrémité | gaine A | gaine B | gaine C | gaine D | gaine E | gaine F | extrémité |
| Profondeur des gaines (<i>mm</i>) | | | 78 | 75* | 85* | 92* | 86 | 95 | |
| Espacement (<i>mm</i>) | | 100 | 70 | 25 | 140 | 25 | 60 | 95 | |

(*) valeur approximative en raison de l'état de surface du segment de poutre à l'extrémité

Tableau 5.6- Mesures effectuées sur B4S4 autour des gaines

| | | Zone Sud | | | | | | |
|-------------------------------------|--|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| | | extrémité | gaine E | gaine D | gaine C | gaine B | gaine A | extrémité |
| Profondeur des gaines (<i>mm</i>) | | | 75* | 50* | 45* | 55* | 57* | |
| Espacement (<i>mm</i>) | | 140 | 200 | 80 | 80 | 70 | 190 | |
| | | Zone Nord | | | | | | |
| | | extrémité | gaine A | gaine B | gaine C | gaine D | gaine E | extrémité |
| Profondeur des gaines (<i>mm</i>) | | | 83 | 84 | 87 | 85 | 75 | |
| Espacement (<i>mm</i>) | | 185 | 75 | 80 | 75 | 195 | 150 | |

(*) valeur approximative en raison de l'état de surface du segment de poutre à l'extrémité

- Ancrages :

Les ancrages ne sont pas des segments de poutres qui servent à l'étude impact-écho, ni à l'endoscopie. Ils seront ouverts sous les plaques d'ancrage pour observer la qualité d'injection. L'état de ces segments de poutres est identique aux précédentes. Les coques de protection en béton coulées sur les plaques d'ancrages sont abimées pour certaines, laissant apparaître les plaques (figure 5.37). De même, une tête d'ancrage a été sectionnée sur un échantillon (figure 5.38). Quant au nombre de gaines, et donc de têtes d'ancrage, contenu dans chaque segment de poutre varie (figure 5.39).



Figure 5.37- Vue sur les ancrages visibles sur le segment de poutre B2S7



Figure 5.38- Ancre sectionné visible sur le segment de poutre B4S2

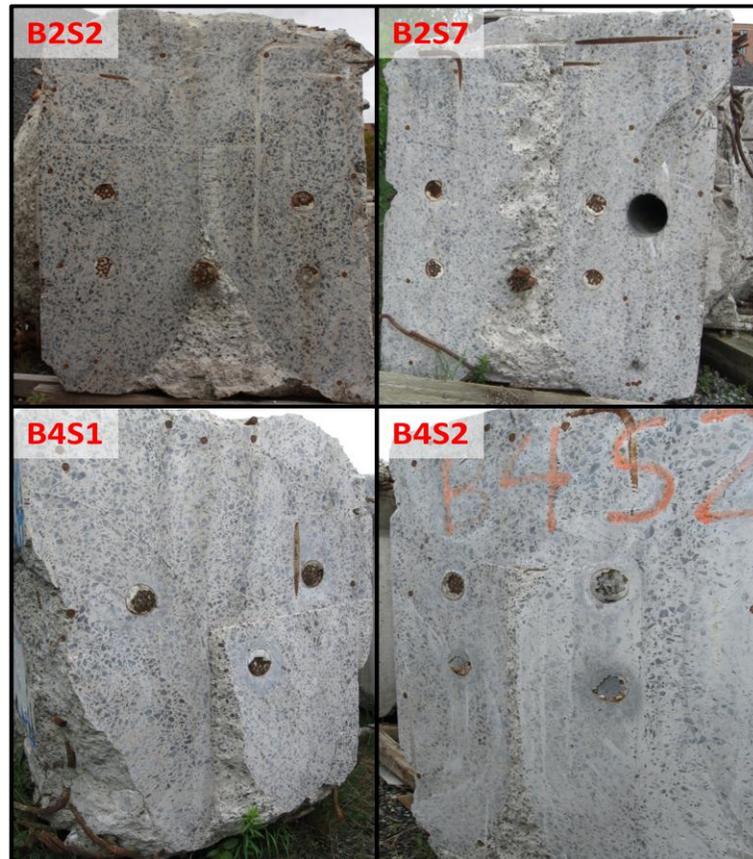


Figure 5.39- Section des ancrages (côté opposé aux ancrages)

5.2. Protocole expérimental

Les appareillages d'impact-écho et d'endoscopie étant tous deux de nouvelles acquisitions du laboratoire du CRIB, une prise en main est obligatoire afin de mettre en place un protocole expérimental efficace durant les essais. Ainsi une évaluation des capacités de l'appareil impact-écho a été faite avec attention. L'endoscope demandant moins de précision, une simple reconnaissance de l'appareil, de ses accessoires et de son logiciel de commande a été effectué. Une fois le fonctionnement des instruments acquis, le protocole des mesures a été établi.

5.2.1. Prise en main des appareils

5.2.1.1. Capacités de l'instrument impact-écho

L'instrument utilisé (figure 5.40) provient de l'entreprise Impact-Echo Instrument [45]. En plus des deux trousseaux de billes (10 en tout, voir figure 3.5 page 19), d'une carte d'acquisition et d'un ordinateur fourni avec un programme de traitement des données, l'appareil comprend trois outils de détection des ondes : un capteur dit « pistolet », un capteur « droit » et un double capteur.



Figure 5.40- Différentes parties et capteurs de l'appareil impact-écho

- a) carte d'acquisition face arrière ; b) carte d'acquisition face avant ; c) ordinateur compact ;
 d) capteur « droit » ; e) capteur « pistolet » ; f) double capteur.

Tous les capteurs sont montés avec le même transducteur. La courbe de réponse en fréquence du transducteur n'est pas fournie par le concepteur, mais il a été choisi pour sa capacité en réponse dans les fréquences recherchées, c'est-à-dire en dessous de 60 kHz (toujours d'après le constructeur). Les deux capteurs « pistolet » et « droit » possèdent un circuit électrique intégré nécessitant une alimentation (par pile). De ce fait, un bouton presseur sur le capteur doit être actionné durant l'acquisition des mesures. Les circuits internes ont été identifiés comme des amplificateurs de signaux. Les deux capteurs sont

utilisés pour la méthode impact-écho classique. Le double capteur, quant à lui, est utilisé pour déterminer la vitesse de propagation des ondes en surface d'un ouvrage et aussi la profondeur de fissures perpendiculaires à la surface d'étude (figure 5.41). Dans ce cas là, c'est la différence de temps entre les deux capteurs pour la réception du signal étudié qui permet de déterminer la profondeur d'une fissure.

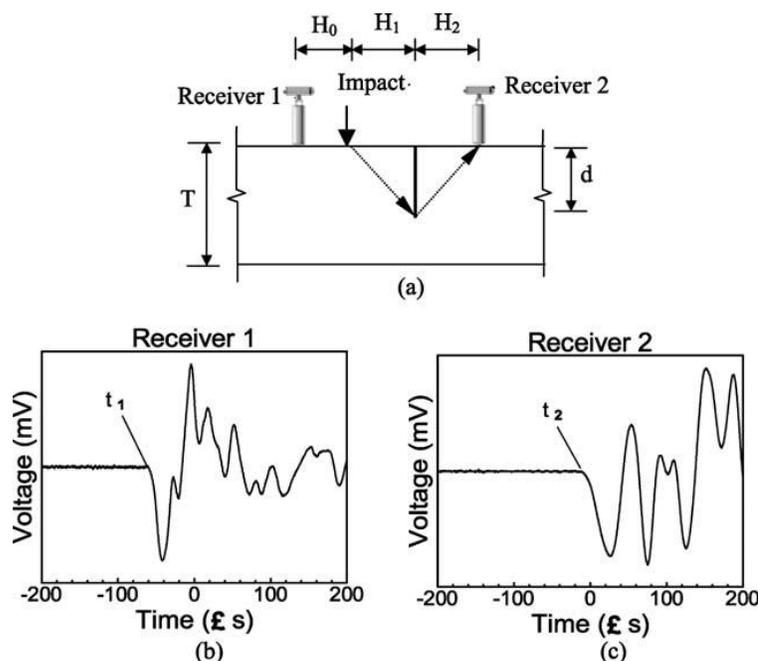


Figure 5.41 - Schématisation de l'utilisation du double capteur pour l'estimation de la profondeur d'une fissure [39]

Comme le capteur « droit » et le capteur « pistolet » possèdent les mêmes fonctions et conception électronique, l'utilisation de l'un ou de l'autre dépend surtout de la préférence de l'utilisateur. Effectivement, si la personne qui maintient le capteur doit aussi créer l'impact avec une bille, le « pistolet » sera plus pratique car beaucoup plus stable.

Les capteurs, sont reliés à la face arrière de la carte d'acquisition. Celle-ci possède deux entrées (figure 5.40 a)) : l'entrée A sert à l'acquisition des signaux traités par FFT (transformée de Fourier rapide), l'entrée B sert à l'acquisition du second signal lors de l'utilisation du double capteur. Ainsi, la carte d'acquisition transmet les signaux à l'ordinateur qui traite les mesures. L'ordinateur, comme la carte d'acquisition, possède une

batterie permettant une autonomie d'au moins 4h sans nécessité de recharger les instruments. La carte d'acquisition peut être éteinte à tout moment grâce à un bouton « allumé/éteint » qui peut être désactivé dès que la prise de mesure est arrêtée. Généralement, c'est l'alimentation électrique de l'ordinateur qui limite en temps l'utilisation de l'appareil car l'ordinateur est en fonction en continu pendant toute la période de la prise de mesures alors que la carte d'acquisition eut être éteinte entre deux séries de prises de mesures.

Le programme utilisé pour les mesures, Impact-E, a été fourni avec le matériel. Son fonctionnement est expliqué à l'annexe F (page 250). Le choix des paramètres d'acquisition est important pour le traitement des mesures. Effectivement, ceux-ci permettent d'établir la résolution en fréquence des résultats. Suivant le tableau 5.7, la résolution en fréquence est plus fine selon que la période d'échantillonnage et le nombre d'échantillons mesurés augmentent. Par contre, plus la résolution en fréquence s'améliore, plus l'amplitude des pics diminue.

Tableau 5.7- Résolution en fréquence de l'instrument IE en fonction des réglages choisis
(En foncé : résolution très précise ; en clair : résolution faible)

| Résolution en fréquence (kHz) | | Période d'échantillonnage | | | | |
|-------------------------------------|----------------|---|-----------|-----------|-----------|------------|
| | | 0,5 μ s | 1 μ s | 2 μ s | 5 μ s | 10 μ s |
| | | Fréquence d'échantillonnage équivalente | | | | |
| | | 2 MHz | 1 MHz | 500 kHz | 200 kHz | 100 kHz |
| Nombre d'échantillons mesurés | 512 points | 3,91 | 1,95 | 0,98 | 0,39 | 0,20 |
| | 1024 points | 1,95 | 0,98 | 0,49 | 0,20 | 0,10 |
| | 2048 points | 0,98 | 0,49 | 0,24 | 0,10 | 0,05 |

Aussi, à la section 3.2.2, le choix de la bille à utiliser a été mis en avant. Afin de vérifier l'exactitude de l'équation (3.6) et donc des valeurs contenues dans le tableau 5.8, des essais ont été réalisés avec différents critères. Jumelés aux choix des paramètres d'acquisition, les

différences entre les résultats théoriques obtenus au tableau 5.8 les résultats pratiques de la figure 5.42 sont très visibles.

Tableau 5.8- f_{max} théorique obtenue à partir du diamètre d des billes de l'instrument IE et de l'équation (3.6)

| Bille ² | Diamètre D (mm) | Fréquence maximum théorique (kHz) |
|--------------------|--------------------|--------------------------------------|
| PB1 | 3 | 97 |
| PB2 | 4 | 73 |
| PB3 | 5 | 58 |
| PB4 | 6 | 49 |
| PB5 | 8 | 37 |
| B1 | 9 | 33 |
| B2 | 11 | 27 |
| B3 | 13 | 23 |
| B4 | 16 | 19 |
| B5 | 19 | 16 |

Ainsi, sur la figure 5.42, on observe concrètement les problèmes liés au choix des paramètres d'acquisition et de la bille. En effet, les résultats obtenus permettent d'observer les faits suivants (essais effectués sur la même pièce au même endroit) :

- Plus la période d'échantillonnage ΔT diminue (N reste constant à 2048 points), plus l'amplitude des pics augmente ce qui peut être décisif pour analyser les résultats de mesures, surtout pour les fréquences proches de f_{max} théorique ;
- En ce qui concerne le choix de la bille à utiliser, les valeurs f_{max} théoriques (inscrites sous les billes entre parenthèse sur la figure 5.42) ne sont pas forcément exactes. Effectivement, même si l'échantillon étudié n'est pas censé produire de

² La nomenclature des billes a été effectuée en fonction de leur diamètre d : le trousseau des billes les plus petites est dénommé par les lettres PB, tandis que l'autre trousseau est dénommé B ; les billes sont numérotées de 1 à 5 suivant leur diamètre croissant.

réponse dans des fréquences proches de f_{max} théorique, on remarque que les fréquences excitées sont plus faibles que celles attendues.

Ces quelques résultats montrent donc qu'il est nécessaire de savoir exactement quelles fréquences sont recherchées afin de ne pas les manquer. Avant de commencer une mesure, les valeurs de N et ΔT doivent avoir été sélectionnées au préalable tout comme le choix de la bille à utiliser pour l'essai. Si les valeurs de fréquences à obtenir sont inconnues, il serait préférable de commencer avec une faible résolution en fréquence et une bille de petit diamètre. Toutefois, une bille de faible diamètre sera limitée quant à la pénétration des ondes en profondeur. Il en résulte des pics de plus faible amplitude dans les basses fréquences (résultats visibles sur la figure 5.42).

Une mesure unique par zone étudiée n'est ni forcément exacte, ni souhaitable. Effectivement, rien n'indique que l'instrument soit infaillible. De plus, l'impact étant produit par l'utilisateur, il peut être très aléatoire. En effet, même avec une attention importante portée pendant les essais, rien n'indique que l'utilisateur exerce exactement la même force au moment de chaque impact de même qu'il effectue un geste identique; ces deux facteurs influençant le temps de contact de la bille t_c .

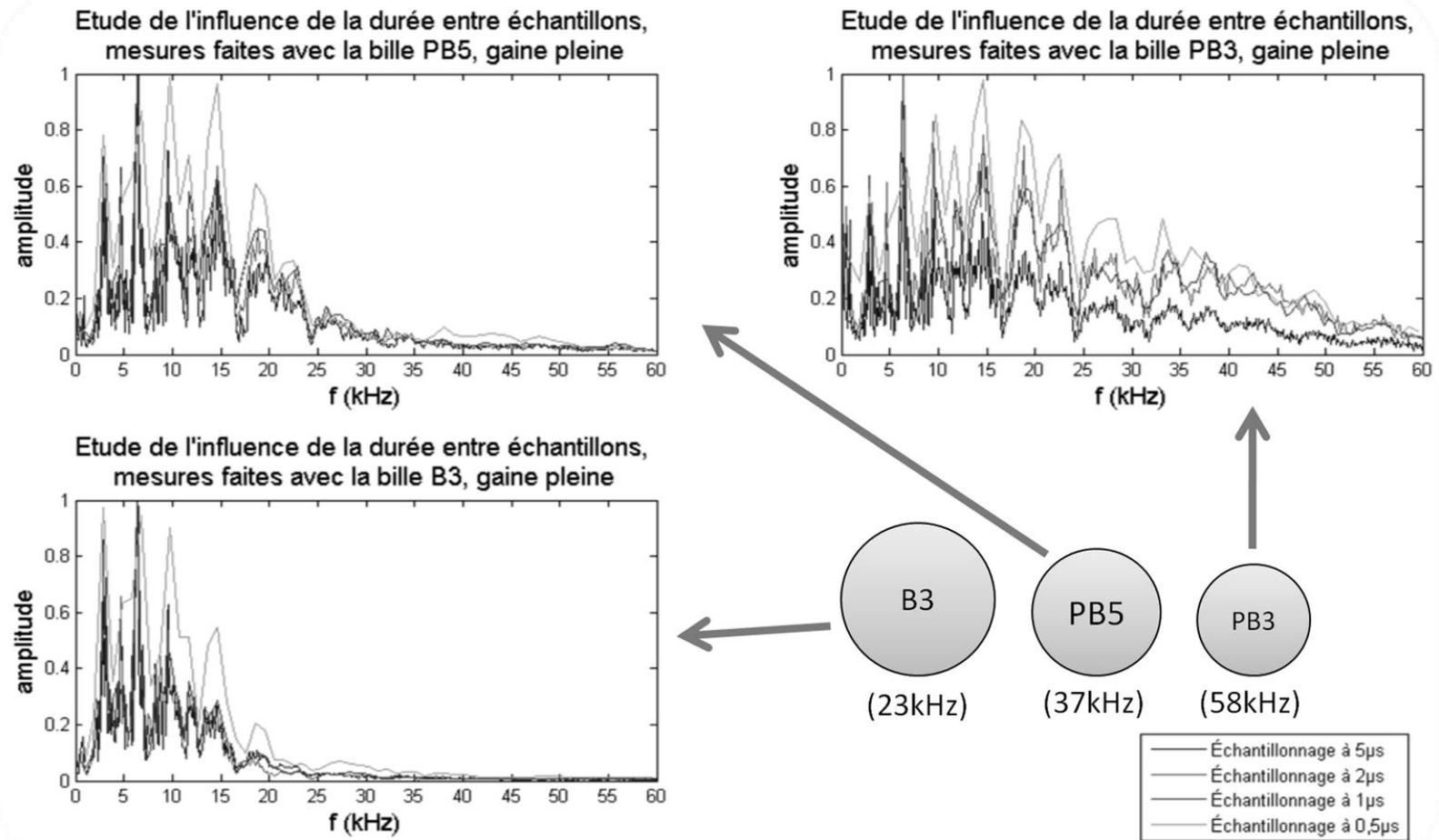


Figure 5.42- Etude de l'influence des paramètres d'échantillonnage et du choix de la bille ($N = 2048$)

Ainsi, augmenter le nombre de mesures en un point d'étude permet de diminuer ces aléas. Reste à déterminer combien de mesures sont nécessaires, au minimum, pour avoir une répétabilité acceptable des essais. Pour ce faire, des essais ont été effectués avec différents paramètres d'acquisition et différentes billes et le constat a toujours été le même : les mesures tendent très vite à un résultat constant.

En effet, sur la figure 5.43, des mesures effectuées sur un échantillon ont été moyennées suivant un nombre x de mesures et comparées à la moyenne de 50 mesures effectuées toujours au même endroit. Ainsi, on remarque que plus le nombre de mesures augmente, plus la courbe se confond avec la moyenne de 50 mesures. Il paraît même acceptable de se contenter de 10 mesures en un point pour obtenir des résultats exacts. D'ailleurs, il est fortement visible sur les figures 5.44 et 5.45 que la différence d'écart entre la moyenne de 15 et 10 mesures par rapport à 50 mesures est quasiment identique.

Mais dans le but d'augmenter le rendement d'essais sur des structures, il est nécessaire d'optimiser le protocole de mesures. Pour ce faire, une attention particulière a été portée à la moyenne sur 5 mesures (ce qui réduit la durée des essais par 2 comparé à une moyenne sur 10 mesures). En observant les résultats portés sur la figure 5.46, il est constaté que même si il y a un écart avec la moyenne sur 50 mesures légèrement plus important, les pics de fréquences obtenus sont tous présents et facilement identifiables.

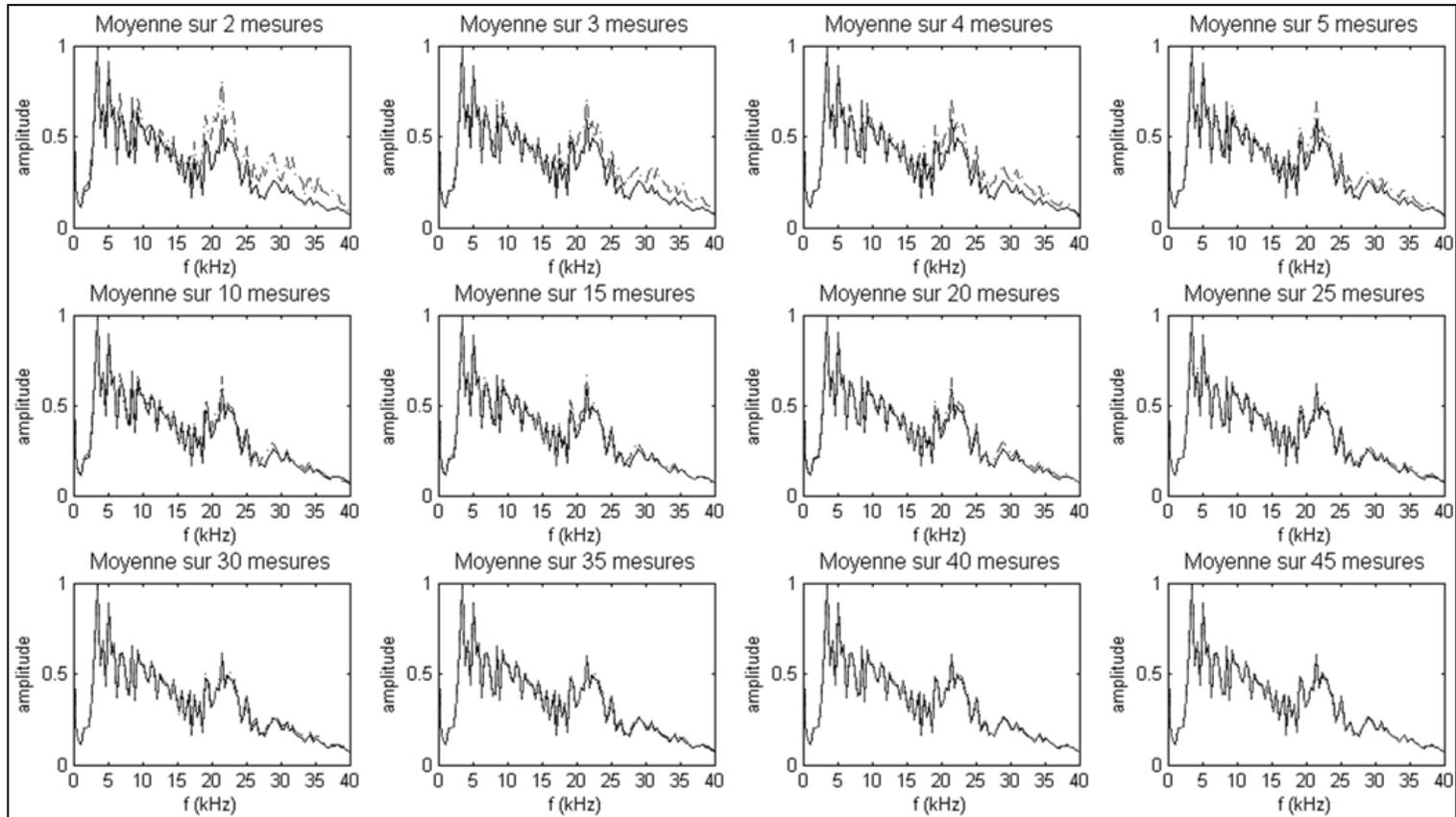


Figure 5.43- Comparaison entre une moyenne sur x mesures (en tirets clairs) avec la moyenne sur 50 mesures (trait foncé)

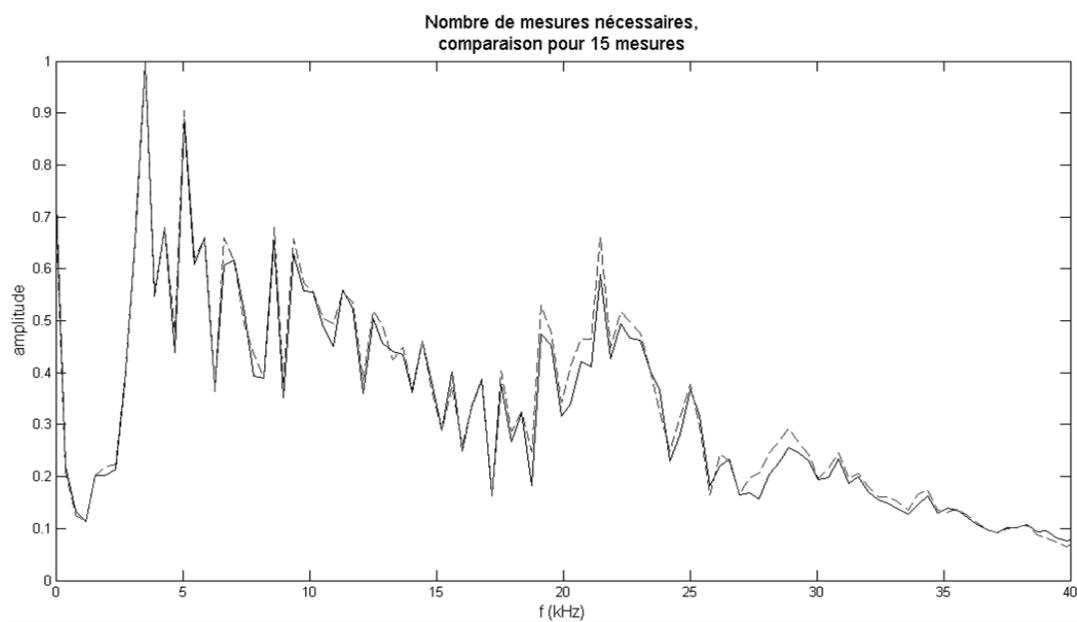


Figure 5.44 Ecart entre les moyennes sur 15 mesures (tirets clairs) et 50 mesures (trait foncé).

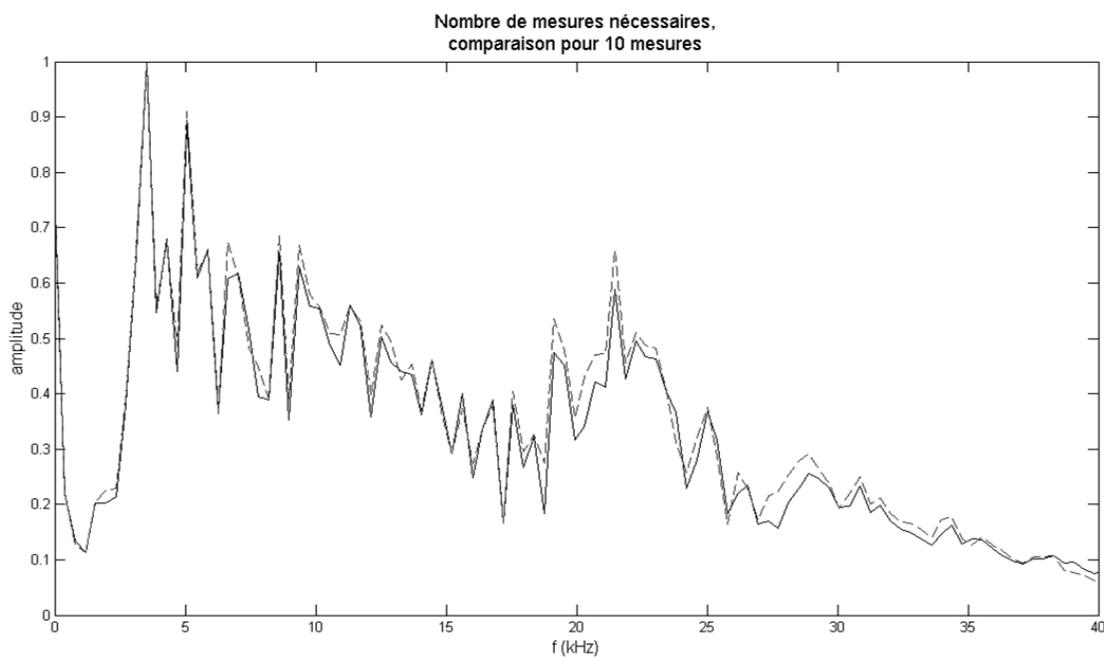


Figure 5.45- Ecart entre les moyennes sur 10 mesures (tirets clairs) et 50 mesures (trait foncé).

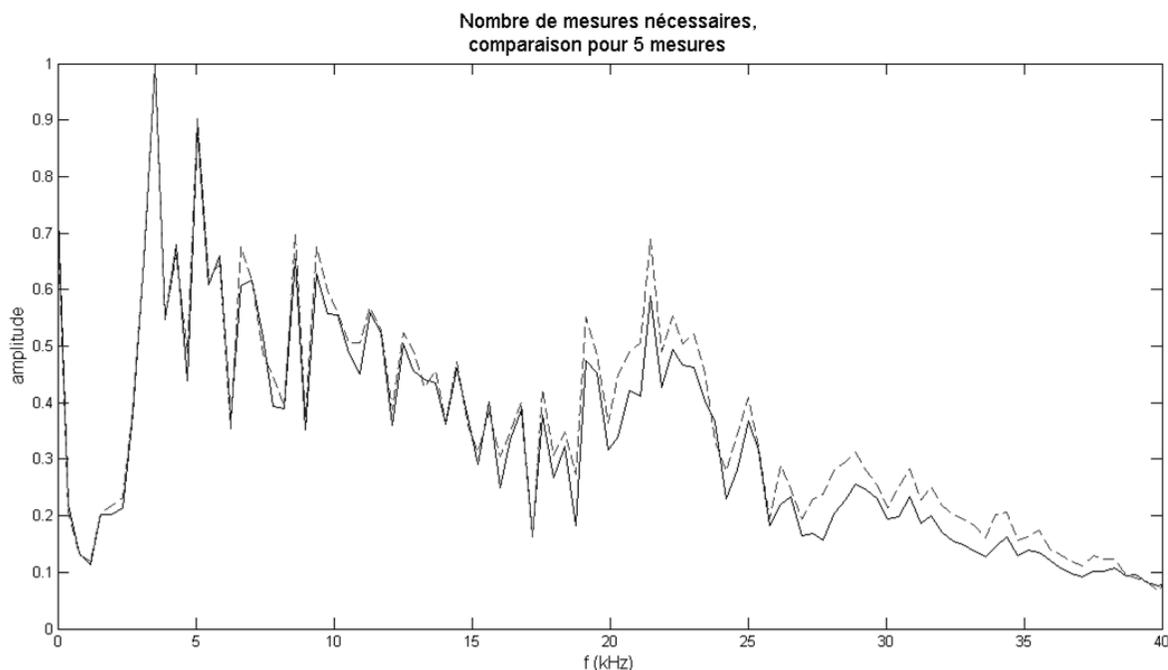


Figure 5.46- Ecart entre les moyennes sur 5 mesures (tirets clairs) et 50 mesures (trait foncé).

Ainsi, pour la suite des mesures, les essais en un point seront analysés sur une moyenne de 5 mesures effectuées en ce même point. Puisque le programme IE ne peut faire l'acquisition de plusieurs mesures par moyenne, un programme sous MatLab a été conçu à cette fin (annexe H). De plus, afin de faciliter le traitement des données, il est recommandé de faire les mesures en un même point à la suite les unes des autres.

5.2.1.2. Fonctionnalité de l'endoscope

L'instrument acquis par le laboratoire est le IPLEX MX R d'Olympus [46]. Cet endoscope permet l'acquisition d'images en noir et blanc ou en couleur, que ce soit dans des zones très lumineuses ou encore dans des zones très sombres. Très appréciable sur le terrain en raison de sa compacité, il possède un écran sur sa base (figure 5.47 a)). Le programme intégré à l'appareil permet quelques réglages de base (affichage de la date et l'heure sur les photos, visualisation des photos enregistrées, réglage de la luminosité,...).



Figure 5.47- Commandes

a) partie principale de l'endoscope; b) vue sur la commande manuelle de la partie optique.

Une commande manuelle (figure 5.47 a) et figure 5.48 b)) à l'extrémité du câble optique souple permet de diriger la tête articulée (figure 5.48 a)). Grâce à cette commande, plus besoin d'interagir avec le bloc principal de l'instrument. Il est possible de faire varier l'éclairage, de zoomer, de passer de la couleur au noir et blanc et surtout de faire l'enregistrement des photos. Le câble optique mesure 2 m de long et se termine par une tête articulée à 360° sur les 5 derniers centimètres. La tête est aussi munie d'un système lumineux pour éclairer la zone observée (on peut voir au centre la fibre optique et sur le pourtour le système lumineux figure 5.48 a))



Figure 5.48- Tête de l'endoscope (optique)

a) extrémité de la tête ; b) câble optique et sa commande.

Un outil supplémentaire à l'instrument permet d'obtenir des prises de vues à 90° (figure 5.49) lorsque la tête articulée n'a pas assez d'espace pour être orientée ou possède trop peu de recul pour permettre la mise au point de l'image. Pour utiliser cet outil, il suffit d'insérer le câble optique dans son tube jusqu'au miroir à 45° en son extrémité. Le tube étant rigide, il facilite le positionnement de l'optique. De plus, l'extrémité du tube contenant une diode électroluminescente, activée par un interrupteur, qui permet d'éclairer la zone observée.

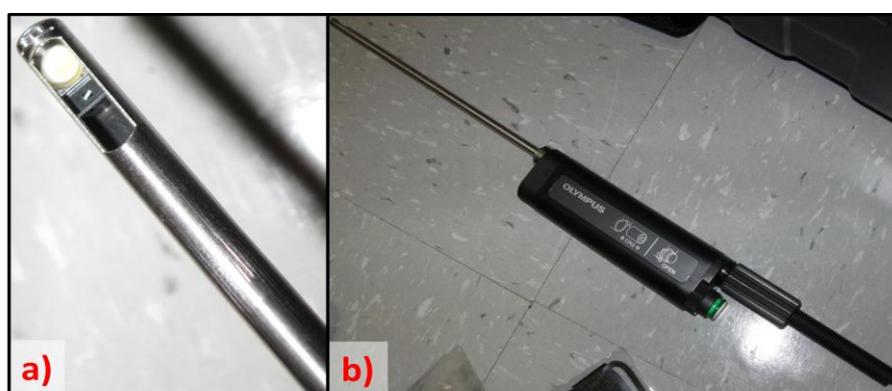


Figure 5.49- Outil d'observation à 90°

a) tête de l'outil comprenant une diode et un miroir à 45°; b) vue de l'outil.

Les images peuvent contenir la date et l'heure et sont nommées en numérotation croissante. Cela permet de connaître l'ordre dans lequel les photos ont été réalisées, mais il n'y a pas la possibilité d'ajouter une indication sur la zone de prise de vue. Ainsi, il est conseillé de se munir d'une fiche et d'un stylo sur lequel noter les zones de prise de vue ainsi que des commentaires. Ensuite, pour chaque nouvelle zone à étudier, il suffit de photographier la fiche en prenant soin de faire apparaître l'annotation de la zone qui va être étudiée. Cela permet un repérage très aisé des zones étudiées lors du post-traitement des images.

5.2.2. Mode opératoire expérimental

5.2.2.1. Mesures par impact-écho

L'ensemble des échantillons ont été analysés par la méthode IE. La procédure est identique pour toutes les mesures. Les zones étudiées n'ont pas toujours été les mêmes. Elles sont présentées ci-après avec un descriptif des valeurs de fréquence attendues.

- Procédure générale :

Après avoir déterminé avec quelle bille réaliser les mesures d'impact et choisi les paramètres d'acquisition, l'acquisition des mesures peut commencer. Le procédé du logiciel fourni avec l'instrument IE est donné à l'annexe F.

La manipulation de l'instrument est très simple : le capteur est disposé directement sur le point d'étude (un système d'amorce sur le capteur permet de s'abstenir de l'emploi d'une graisse pour améliorer le contact capteur/surface) et l'impact est fait à environ 5 *cm* du capteur.

Si l'on souhaite observer le comportement d'une gaine de précontrainte, il faut se placer bien au-dessus de cette dernière. De plus ; il est préférable de produire l'impact sur l'alignement de la gaine afin d'optimiser les résultats (figure 5.50). De même, il est important de provoquer les impacts aux endroits où le signal est le moins susceptible aux perturbations. Par exemple, si le capteur est à proximité d'un bord, il est important de créer l'impact à l'opposé du bord pour éviter les effets de bords. Il en est de même lorsqu'il y a des éléments à proximité qui risquent d'influencer les résultats.

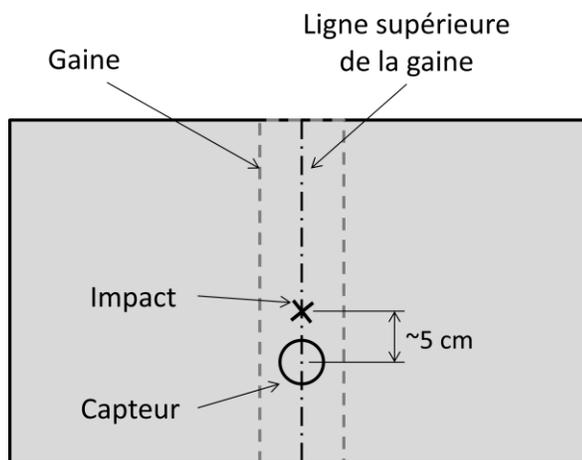


Figure 5.50- Exemple de mesure impact-écho sur le dessus d'une gaine

Les mesures peuvent être effectuées par un seul utilisateur qui s'affaire à l'ensemble des manipulations. Néanmoins, afin d'augmenter la vitesse d'acquisition des mesures, il est plus efficace d'opérer à deux utilisateurs : le premier s'occupe de la partie manipulation, c'est-à-dire maintenir le capteur tout en faisant l'impact ; pendant que le second se charge du pré-traitement des mesures en vérifiant la qualité du signal temporel et enregistre les essais.

Le traitement des mesures par FFT est effectué directement par le programme Impact-E. Par contre, comme vu précédemment, le post-traitement est fait après les mesures par le biais d'un programme sous MatLab (voir annexe H). L'ensemble des courbes analysées sont donc tracées avec ce logiciel.

Cette dernière étape est importante et prend autant, si ce n'est plus, de temps que la prise de mesures. Ainsi, il est d'autant plus important de réfléchir préalablement au programme d'essais afin de ne faire ni mesures, ni traitements inutiles.

Afin de décrire adéquatement l'acquisition, les mesures sont annotées par le nom de la bille utilisée, les abréviations des paramètres d'acquisition (tableau 5.9) et la zone étudiée. Par exemple, une mesure nommée PL1a2E5TPB1 représente une mesure relative à l'essai

effectué sur la plaque PL1a, avec les réglages d'acquisitions de 2048 points pour N et de $5 \mu s$ pour ΔT , avec un impact créé à l'aide de la bille PB1.

Tableau 5.9- Termes d'abréviation des paramètres d'acquisition

| Période d'échantillonnage ΔT | | | | |
|--------------------------------------|-----------|-------------|-------------|------------|
| 0,5 μs | 1 μs | 2 μs | 5 μs | 10 μs |
| XT | 1T | 2T | 5T | 10T |
| Nombre d'échantillons mesurés N | | | | |
| 512 points | | 1024 points | 2048 points | |
| 5E | | 1E | 2E | |

- Vitesses de propagation des ondes dans les échantillons :

Afin de pouvoir évaluer la vitesse de propagation des ondes dans le béton des éléments sous étude, des essais ont été réalisés sur des cylindres de béton d'environ 200 mm de hauteur. Ces cylindres ont été fabriqués à l'aide du même béton que ces des éléments fabriqués au laboratoire ou encore ont été carottés sur les éléments existants. Pour chaque cylindre étudié, l'impact a été fait sur une de ces faces plane, face sur laquelle a été placé le capteur. La surface plane opposée reposait sur un matériau différent du béton (maintenu dans le vide ou posé sur une planche en bois).

A partir des résultats obtenus sur les mesures IE, le pic de fréquence caractéristique pour chaque cylindre a été relevé (figures 5.51 et 5.52). A partir de l'équation (3.3), la vitesse de propagation v_p est déterminée par inversion des termes :

$$v_p = \frac{2Df_1}{\beta} \quad (5.1)$$

Les données des essais ainsi que les valeurs de v_p sont inscrites dans le tableau 5.10. Pour l'ensemble des calculs, β est égal à 0,96 (les cylindre fabriqués au labo ont un diamètre de 101 mm et ceux carottés ont un diamètre de 94 mm : le rapport D/B conduit toujours à $\beta = 0,96$).

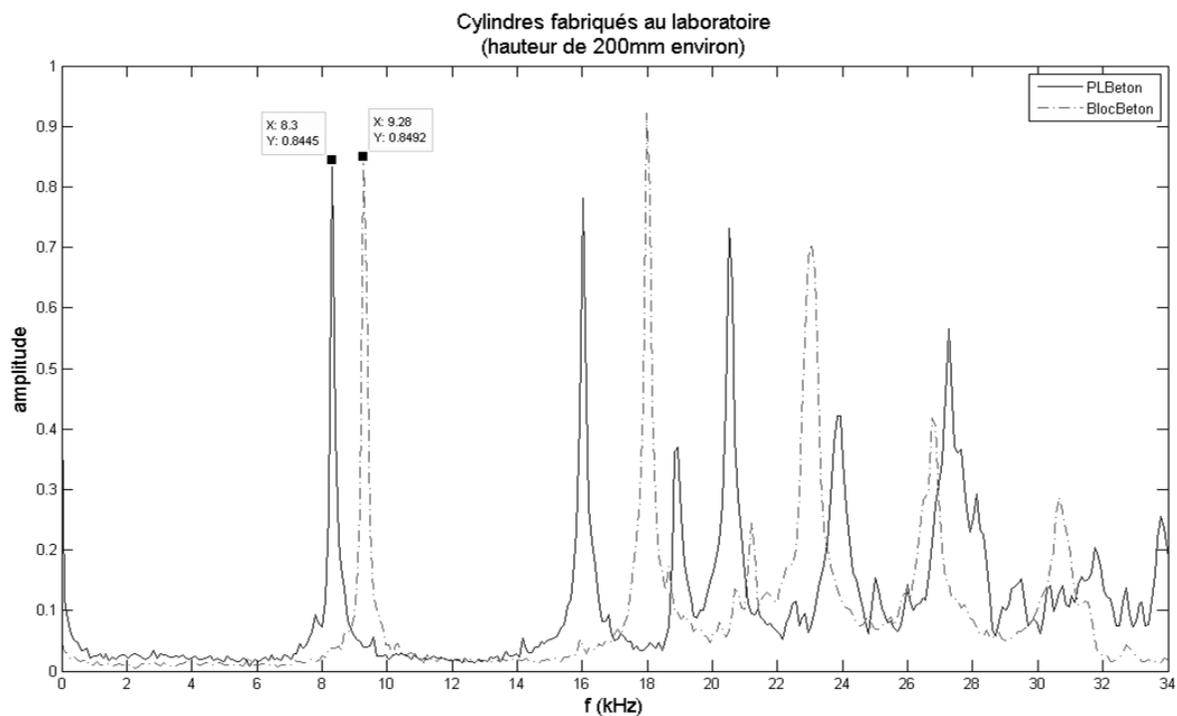


Figure 5.51- Mesures IE effectuées sur un cylindre pour les plaques (trait plein) et un autre cylindre pour les blocs (tirets-pointillés)

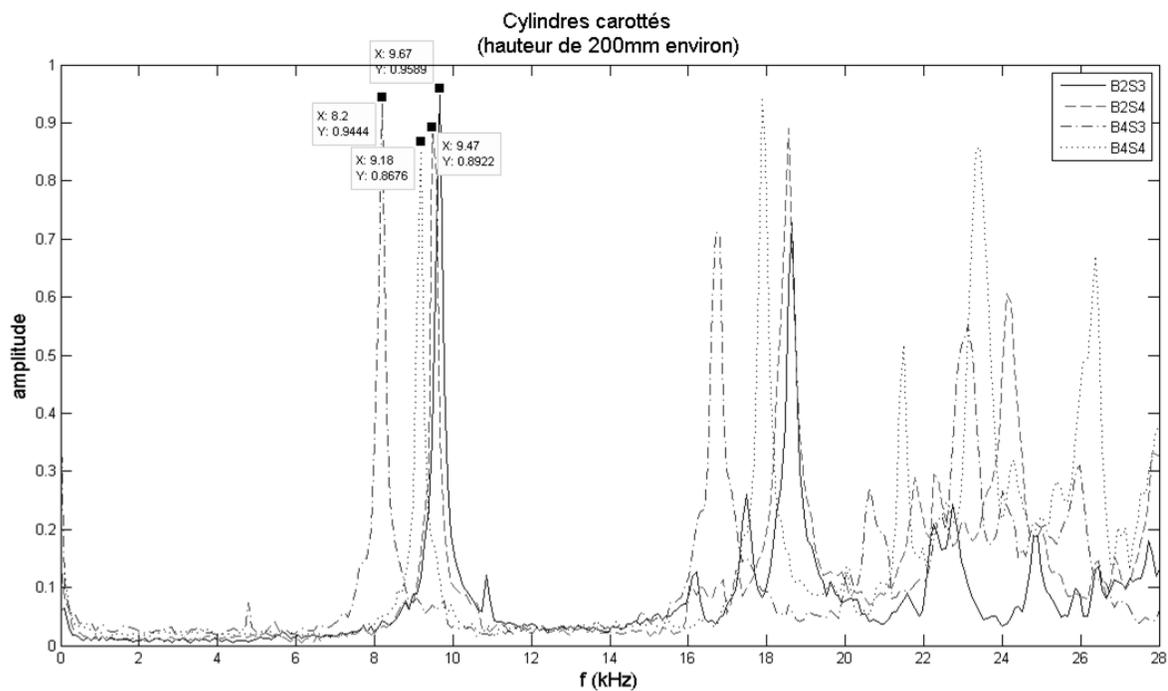


Figure 5.52- Mesures IE sur cylindres prélevés sur les segments de poutres

Tableau 5.10 – Vitesses de propagation v_p établies à partir des cylindres

| Élément | | D (mm) | f_1 (kHz) | v_p (m/s) |
|-----------------------|------|----------|-------------|-------------|
| Plaques | | 199 | 8,3 | 3441 |
| Blocs | | 195 | 9,3 | 3778 |
| Segments de poutre | B2S3 | 200 | 9,7 | 4042 |
| | B2S4 | 201 | 9,5 | 3978 |
| | B4S3 | 196 | 8,2 | 3348 |
| | B4S4 | 201 | 9,2 | 3853 |

Les valeurs obtenues pour v_p sont arrondies à la centaine près. Les vitesses établies sont donc de :

- 3400 m/s pour les plaques ;
 - 3800 m/s pour les blocs ;
 - 4000 m/s pour les segments de poutres B2S3 et B2S4 ;
 - 3300 m/s pour le segment de poutre B4S3 ;
 - 3900 m/s pour le segment de poutre B4S4.
- Etude des plaques :

Les plaques ont été étudiées en 2 temps. En premier lieu, les mesures ont été effectuées au centre des plaques, c'est-à-dire au-dessus des gaines. Dans le but d'amplifier le signal, l'impact a été fait le long de la gaine au plus près du capteur. Dans un second temps, la mesure IE a été effectuée à 5 cm du bord des plaques pour observer le décalage Δf_1 entre les deux emplacements de prise de mesure sur chaque plaque.

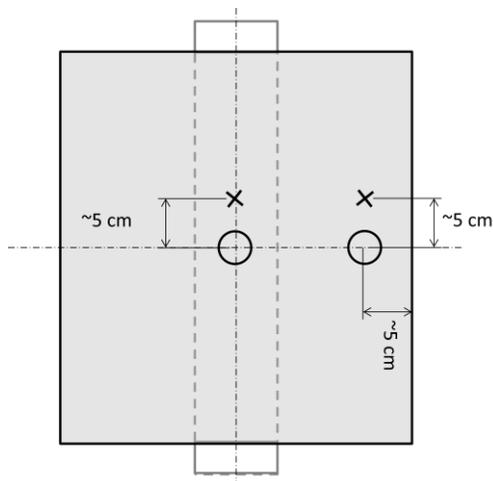


Figure 5.53- Schématisation des mesures IE effectuées sur le dessus des plaques

Les valeurs des fréquences et du décalage ont été calculées en tenant compte de la géométrie des plaques (tableau 5.11) et des gaines qu'elles contiennent (tableau 5.12).

Tableau 5.11- Données et fréquences caractéristiques des plaques

| Données des plaques | | | | |
|------------------------|--------------|-------------|-------|---------|
| D (mm) | B (mm) | v_p (m/s) | D/B | β |
| 165 | 360 | 3400 | 0,46 | 0,96 |
| Fréquences des plaques | | | | |
| f_1 (kHz) | Δf_1 | f_2 (kHz) | | |
| 9,9 | 40 % | 19,8 | | |

Tableau 5.12- Données et fréquences caractéristiques des gaines pour les plaques

| Données des gaines | |
|----------------------|-------------------|
| p_g (mm) | p (mm) |
| 40 | 82 |
| Fréquence des gaines | |
| f_{vide} (kHz) | f_{acier} (kHz) |
| 40,8 | 10,4 |

- Etude des blocs :

De même que pour les plaques, les blocs ont été étudiés le long des gaines de précontrainte. Plusieurs mesures ont été effectuées sur toute la longueur, plus précisément tous les 5 cm (figure 5.54). Chaque mesure a été identifiée par la position du capteur le long de la gaine. Afin d'observer le décalage Δf_1 , tout comme pour l'étude des plaques, des mesures ont été effectuées à 5 cm du bord des blocs A et B.

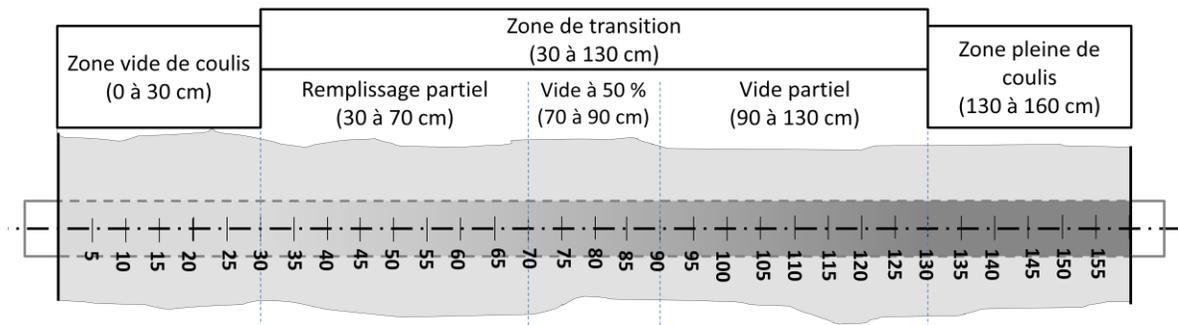


Figure 5.54- Localisation des mesures effectuées au-dessus des gaines pour les blocs

Les données géométriques des blocs sont rappelées au tableau 5.13. Les fréquences f_i des blocs sont indiquées au tableau 5.14 tandis que les fréquences des gaines sont présentées au tableau 5.15.

Pour finir, dans le tableau 5.16, rappelle les valeurs de Δf_1 .

Tableau 5.13- Données des blocs

| Bloc | D (mm) | B (mm) | D/B | β |
|------|----------|----------|-------|---------|
| A | 800 | 500 | 1,60 | 0,95 |
| B | 500 | 500 | 1,00 | 0,90 |
| C | 500 | 900 | 0,56 | 0,96 |
| D | 500 | 800 | 0,63 | 0,82 |

Tableau 5.14- Fréquences caractéristiques des blocs

| Bloc | f_1 (kHz) | f_2 (kHz) | f_3 (kHz) | f_4 (kHz) | f_5 (kHz) | f_6 (kHz) |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| A | 2,3 | 3,6 | 4,7 | 5,1 | 5,7 | 6,5 |
| B | 3,4 | 4,8 | 6,5 | 8,0 | 8,4 | 9,7 |
| C | 3,6 | 7,3 | | | | |
| D | 3,1 | 3,4 | 4,5 | 4,7 | 5,9 | 6,0 |

Tableau 5.15- Fréquences caractéristiques des gaines pour les blocs

| | p_g (mm) | p (mm) | f_{vide} (kHz) | f_{acier} (kHz) |
|-------------------------------|------------|----------|------------------|-------------------|
| Blocs A et B, gaines CC et CD | 200 | 242 | 9,1 | 3,9 |
| Bloc D, gaine CB | 150 | 192 | 12,2 | 4,9 |
| Gaine CA | 100 | 142 | 18,2 | 6,7 |

Tableau 5.16- Décalage Δf_1 suivant les positions des gaines et les dimensions des blocs

| | |
|-------------------------|------|
| Bloc A, gaine CA | 5 % |
| Bloc B, gaines CC et CD | 10 % |
| Bloc D, gaine CB | 7 % |

- Etude des segments de poutres :

Le procédé de mesures IE est identique à celui de blocs. Les prises de mesures ont été effectuées tous les 5 cm au-dessus du profilé des gaines pour les deux segments présentant un point haut et au-dessous du profilé des gaines (depuis la surface inférieure) pour les segments présentant un point bas. Les 30 premiers et derniers centimètres de chaque bord des segments le long des gaines n'ont pas été auscultés afin de diminuer l'impact des effets de bord sur les résultats. Un exemple de mesure IE effectué sur les segments de poutre est montré à la figure 5.55.



Figure 5.55 - Exemple de prise de mesure IE sur le segment de poutre B2S3 au-dessus de la gaine C

5.2.2.2. Pratique des endoscopies

Des endoscopies ont été pratiquées sur le bloc B du laboratoire et les points hauts et bas des segments de poutres. Le mode opératoire a été différent au laboratoire et sur les segments de poutres.

- Opérations sur le bloc B :

En ce qui concerne le bloc B, le but de l'endoscopie pratiquée a été de vérifier la qualité de remplissage des gaines sur les échantillons fabriqués au laboratoire. Pour ce faire, aucun perçage n'a été effectué. Le câble optique a tout simplement été introduit dans la gaine par le côté vide de coulis. Ensuite, pour chaque section étudiée le long de la gaine (début du remplissage, remplissage à 25 %, ...), il y a eu prise de clichés puis le câble a été retiré afin

de mesurer la longueur introduite dans la gaine et ainsi localiser la section étudiée le long de la gaine.

- Opérations sur les segments de poutres :

Afin de pouvoir pratiquer des endoscopies de type *in-situ*, les segments de poutres ont été percées à l'aide d'une mèche à béton jusqu'aux gaines depuis la surface la plus proche des gaines (surface supérieure pour les points hauts et inférieure pour les points bas, exemple figure 5.56). Au contact de la gaine, la même mèche a été utilisée pour perforer la gaine métallique.



Figure 5.56 - Perçage d'un segment de poutre à l'aide d'une perceuse Hilti munie d'une mèche à béton

Pour chaque perçage, la profondeur du trou a été mesurée. De plus, chaque intrusion a été identifiée par le nom du segment de poutre, de la gaine étudiée et de la distance par rapport à une extrémité. Les perçages ont été choisis en fonction de l'état des segments de poutres et du remplissage des gaines.

Après le perçage, de l'air est injecté au fond du trou afin de dégager les poussières pouvant s'y être logées. Par la suite, après avoir pris soin de photographier l'identité de la zone étudiée avec l'endoscope, le câble optique est introduit jusqu'au fond du trou pour effectuer des clichés de la gaine. Aussi, l'outil de visualisation à 90° est utilisé afin de visionner la surface de perçage.

Par la suite, un post-traitement des clichés est effectué afin de comparer entre eux les clichés pris sur une même gaine à différents endroits et ceux provenant de gaines différentes.

5.2.2.3. Sciage des segments de poutre

Afin de vérifier les résultats obtenus par les essais non destructifs et semi-destructifs, le sciage de certaines parties des segments de poutre est effectué. Le sciage permet de dégager des gaines pour chaque point haut et point bas afin de pouvoir en ausculter l'intérieur (observation du coulis : couleur, ressuage, remplissage de la gaine ; et état des torons) mais aussi d'ouvrir des ancrages pour en observer le remplissage.

6. Résultats

Le post-traitement des mesures IE a été effectué à l'aide de MatLab. Effectivement, comme expliqué dans le chapitre précédent, chaque résultat étudié résulte de la moyenne de 5 signaux en fréquence provenant de 5 mesures effectuées au même point. Ainsi, tous les graphiques représentant les mesures obtenues par IE sont présentés sous MatLab par la suite.

6.1. Plaques PL (laboratoire)

Comme il a été expliqué au chapitre 3, le plus difficile concernant la méthode impact-écho n'est pas la partie mesure mais l'analyse des résultats. Effectivement, il est généralement conseillé de s'adresser à une personne fortement expérimentée pour des études IE portant sur des ouvrages. Et ceci s'est vérifié lors de l'analyse des résultats IE.

Ainsi, lors de l'étude des plaques, plusieurs essais ont été faits afin de vérifier l'exactitude des résultats obtenus. En effet, deux gammes d'essais ont été réalisées.

6.1.1. Gamme d'essais initiale

Afin de savoir ce qui doit être contrôlé, le tableau 6.1 récapitule les valeurs recherchées. La valeur de f_1^* représente la position du pic de fréquence image de l'épaisseur f_1 lequel a été compensé par le décalage Δf_1 . Puisque la fréquence f_1 se trouve décalée, le même phénomène devrait apparaître pour f_2 . Ainsi, la valeur de f_2^* a été calculé à partir de f_1^* . Les fréquences attendues étant estimées, les choix des paramètres et billes avaient été fixés pour chaque mesure. Ils sont récapitulés au tableau 6.2.

Tableau 6.1- Récapitulatif des valeurs en fréquence attendues pour les plaques

| Fréquences des plaques | | | Fréquence des gaines | |
|------------------------|---------------|--------------|----------------------|-------------------|
| f_1 (kHz) | f_2 (kHz) | Δf_1 | f_{vide} (kHz) | f_{acier} (kHz) |
| 9,9 | 19,8 | 40% | 40,8 | 10,4 |
| f_1^* (kHz) | f_2^* (kHz) | | | |
| 5,9 | 11,9 | | | |

Tableau 6.2- Choix des paramètres pour les mesures IE

| Mesure | Figure 6.1 | Figure 6.2 | Figure 6.6 |
|------------------|------------|------------|------------|
| | 2E1TPB2 | 2E5TPB1 | 2E5TB3 |
| f_{max} (kHz) | 73 | 97 | 23 |
| Résolution (kHz) | 0,49 | 0,1 | 0,1 |

A la figure 6.1, les graphiques représentent un essai IE effectué sur les plaques au-dessus des gaines. L'ensemble des fréquences f_1^* , f_2^* , f_{acier} et f_{vide} devrait y figurer (valeurs représentées par les droites pointillées). Toutefois, malgré l'emploi d'une bille adéquate, il est constaté qu'aucune fréquence n'apparaît au-dessus de 20 kHz. La fréquence f_{vide} n'apparaît donc pas sur la figure 6.1. Les fréquences recensées sur cette figure ont été placées dans le tableau 6.3. Huit fréquences ont été retenues, chacune identifiée par une lettre, bien que seules 2 à 3 fréquences soient attendues par graphique.

Tableau 6.3- Valeurs des fréquences obtenues pour la figure 6.1

| Fréquences mesurées pour PL1 (kHz) | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------|----------|----------|-------------|----------|-------------|-------------|
| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> | <i>h</i> |
| 2,9 | 4,9 | 7,3 | 9,3 | 10,7 | 12,2 | 13,7 – 14,6 | 16,6 |
| Fréquences mesurées pour PL2 (kHz) | | | | | | | |
| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> | <i>h</i> |
| 2,9 | très faible | 7,8 | 9,3 | très faible | 12,7 | 14,7 | 16,6 |
| Fréquences mesurées pour PL3V (kHz) | | | | | | | |
| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> | <i>h</i> |
| 2,9 | 4,9 | 6,8 | 9,3 | 10,7 | 12,2 | 14,7 | 16,1 – 17,6 |
| Fréquences mesurées pour PL3B8 (kHz) | | | | | | | |
| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> | <i>h</i> |
| 2,9 | 4,9 | 6,8 | 9,7 | 10,7 | 12,2 | 14,2 | 16,1 – 20,5 |

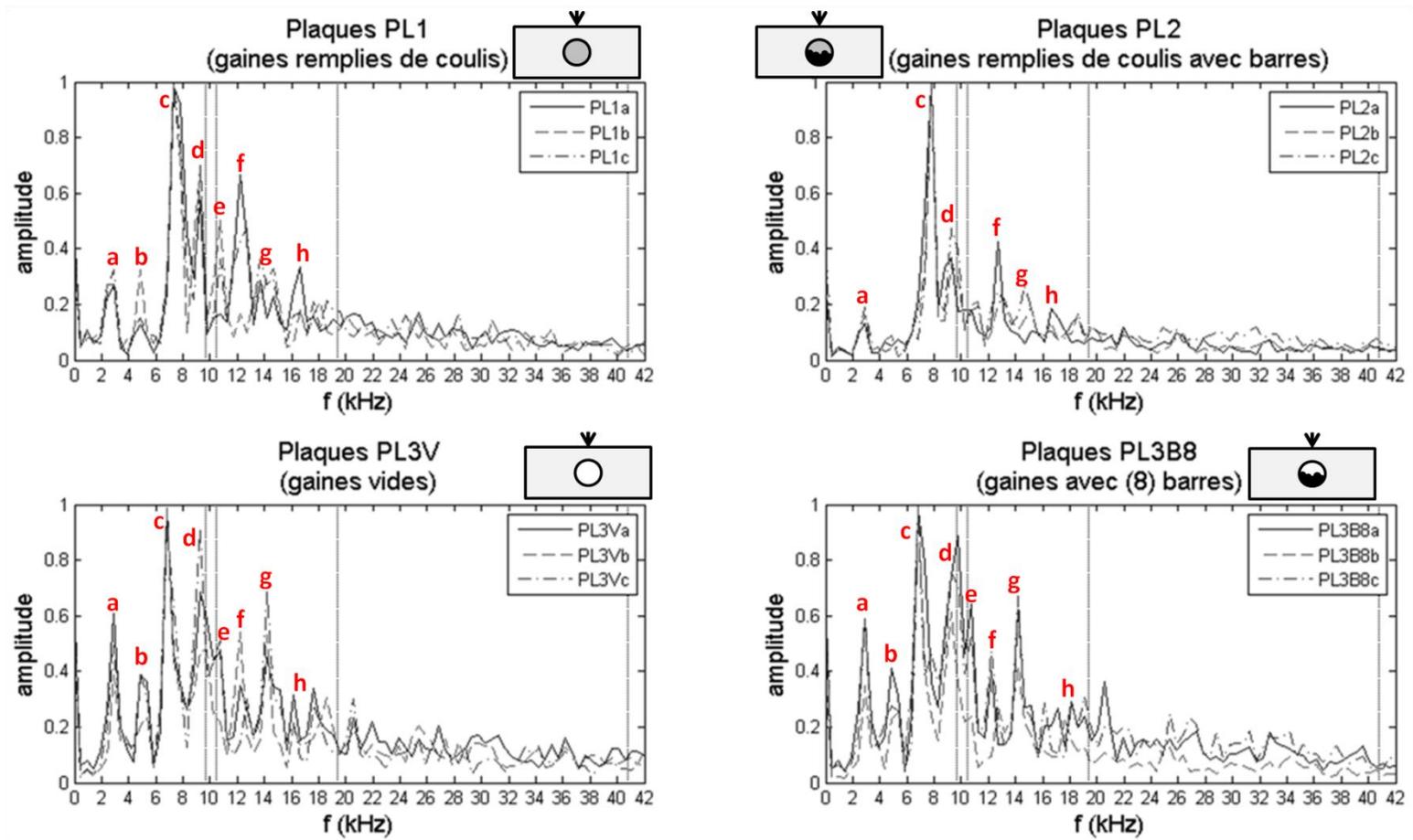


Figure 6.1- Mesures IE au-dessus des gaines sur les plaques (2E1TPB2)

Même si l'étude IE est basée sur l'étude des ondes de compression, les ondes de cisaillement sont aussi relevées lors des mesures. Les fréquences a et b résultent des deux premiers modes de flexion des plaques dues aux ondes de cisaillement. Il est remarqué qu'entre les gaines remplies de coulis et les gaines vides, une différence notable intervient sur a et b . Effectivement leur amplitude est très faible dans le cas des gaines remplies de coulis.

Ensuite, le pic c a été établi comme la fréquence f_1^* . Effectivement, bien que les valeurs des pics c (autour de 7 kHz) soient éloignées de la valeur de $5,9\text{ kHz}$, la manière dont f_1^* a été estimée est sujette à des incertitudes. De plus, les pics c sont ceux qui possèdent la plus grande amplitude. Ils sont donc caractéristiques de la géométrie de la pièce. Par contre, cette caractéristique, c'est-à-dire le décalage de f_1 , ne devrait apparaître que dans les cas de gaines vide de coulis. Or il y a apparition du phénomène dans tous les cas. Ceci sera discuté par la suite.

Le pic c étant identifié comme la fréquence f_1^* , il est possible de retrouver une fréquence similaire à f_2^* pour les 4 plaques. Effectivement, le pic f identifié sur les résultats se rapproche fortement de la valeur théorique de f_2^* . De plus, pour la plaque PL2, la valeur du pic c est bien plus élevée que pour les 3 autres types de plaque (jusqu'à 1 kHz d'écart) et ce comportement se retrouve aussi pour le pic f , mais avec un écart plus faible ($0,5\text{ kHz}$ seulement, c.à.d. \cong la résolution des mesures IE pour les essais). Ceci permet de confirmer l'identification des pics c et f comme étant les fréquences caractéristiques image de l'épaisseur des plaques.

En ce qui concerne le pic d , il se trouve présent dans les 4 cas avec une forte atténuation dans le cas des plaques PL2. Il devrait être assimilé à f_1 , mais étant donné que toutes les plaques présentent le décalage Δf_1 , il devient un pic inconnu. De plus, il ne peut être assimilé à f_{acier} qui reste une valeur assez proche, puisque ce pic de fréquence ne devrait

apparaître que pour les essais portants sur les plaques PL2 et qu'il est impossible que celui-ci apparaisse dans les autres cas.

Quant aux trois autres pics (e , g et h), ils n'ont pas été identifiés. Effectivement, les valeurs de ces pics ne sont pas en accord avec les valeurs théoriques attendues. Seul le pic h pourrait être prétendument l'algorithme de second ordre de l'épaisseur f_2 mais, à $16,6 \text{ kHz}$, ce pic reste loin des $19,8 \text{ kHz}$ attendus. De plus, il ne peut y avoir de pic à hauteur de f_2 , puisque f_2^* a été identifié sur les mesures. Aussi, le pic e est proche de f_{acier} en valeur, mais est incohérent par sa présence chez PL1, PL3V et PL3B et son inexistence pour PL2 (c'est-à-dire à l'inverse de ce qui est attendu).

Ainsi, les pics de fréquence non identifiés sur la figure sont influencés par la géométrie de la pièce. En effet, du fait de travailler avec une simili-dalle augmente fortement les effets de bord. Les nombreux pics de fréquence qui n'ont pas été identifiés peuvent provenir du fait que l'échantillon n'est pas semi-infini (dans les directions du plan d'étude).

Finalement, il est remarqué que dans l'ensemble, les amplitudes des pics sont fortement diminuées dans le cas des plaques PL2 comparé aux trois autres cas (hors le pic image de l'épaisseur c). Cette atténuation est considérée comme provenant de la complexité de la pièce. Effectivement, dans le cas de PL1, malgré la présence de la gaine, les ondes traversent l'ensemble de la pièce de façon directe en passant par le béton et le coulis. Puis, dans les cas PL3V et PL3B, les ondes ne circulent pas dans la gaine, car elles sont « bloquées » par le vide. Les ondes ne se propagent donc qu'à l'intérieur du béton. Or, dans le cas PL2, les ondes traversent béton et coulis mais aussi l'ensemble des barres présentent dans le coulis. A chaque interface le signal s'atténue un peu plus et provoque la diminution d'amplitude des pics.

Afin de confirmer ou d'infirmer les présents résultats, une seconde série de mesures a été effectuée.

6.1.2. Vérification des résultats par une nouvelle gamme d'essais

Pour cette nouvelle gamme d'essai, l'Université de Sherbrooke travaillant sur des méthodes d'auscultations non destructives et étant en partenariat sur ce projet de recherche, a été mise à contribution et a prêté pour l'occasion un capteur 24 kHz (identifié par la suite comme capteur UdeS). Ici, seul le capteur a été changé, le reste de l'appareillage étant le même.

Ainsi de nouveaux essais ont été pratiqués entraînant les résultats identifiés dans le tableau 6.4 et à la figure 6.2. Le capteur UdeS ayant une sensibilité plus élevée, la résolution en fréquence du signal a pu être affinée. Ainsi, l'écart des résultats obtenus entre les essais réalisés avec les capteurs des deux universités peut varier au maximum de $0,6\text{ kHz}$ (c'est-à-dire la somme des deux résolutions en fréquences des mesures comparées : $0,49 + 0,1$).

Ainsi, les fréquences identifiées a , b , c , d , e et f sur la figure 6.2 (UdeS) sont les mêmes que les fréquences a , b , c , d , f et h respectivement sur la figure 6.1 (UL). Cependant, l'atténuation notée sur les pics a et b pour les plaques PL1 et PL2 est moins important, surtout en ce qui concerne le pic a .

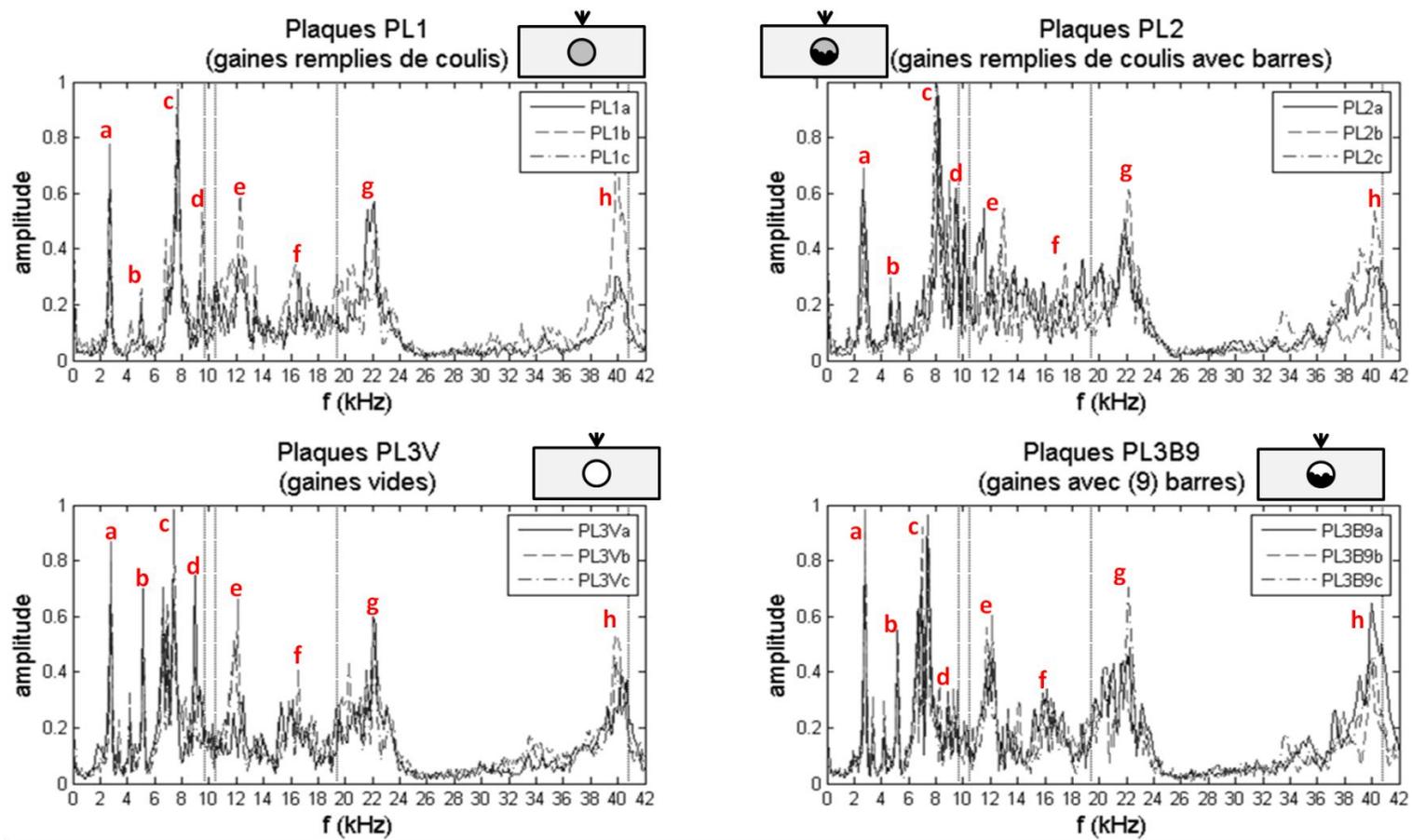


Figure 6.2- Mesures IE avec capteur 24kHz au-dessus des gaines sur les plaques (2E5TPB1)

Tableau 6.4- Valeurs des fréquences obtenues pour la figure 6.2

| Fréquences mesurées pour PL1 (kHz) | | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------|-----------|------------|-----------|-------------|----------|----------|
| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> | <i>h</i> |
| 2,7 | 5,1 | 7,7 | 9,5 | 12,3 | 16,2 | 22,2 | 39,9 |
| Fréquences mesurées pour PL2 (kHz) | | | | | | | |
| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> | <i>h</i> |
| 2,7 | 4,7 – 5,3 | 8,1 | 9,0 – 10,1 | 11,5 – 13 | 13,8 – 20,3 | 22,2 | 40,2 |
| Fréquences mesurées pour PL3V (kHz) | | | | | | | |
| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> | <i>h</i> |
| 2,8 | 5,1 | 7,4 | 9,0 | 12,1 | 15,2 – 16,5 | 22,2 | 39,8 |
| Fréquences mesurées pour PL3B9 (kHz) | | | | | | | |
| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> | <i>h</i> |
| 2,8 | 5,1 | 7,0 – 7,4 | 8,3 – 9,7 | 12,1 | 16,1 | 22,2 | 39,9 |

Il est évident que les pics identifiés *g* et *h* n'étaient pas présents dans les résultats obtenus avec le capteur UL (capteur initial de l'Université Laval). La valeur de *g* s'approche de f_2 , mais en gardant tout de même un écart de 3,4 kHz, ce qui est très grand. De plus, comme expliqué précédemment, f_2 ne peut être existant si f_2^* est présent. De même, le pic *h* a sa valeur à moins de 1 kHz de f_{vide} , valeur qui est probable.

En examinant plus attentivement les résultats obtenus par le capteur UdeS, les caractéristiques suivantes sont obtenues. Le pic *g* n'est pas identifié comme une fréquence caractéristique des échantillons alors que ce pic apparaît pour chacune des plaques étudiées. De plus, le pic *h* identifié comme le pic de fréquence image de la gaine vide ne devrait apparaître qu'en présence d'une gaine vide, c'est-à-dire pour tous les essais sur les plaques PL3 (PL3V et PL3B) alors que ce pic apparaît pour l'ensemble des plaques. Ces constatations démontrent la difficulté de l'interprétation des résultats.

Finalement, il est important de noter que, comme pour la première gamme d'essais, il y a une légère différence entre les résultats obtenus pour les plaques PL2 en comparaison avec les autres plaques. Effectivement, sur la figure 6.2, on peut observer une multitude de

fréquences excitées entre 13 et 21 *kHz*. Encore une fois, le signal obtenu pour PL2 diffère des autres signaux.

6.1.3. Validation des résultats

Les deux gammes d'essais présentées ont soulevé des questions. Effectivement, ces deux gammes présentent des résultats différents mais aucuns d'eux ne se rapprochent des comportements attendus. En effet, des comportements dus aux prototypes sont inexpliqués. Par exemple, il y a une variation de pic de fréquence f_1 pour tout type de remplissage de gaine. De plus, le second capteur, utilisé dans le but de valider le premier, donne des relevés dont certains nouveaux pics de fréquence sont inexpliqués.

D'abord, la cause possible de la présence du pic f_1^* sur tous les résultats a été recherchée. Après observation des cylindres de coulis fabriqués lors de la préparation des échantillons, il a été observé que malgré la présence d'un agent expansif contenu dans le ciment utilisé (voir annexe A), des microfissures étaient présentes en surface. Ces fissures sont apparues au fur et à mesure du temps.

Les cylindres ont été laissés entreposés à l'air libre au laboratoire. Contrairement aux gaines qui permettent de conserver un taux d'humidité constant (sauf aux extrémités), les cylindres ont perdu de leur humidité rapidement provoquant une microfissuration répandue. Bien que les gaines ralentissent le processus de perte d'humidité, la présence de microfissures du coulis dans les gaines n'est pas à négliger.

Des essais pour estimer la vitesse de propagation des ondes dans le coulis ont été effectués sur les cylindres de coulis fabriqués pour les plaques et pour les blocs. La formulation et le processus de fabrication du coulis étaient les mêmes mais les jours de production étaient différents. Les résultats sont affichés à la figure 6.3.

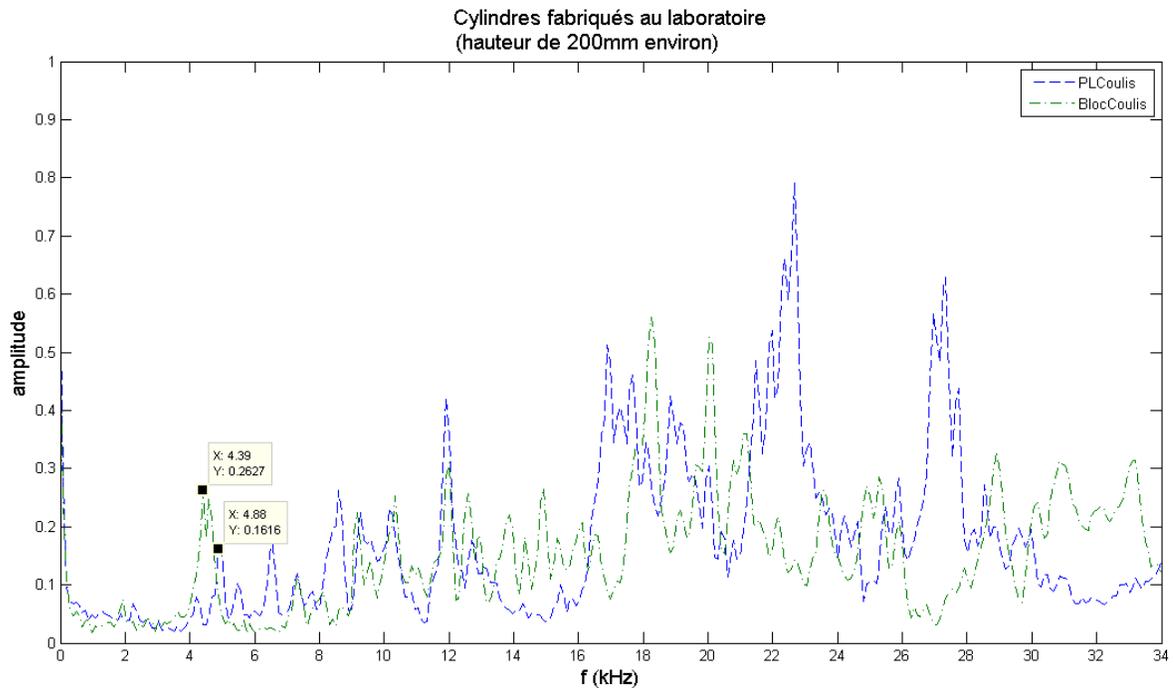


Figure 6.3- Mesures IE effectuées sur les cylindres de coulis de ciment fabriqués au laboratoire

Sous l'effet des microfissures sur les deux cylindres, de nombreux pics de fréquences de forte amplitude apparaissent en raison de l'écho aux interfaces coulis/fissure. Par conséquent, la fréquence image de l'épaisseur f_1 des cylindres est fortement atténuée. Les valeurs obtenues ont été entrées dans le tableau 6.5. Les vitesses de propagation des ondes dans le coulis ont été déterminées à l'aide de l'équation (5.1). Ces vitesses sont deux fois moins importantes que les vitesses v_p dans le béton de sorte que le coefficient de réflexion se trouve de même signe pour une gaine vide de coulis et une gaine remplie.

Tableau 6.5- Données des cylindres de coulis de ciment

| Cylindre de coulis des plaques | | | | | |
|--------------------------------|----------|-------|---------|-------------|-------------|
| D (mm) | B (mm) | D/B | β | f_1 (kHz) | v_p (m/s) |
| 191 | 102 | 1,87 | 0,96 | 4,88 | 1942 |
| Cylindre de coulis des blocs | | | | | |
| D (mm) | B (mm) | D/B | β | f_1 (kHz) | v_p (m/s) |
| 180 | 101 | 1,78 | 0,95 | 4,39 | 1664 |

Ainsi, il est possible que les ondes procèdent de manière identique en ce qui concerne leur trajectoire. En raison d'une propagation plus rapide dans le béton, les ondes seraient à même de « contourner » le coulis pour se propager plus facilement dans la pièce. C'est pourquoi le décalage Δf_1 est présent sur l'ensemble des résultats obtenus pour les plaques. Néanmoins, il est tout de même possible qu'une partie des ondes propagées parcourent le coulis de la pièce.

Etant donné que le coulis se comporte comme de l'air par rapport au béton (ainsi que par rapport à l'acier des gaines), le pic h sur la figure 6.2 serait présent autour de 40 kHz pour toutes les plaques. Celui-ci pourrait donc être identifié comme la valeur de f_{vide} .

Toutefois, la présence du pic g (toujours sur la figure 6.2) est encore matière à discussion. Voilà pourquoi d'autres signaux relevés avec le capteur UdeS ont été étudiés. Ainsi, à la figure 6.4, les résultats observés ont été faits à partir d'une mesure faite avec le capteur UdeS à un endroit sans gaine ni autre défaut. Il en ressort 3 fréquences à $22,2$, $40,0$ et $52,1 \text{ kHz}$. Or les deux premières fréquences ont la même valeur que les pics g et h des résultats de la figure 6.2 obtenus avec le capteur UdeS.

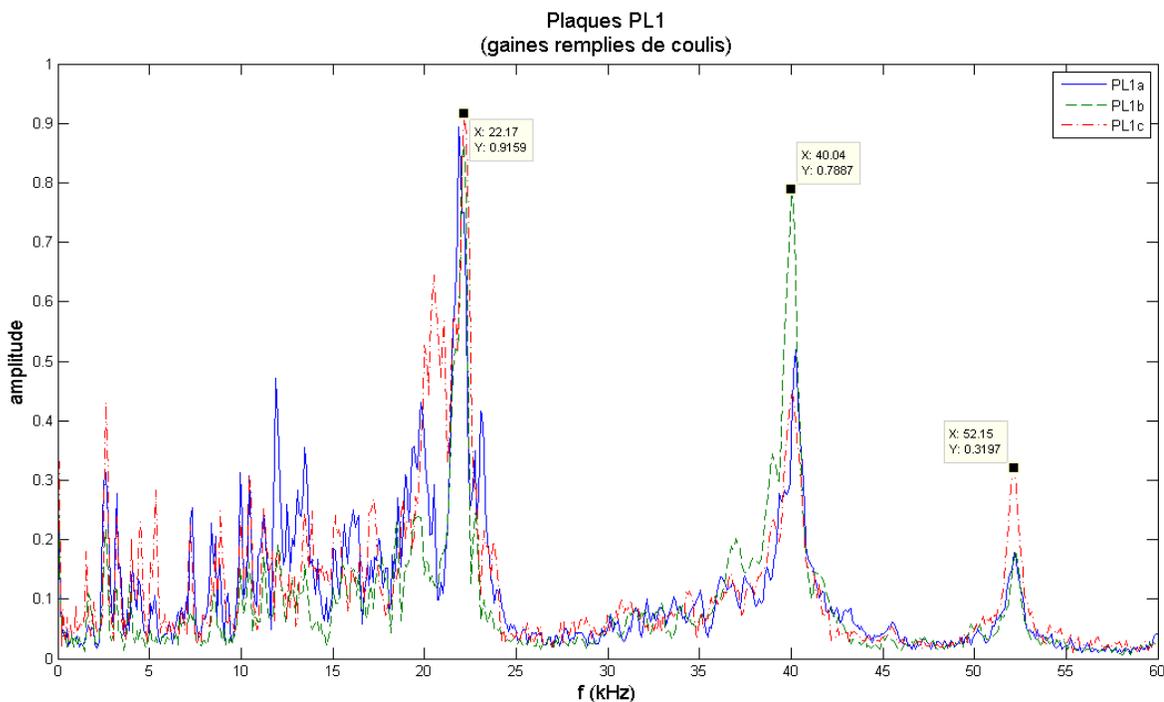


Figure 6.4- Relevé de mesures effectuées avec le capteur UdeS
(Mesure à 5 cm du bord, réglages 2E5TPB1)

Dès lors, les deux fréquences identifiées g et h ont paru de moins en moins causées par les plaques mais plutôt par le nouveau matériel de mesure. Or, la courbe de calibration du capteur UdeS (figure 6.5) indique 3 fréquences propres du capteurs : 21,8, 37,8 et 50,9 kHz. Ces valeurs sont très proches de celles mises en avant à la figure 6.4. Ces constatations tendent à confirmer que les deux fréquences j et h proviennent du capteur et non de l'échantillon étudié.

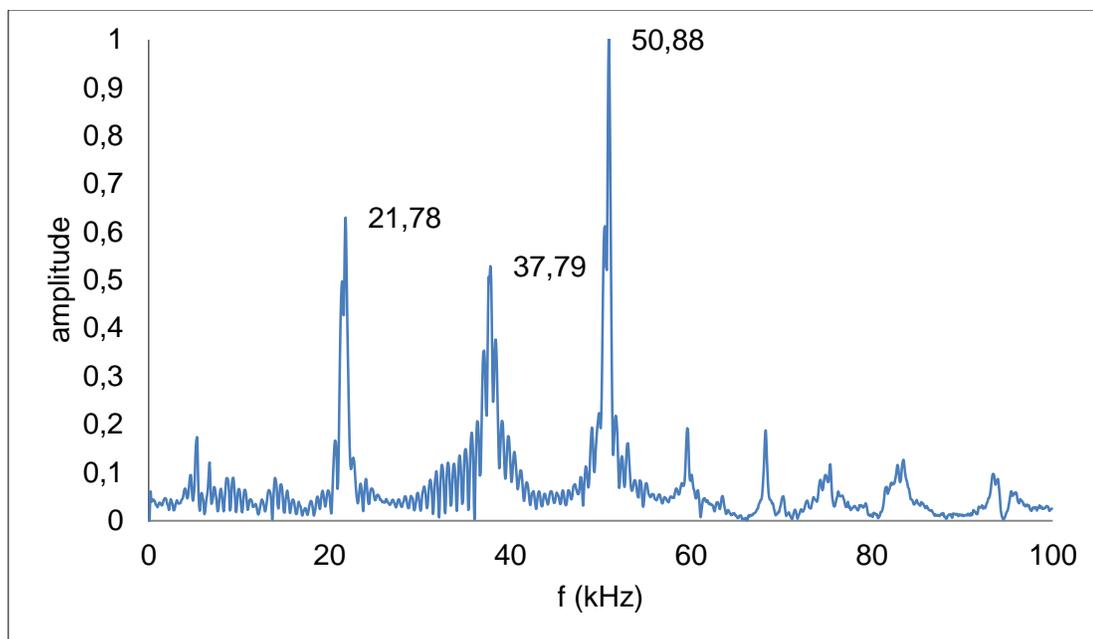


Figure 6.5- Calibration du capteur 24 kHz de l'Université de Sherbrooke

6.1.4. Résultats exploitables

Il a été confirmé que le capteur de l'Université Laval, c'est-à-dire le capteur livré avec l'appareil, donnait des résultats corrects. Cependant, les valeurs obtenues ne permettent pas de dissocier les gaines vides de coulis des gaines pleines. Effectivement, les fréquences relevées lors des mesures ne sont pas caractéristiques d'un état de remplissage particulier de la gaine puisque toutes les fréquences sont présentes à chaque relevé.

Toutefois, il est apparu une différence entre les relevés obtenus lorsque la gaine est remplie de coulis et contient des barres (PL2) comparée aux 3 autres cas. Effectivement, la complexité de l'ensemble forme de multiples interfaces et donc de multiples réflexions qui amènent à une diminution forte des amplitudes des fréquences excitées (avec le capteur UL). Malheureusement, dans le cas d'essais *in-situ*, il n'est pas aisé d'observer un tel comportement en raison de la présence d'autres éléments dans le béton (barres métalliques disposées entre la surface d'étude et la gaine, présence de vides dans le béton ou de fissures, ...). De plus, une atténuation d'amplitude peut être provoquée par d'autres problèmes ou d'autres éléments en présence.

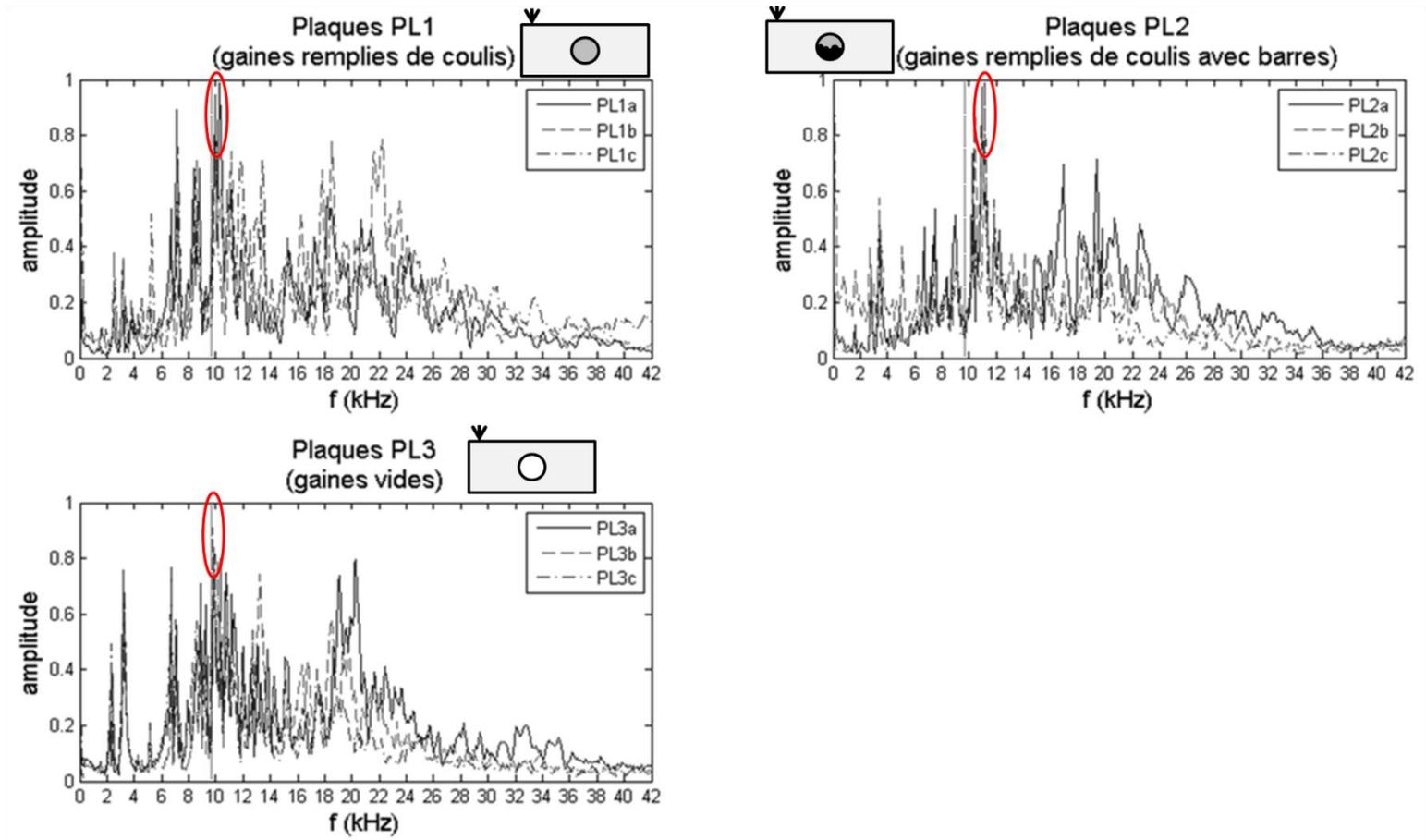


Figure 6.6- Mesures IE sur les épaisseurs des plaques (2E5TB3)

Cependant, il est intéressant de se pencher cette fois-ci sur le décalage en fréquence Δf_1 relevé pour chaque plaque. Effectivement, si l'on se réfère à l'article [30], la valeur de Δf_1 est attendue autour de 40 %. De plus, en ce qui concerne les caractéristiques des pièces, les valeurs de p et \emptyset entrent dans la gamme étudiée par O. Abraham. Or, si l'on fait observation des valeurs de f_1^* obtenues par les mesures comparées à la valeur théorique de 5,9 kHz, ces valeurs en sont loin (au minimum à 6,8 kHz, voir le tableau 6.3). De ce fait, un Δf_1 sera inférieur est attendu.

Des essais IE ont été faits à 5 cm du bord des plaques pour pouvoir estimer la valeur de f_1 (figure 6.6). Les fréquences mesurées sont inscrites au tableau 6.6. On remarque que les résultats sont assez proches de la théorie. Par conséquent, les valeurs de Δf_1 obtenues lors des essais sont plus basses qu'en théorie (environ 30 %, voir tableau 6.7). Bien qu'il y ait une erreur de 25 % sur Δf_1 , cela reste suffisant pour observer la variation en fréquence.

Tableau 6.6- Valeurs des fréquences obtenues pour la figure 6.6

| Fréquences des épaisseurs seules (kHz) | | |
|---|------|-----|
| PL1 | PL2 | PL3 |
| 10,3 | 11,1 | 9,8 |

Tableau 6.7- Décalage en fréquence relevé pour les plaques

| Décalage Δf_1 relevé (%) | | |
|----------------------------------|-----|--|
| PL1 | PL2 | PL3 (résultat identique pour PL3V et PL3B) |
| 29 | 30 | 30 |

Il ressort donc qu'il semble difficile d'obtenir des résultats probants pour des pièces de ce gabarit quand à l'étude de la présence de vide de coulis en fonction de la variation Δf_1 . Ceci peut être une conséquence du type de coulis (avec une vitesse de propagation faible).

6.2. Blocs (laboratoire)

Les blocs ont été soumis à des essais IE et d'endoscopie. Dans le cas de cette recherche, l'endoscopie a été pratiquée uniquement sur le bloc B afin de vérifier la qualité de

remplissage ; les blocs ayant tous été remplis suivant le même processus, la qualité de remplissage a été présumée identique pour l'ensemble des gaines des blocs.

6.2.1. Présentation des essais impact écho sur les blocs du laboratoire

Les essais sur les blocs ont été faits dans le prolongement des essais sur les plaques. Le principe des blocs est de servir d'intermédiaire entre les plaques PL et les segments de poutres à étudier par la suite. De ce fait, des essais ont été effectués en premier sur le bloc B, celui-ci étant le plus petit des échantillons et donc le plus proche des plaques. Par la suite, le bloc A a été étudié afin d'observer les résultats impact-écho obtenus pour une gaine contenue dans un élément plus massif. Finalement, le bloc C, contenant plusieurs gaines, a été étudié.

La première approche des essais a été de comparer les résultats obtenus des essais IE entre la zone où la gaine est complètement remplie de coulis de ciment (ainsi que des barres d'acier présentes dans l'intégralité des gaines) et la zone où il n'y a pas de coulis. Cela revient à étudier les deux extrémités des blocs : à 15 *cm* du bord pour le côté vide de coulis et à 145 *cm* (à 15 *cm* du second bord) pour le côté plein. Les zones étudiées ont été choisies au milieu des trente premiers et derniers centimètres de gaine pour chaque échantillon car ce sont des zones de remplissage homogène.

Ensuite, les résultats d'essais pratiqués sur le long des gaines tous les 5 *cm* ont été comparés pour une même gaine ainsi qu'entre les différents échantillons. Ainsi, les différences entre chaque échantillon ont été observées.

La vitesse de propagation des ondes dans le béton de 3800 *m/s* ayant été déterminée à l'aide du cylindre de béton (voir section 5.2.2.1), toutes les fréquences caractéristiques théoriques ont été établies à partir de cette valeur et des dimensions des blocs. Elles sont rappelées dans ce chapitre en fonction du bloc étudié. De plus, certaines fréquences sont données en plus, comme les nouvelles valeurs des fréquences images de l'épaisseur en raison du décalage Δf_1 dues à la présence de la gaine.

6.2.2. Essais IE préliminaires sur le bloc B

Le bloc B a été le premier étudié en raison des faibles dimensions de sa section et aussi du fait qu'il ne contient qu'une seule gaine.

Une mesure directe de l'épaisseur a été effectuée à 50 mm du bord de la section afin de vérifier la valeur de la fréquence f_1 et de ses harmoniques f_i . Les autres mesures IE sur l'échantillon ont toutes été choisies en fonction de la gaine et de la géométrie de la pièce. Effectivement, la section de l'échantillon étant symétrique, il était intéressant de l'étudier selon plusieurs directions. Ainsi, des mesures IE ont été faites depuis trois surfaces de l'échantillon : depuis le dessus suivant BH, depuis le côté suivant BV et depuis le dessous suivant BB. En raison de la mise sur deux appuis du bloc pour la prise de mesures suivant BB, les résultats sont compris entre les centimètres 25 et 135 (en référence à la figure 5.5-schématisation du remplissage d'une gaine sur sa longueur). Le positionnement de chaque mesure sur le bloc B est identifié à la figure 6.7 sur sa section.

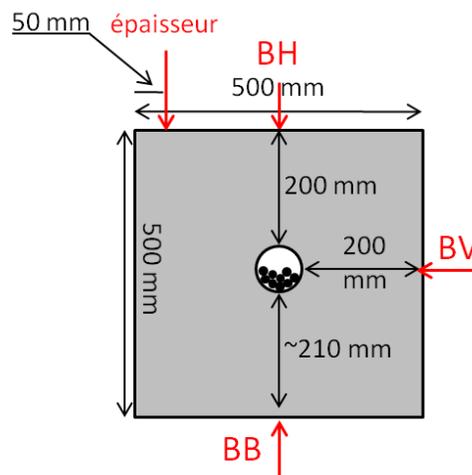


Figure 6.7- Positionnement des mesures effectuées sur le bloc B

6.2.2.1. Mesures de l'épaisseur

La mesure de l'épaisseur du bloc B a été effectuée dans le but de vérifier la justesse des valeurs théoriques de fréquences f_1 et f_i . Effectivement, la vitesse de propagation étant

estimée à 3800 m/s , et le coefficient de forme β ayant été établi auparavant, il a été possible d'estimer les fréquences image de l'épaisseur du bloc. Ces valeurs sont rappelées au tableau 6.8.

Tableau 6.8- Valeurs théoriques des fréquences image de l'épaisseur du bloc B

| f_1 (kHz) | f_2 (kHz) | f_3 (kHz) | f_4 (kHz) | f_5 (kHz) | f_6 (kHz) |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 3,4 | 4,8 | 6,5 | 8,0 | 8,4 | 9,7 |

Les valeurs estimées dans le tableau proviennent de modélisations numériques [47] pour lesquelles l'impact a été simulé en plein milieu de la surface de la pièce (à l'emplacement de BH sur la figure 6.7). Il est donc possible que les résultats obtenus par IE s'éloignent de ces valeurs en raison de la présence de la gaine d'une part, qui supprime l'homogénéité du béton sur toute sa section, et en raison de la mesure de l'épaisseur effectué sur le bord de l'échantillon (et non au centre de la surface) d'autre part.

La plus haute valeur en fréquence attendue est inférieure à 10 kHz . De ce fait, le choix des paramètres utilisés pour la mesure n'ont pas été très contraignants. La bille PB4 a été utilisée avec des réglages permettant d'obtenir une résolution en fréquence assez précise (voir tableau 6.9).

Tableau 6.9 - Réglages de la mesure de l'épaisseur de l'échantillon B (figure 6.8)

| | |
|------------------|---------|
| Mesure | 2E5TPB4 |
| f_{max} (kHz) | 49 |
| Résolution (kHz) | 0,1 |

Deux mesures d'épaisseur ont été effectuées. Effectivement, en raison de la complexité de la pièce (celle-ci n'étant pas homogène à cause de la gaine) accompagné du fait que les mesures ont été exécutées à 50 mm du bord seulement, il a été recherché une possible différence entre une mesure à la cote 15 cm et une mesure à la cote 145 cm . Ces deux positions ont été spécialement choisies afin d'observer l'influence du remplissage de la

gaine. Les résultats des mesures sont affichés à la figure 6.8 sur laquelle les pics de fréquence relevés sont identifiés et les valeurs introduites dans le tableau 6.10.

D'un point de vue général, les résultats obtenus sont très similaires entre le point de mesure à 15 *cm* (gaine vide) et celui à 145 *cm* (gaine pleine). Effectivement, sur l'ensemble des pics de fréquences, une différence importante est notable seulement sur les pics *d* et *n* et au-delà des 9 *kHz*. Quant à la forme du graphique, il y ressort beaucoup plus de fréquences que le nombre attendu. Cela peut provenir du fait que la mesure n'est pas faite au centre de la surface d'essais mais aussi à la présence de la gaine et de son contenu.

En ce qui concerne les pics ayant la plus forte amplitude, leur comportement semble suivre celui expliqué pour une pièce à section carrée par Sansalone [47], c'est-à-dire une forte amplitude pour le premier et troisième pic et une amplitude un peu plus faible pour le pic intermédiaire. Quant aux autres pics, leur amplitude reste fortement homogène et il est difficile de les associer à un phénomène de réflexion particulier.

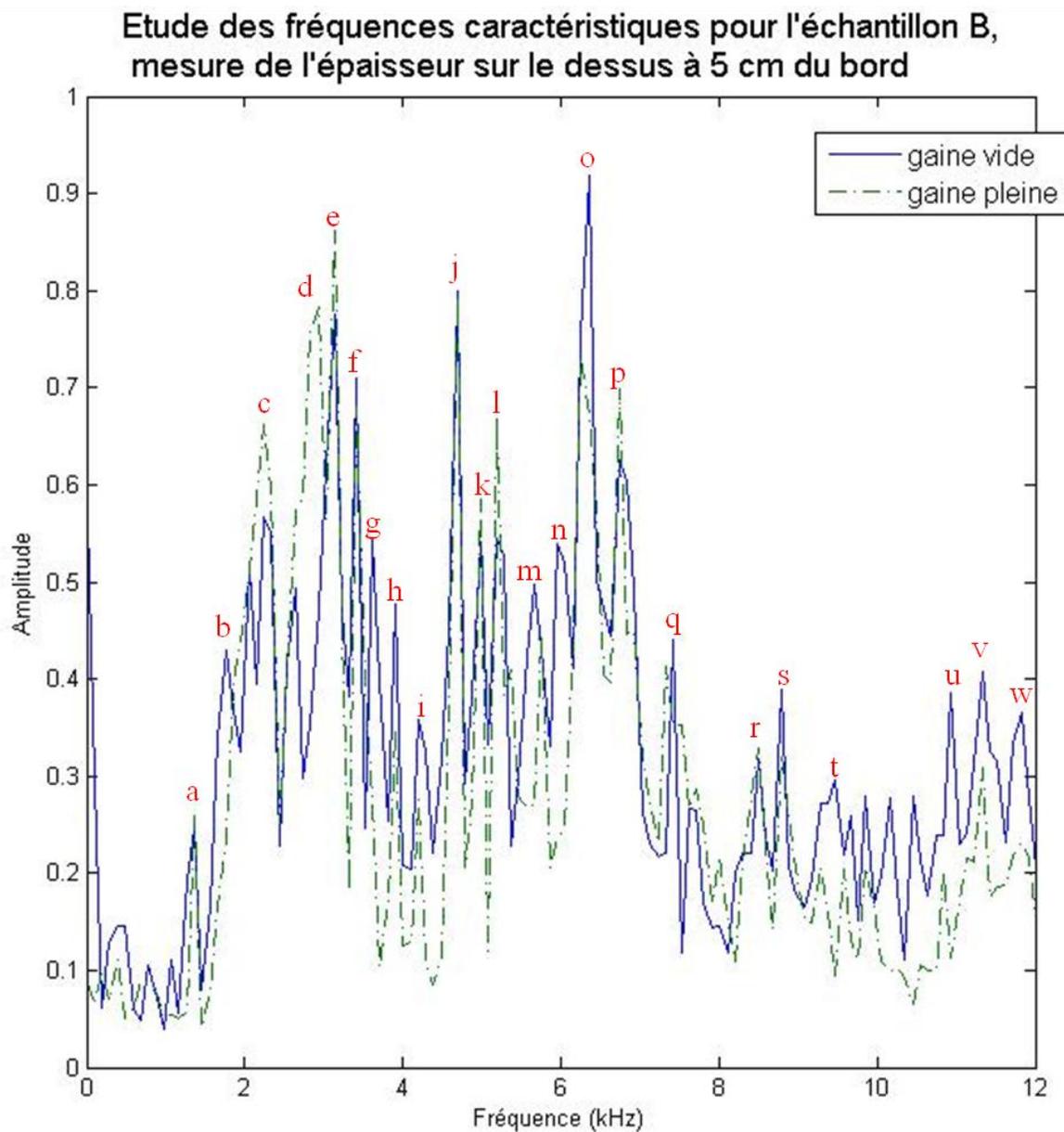


Figure 6.8 - Mesure de l'épaisseur du bloc B effectué aux cotes 15 cm (côté gaine vide) et 145 cm (côté gaine pleine)

Les trois pics ayant la plus forte amplitude sont les pics identifiés *e*, *j* et *o* dont les fréquences sont respectivement 3,1 kHz, 4,7 kHz et 6,4 kHz. Ces pics ont des valeurs proches des fréquences théoriques f_1 , f_2 et f_3 . Malgré tout, on note un écart de 10 % entre

f_1 et le pic e . Cet écart est important car il est équivalent à la variation Δf_1 estimée pour le bloc B. Cependant, cet écart ne peut être dû à la présence de la gaine puisque celle-ci n'est pas sur la trajectoire principale de l'onde. Or, le pic f obtenu lors des mesures est égale à f_1 . Il s'avère donc que ce pic apparaisse plus vraisemblablement comme le pic image de l'épaisseur de la pièce.

Le pic e possédant une forte amplitude n'est néanmoins pas à omettre complètement. Celui-ci apparaissant à premier abord comme la fréquence f_1 , il est bon de conserver la valeur de 3,1 kHz afin de s'assurer de la bonne estimation de la vitesse de propagation des ondes dans les échantillons (dans le cas où celle-ci ne serait pas déterminée à l'aide de cylindres provenant du même béton). Cependant, aucune erreur du même genre n'a été relevée pour les fréquences f_2 et f_3 identifiées par les pics j et o .

Tableau 6.10 - Valeur des pics de fréquence identifiés sur la figure 6.8

| | | | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> | <i>h</i> | <i>i</i> | <i>j</i> | <i>k</i> |
| 1,4 | 1,8 | 2,3 | 2,9 | 3,1 | 3,4 | 3,6 | 3,9 | 4,2 | 4,7 | 5,0 |
| <i>l</i> | <i>m</i> | <i>n</i> | <i>o</i> | <i>p</i> | <i>q</i> | <i>r</i> | <i>s</i> | <i>t</i> | <i>u</i> | <i>v</i> |
| 5,2 | 5,7 | 6,0 | 6,4 | 6,7 | 7,4 | 8,5 | 8,8 | 10,9 | 11,3 | 11,8 |

Pour finir, les nombreux autres pics de fréquences ont pu être générés par différents facteurs : la présence d'irrégularités dans le béton, les effets de bord, la présence de la gaine et de son contenu mais aussi le choix de la bille. Effectivement, plus f_{max} est important pour une bille utilisée lors d'un impact, plus l'énergie déployée par la bille est diminué. Ainsi, il est possible de faire ressortir plus de fréquences, néanmoins moins caractéristiques, avec une bille dont le diamètre permet d'aller vers les hautes fréquences. C'est ainsi que la différence d'amplitude entre les pics caractéristiques de la pièce et celle des autres pics n'est pas très importante.

Quant aux pics d et n , ils peuvent être caractéristiques du type de remplissage de la gaine. Le pic d possède une très forte amplitude dans le cas de la gaine pleine (il est existant pour la gaine vide mais d'amplitude faible) et le pic n n'apparaît que dans le cas de la gaine

vide. La confirmation de la présence des pic d et n , caractéristique du remplissage des gaines, lors de l'étude du bloc A viendra confirmer cette analyse de mesures (voir la sous-section 6.2.3).

6.2.2.2. Mesures suivant BH

Cette fois ci, les mesures ont été pratiquées sur le centre de la surface supérieure du bloc, c'est-à-dire au-dessus de la gaine.

Le but de ces essais a été de vérifier la présence du décalage Δf_1 attendu dans le cas de la gaine vide mais aussi, en raison des résultats obtenus pour les plaques, pour la gaine pleine. Les valeurs des fréquences images de l'épaisseur prenant en compte la variation Δf_1 sont rappelées au tableau 6.11.

Aussi, ces essais ont été effectués dans le but d'observer les pics de fréquence image de la présence de la gaine et suivant son type de remplissage. En effet, comme les plaques n'ont pas donné de résultats concrets sur cet élément, les blocs doivent être étudiés avec attention afin de tenter d'observer une différence entre les mesures suivant les différents cas de remplissage de la gaine. Le tableau 6.12 reprend les valeurs attendues de fréquences caractéristiques de la gaine avec les profondeurs d'études.

Tableau 6.11- Valeurs théoriques des fréquences image de l'épaisseur du bloc B en prenant compte du décalage Δf_1 du à la gaine estimé à 10 %

| f_1^* (kHz) | f_2^* (kHz) | f_3^* (kHz) | f_4^* (kHz) | f_5^* (kHz) | f_6^* (kHz) |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 3,1 | 4,3 | 5,8 | 7,2 | 7,5 | 8,7 |

Tableau 6.12- Identification des valeurs théoriques attendues pour les fréquences caractéristiques de vide en haut de gaine (profondeur p_g) et des barres d'acier dans la gaine (profondeur p) depuis la surface étudiée

| p_g (mm) | f_{vide} (kHz) | p (mm) | f_{acier} (kHz) |
|------------|------------------|----------|-------------------|
| 200 | 9,1 | 242 | 3,9 |

Une fois de plus, la plus haute valeur en fréquence attendue est inférieure à 10 kHz . La bille B3 a été choisie afin de créer un impact avec une plus grande énergie avec des réglages permettant d'obtenir une résolution en fréquence assez précise (voir tableau 6.13).

Tableau 6.13- Réglages utilisés pour les mesures au-dessus (figure 6.9) et sur le côté de la gaine (figure 6.10)

| | |
|------------------|--------|
| Mesure | 2E5TB3 |
| f_{max} (kHz) | 27 |
| Résolution (kHz) | 0,1 |

Comme pour la mesure précédente, les essais ont été pratiqués sur les cotes 15 cm et 145 cm dans le but de comparer les réflexions d'ondes sur une gaine vide de coulis avec celles sur une gaine pleine de coulis. Les résultats sont donnés à la figure 6.9 et les valeurs des pics identifiés sur la figure sont entrées au tableau 6.14.

Globalement, les résultats sont très similaires entre les deux points de mesures. En effet, exception faite des pics dont la fréquence dépasse les 9 kHz , les mêmes pics de fréquence sont présent sur les deux mesures.

La disposition générale des pics est semblable au résultat précédent (figure 6.8) mais de façon plus « aérée », c'est-à-dire qu'il y a un moins grand nombre de pic dont l'amplitude est moyenne. Deux pics de fréquences de forte amplitude ressortent comme les fréquences images de l'épaisseur de la pièce (fréquences f_1 et f_3) accompagnés d'un pic de fréquence intermédiaire de plus faible amplitude (fréquence f_2). Les trois fréquences identifiées sont les pics b , g et k aux valeurs respectives de $2,8\text{ kHz}$, $4,7\text{ kHz}$ et $6,3\text{ kHz}$.

Etant donné qu'il y a la présence de la gaine à l'endroit étudié, il est fortement probable de s'attendre à un décalage en fréquence. Effectivement, les pics b , g et k sont beaucoup plus proches des valeurs f_1^* , f_2^* et f_3^* que de f_1 , f_2 et f_3 respectivement. De même, il est remarqué encore une fois un décalage de 10% entre la valeur du pic b et la valeur de f_1^* . De plus, comme lors de la mesure de l'épaisseur du bloc B, un second pic, de plus faible

amplitude que le pic *b* mais toutefois important, apparaît à la fréquence de 3,0 kHz, c'est-à-dire à une valeur assimilable à f_1^* en prenant en compte la résolution de 0,1 kHz.

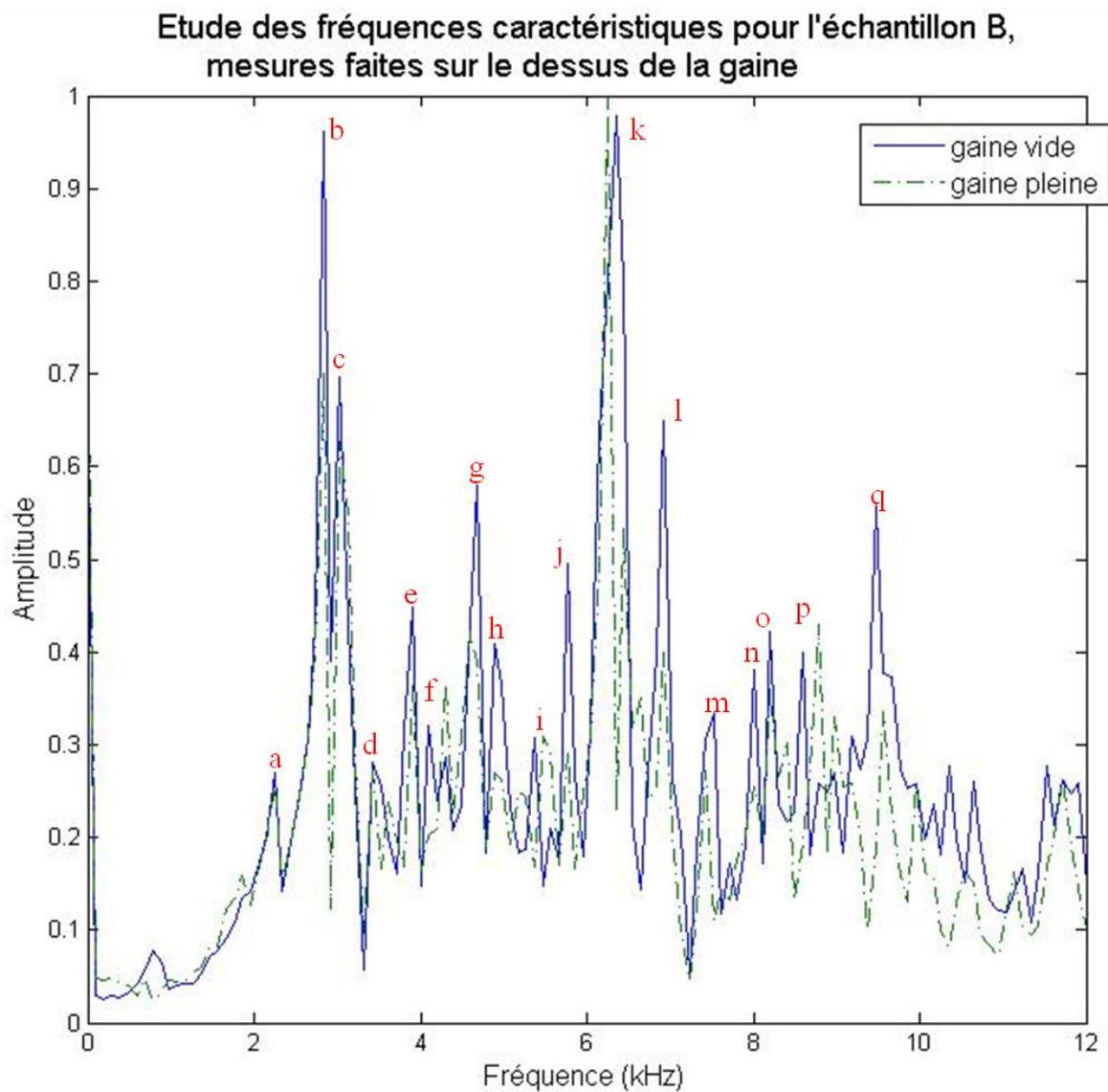


Figure 6.9- Mesure effectuée sur le bloc B au-dessus de la gaine à 15 cm (gaine vide) et 145 cm (gaine pleine)

Ainsi, comme dans le cas précédant, le pic b n'est pas identifié comme la fréquence caractéristique image de l'épaisseur de la pièce mais reste tout de même une fréquence importante due à la géométrie du bloc.

En ce qui concerne les autres harmoniques f_4^* à f_6^* , ils sont « noyés » dans les autres pics de fréquence, comme lors de la mesure de l'épaisseur du bloc. Cependant, cette fois-ci, les pics m et p apparaissent aux valeurs de f_5^* et f_6^* .

Tableau 6.14- Valeur des pics de fréquence identifiés sur la figure 6.9

| | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|-----|-----|
| a | b | c | d | e | f | g | h | i |
| 2,3 | 2,8 | 3,0 | 3,4 | 3,9 | 4,1 | 4,7 | 4,9 | 5,4 |
| j | k | l | m | n | o | p | q | |
| 5,8 | 6,3 | 6,9 | 7,5 | 8,0 | 8,2 | 8,6 – 8,8 | 9,5 | |

En ce qui concerne les fréquences auxquelles les réponses gaine vide / gaine pleine sont attendues, le pic e a été identifié à la fréquence de $3,9\text{ kHz}$ (équivalent à f_{acier}) mais apparaît sur les deux mesures. Le pic e ne devrait apparaître que dans le cas de la gaine pleine. En ce qui concerne la fréquence attendue f_{vide} , celle-ci n'apparaît pas dans les deux cas.

Ainsi, le comportement des trois premiers harmoniques est retrouvé comme pour l'essai de mesure de l'épaisseur du bloc B. Le décalage de 10 % du premier pic existe dans tous les cas suivi d'un second pic de plus faible amplitude sur la fréquence fondamentale de l'épaisseur de la pièce. Pour la suite de cette étude, ce comportement va être qualifié de « dédoublement » du pic de fréquence. Les deuxième et troisième harmoniques peuvent différer légèrement des valeurs estimées par calcul étant donné que les valeurs théoriques ont été établies pour un élément en béton homogène.

Quant aux différences de résultats entre les deux types de remplissage de la gaine, ils sont très faibles. Quelques légers décalages de pics sont notables, mais dans l'optique d'une utilisation dans un cas réel, l'impact-écho ne semble pas être un moyen adapté pour détecter les vides de coulis.

6.2.2.3. Mesures suivant BV

Afin d'optimiser les résultats obtenus par IE sur le bloc B, une gamme d'essais a été pratiquée sur le côté du bloc au niveau de la gaine afin de comparer les résultats obtenus entre ces mesures et les mesures antérieures (c'est-à-dire les mesures suivant BH).

L'orientation du coulis dans la gaine n'a pas modifié les résultats attendus étant donné que les mesures ont été pratiquées aux zones de vide complet ou de remplissage complet des gaines.

Par contre, l'orientation de l'acier à l'intérieur de la gaine peut influencer les résultats. Effectivement, les barres d'aciers remplissant environ 45 % de la section de la gaine, ces barres peuvent se trouver en contact direct avec la gaine au niveau de la mesure BV. Ainsi, la valeur de la fréquence caractéristique attendue pour l'acier a été recalculée en fonction de la profondeur de l'acier par rapport à la surface d'étude et les valeurs attendues pour la gaine sont rappelées au tableau 6.15.

Tableau 6.15 Identification des valeurs théoriques attendues pour les fréquences caractéristiques de vide en haut de gaine (profondeur p_g) et des barres d'acier dans la gaine (profondeur p) depuis la surface étudiée

| p_g (mm) | f_{vide} (kHz) | p (mm) | f_{acier} (kHz) |
|------------|------------------|----------|-------------------|
| 200 | 9,1 | 200 | 4,8 |

Les essais ont été pratiqués avec les paramètres identiques aux mesures suivant BH (voir tableau 6.13). Les résultats sont affichés à la figure 6.10 et les valeurs des pics identifiés sur la figure sont inscrites au tableau 6.16.

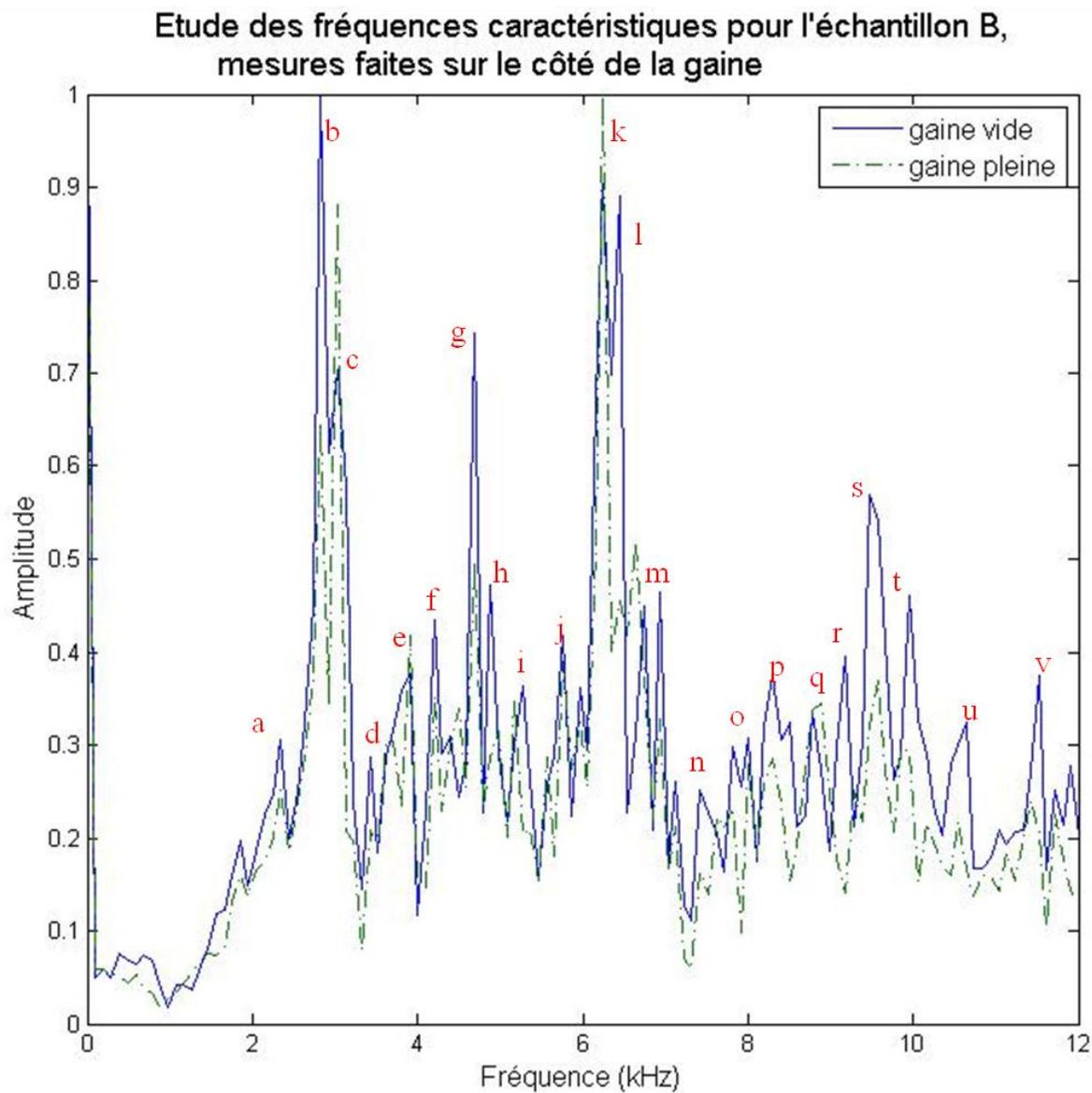


Figure 6.10 Mesure effectuée sur le bloc B sur le côté de la gaine à 15 cm (gaine vide) et 145 cm (gaine pleine)

D'un point de vue général, les résultats obtenus pour les essais suivant BV sont très près de ceux obtenus suivant BH. L'ensemble des pics obtenus en BH sont présents en BV. Par contre, de nouveaux pics sont apparus. Ces nouveaux pics proviennent du changement d'orientation des barres d'aciers dans le bloc.

Les pics de fréquences b , g et k , identifiés comme les trois premières fréquences image de l'épaisseur, ont les mêmes valeurs que dans le cas précédent. De plus, le dédoublement du pic de la fréquence fondamentale image de l'épaisseur est aussi présente (pic c). Egalement, le même comportement est observé pour le troisième harmonique : le pic k est dédoublé sur le pic l à $6,5 \text{ kHz}$. L'écart entre les pics b et c et les pics k et l sont de même ampleur ($0,2 \text{ kHz}$). Le pic à $6,5 \text{ kHz}$ n'avait pas été relevé lors des mesures suivant BH.

Tableau 6.16- Valeur des pics de fréquence identifiés sur la figure 6.10

| a | b | c | d | e | f | g | h | i | j | k |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----|-----|-----|------|------|------|
| 1,9 – 2,3 | 2,8 | 3,0 | 3,4 | 3,9 | 4,2 | 4,7 | 4,9 | 5,3 | 5,8 | 6,3 |
| l | m | n | o | p | q | r | s | t | u | v |
| 6,5 | 6,6 – 6,9 | 7,1 – 7,4 | 7,8 – 8,0 | 8,3 – 8,5 | 8,8 | 9,2 | 9,5 | 10,0 | 10,6 | 11,5 |

En ce qui concerne les pics additionnels relevés en plus de ceux observés suivant BH, ils restent de faible amplitude (pics r , t , u et v). Ils ne sont pas identifiés comme des fréquences caractéristiques et doivent provenir de perturbations dues à la non homogénéité de l'échantillon (présence de la gaine avec les barres orientées différemment de manière que les ondes se confrontent en même temps au coulis mixé avec les barres mais aussi au vide présent dans la gaine).

Quant aux fréquences caractéristiques dues à la présence de la gaine, il a été noté plusieurs constatations. Comme pour les essais suivant BH, le pic image du vide de coulis n'apparaît pas. Aussi, la valeur de la fréquence attendue pour la réponse de l'acier f_{acier} ($4,8 \text{ kHz}$) se trouve très proche du second harmonique f_2^* ($4,3 \text{ kHz}$) identifié par le pic g . Cela peut donc « masquer » le pic f_{acier} . Malgré tout, le pic h a une valeur très proche de f_{acier} (à $0,1 \text{ kHz}$ près). Ce pic pourrait donc être apprécié comme le pic image de l'acier contenu dans la gaine, d'autant plus que, au vu de l'orientation des barres, le pic de fréquence peut être associé au cas d'une gaine remplie de coulis tout comme au cas d'une gaine vide. Cependant, puisque ce pic apparaissait déjà lors des essais effectués depuis BH, il n'est donc pas possible de l'identifier comme tel.

De même, en examinant la valeur de f_{acier} (à 3,9 kHz) attendue pour les essais suivant BH (tableau 6.12) et jugée non identifiée lors de l'analyse des résultats car elle apparaissait dans les deux cas étudiés (gaine vide et gaine pleine) ; ils est maintenant possible d'affirmer que le pic obtenu à 3,9 kHz est dû à la géométrie de la pièce puisque ce pic est aussi présent dans les résultats obtenus pour les essais suivant BV.

D'après l'ensemble des résultats obtenus pour le bloc B, il a été remarqué qu'en raison de la présence de la gaine, en plus des nombreux harmoniques présents dus aux dimensions du bloc, de nouvelles fréquences caractéristiques de la géométrie de la pièce interviennent dans les résultats obtenus par mesure IE. En plus d'augmenter la difficulté de lecture des résultats, ces fréquences peuvent se situer aux fréquences attendues pour la détection de l'état de remplissage des gaines. Cela empêche donc une analyse probante des résultats IE sur l'état de la précontrainte d'une pièce.

6.2.3. Essais IE préliminaires sur le bloc A

Le bloc A a été le étudié à la suite du bloc B car seule sa géométrie changeait. La présence de la gaine dans le bloc peut aussi influencer les résultats sur les réponses en fréquence dues à la géométrie de la pièce et sera donc observée, principalement sur les mesures suivant AV (sur le côté de la gaine). Les résultats obtenus peuvent être comparées aux résultats du bloc B.

Le positionnement de chaque mesure sur la section du bloc A est identifié à la figure 6.11.

Une mesure directe de l'épaisseur a été effectuée à 50 mm du bord de la section sur le dessus de la pièce mais aussi au centre de la pièce sur une surface de côté. Cette deuxième mesure d'épaisseur (schématisé « épaisseur2 » sur la figure 6.11) était particulièrement intéressante car l'« épaisseur2 » est l'épaisseur mesurée pour laquelle il y a le moins d'effets parasites dus à la présence d'une gaine ou aux effets de bord pour les blocs étudiés.

En plus des mesures IE suivant les deux épaisseurs ainsi que depuis le côté de la pièce (suivant AV), une mesure depuis la surface du dessus suivant AH a été pratiquée le long de la gaine.

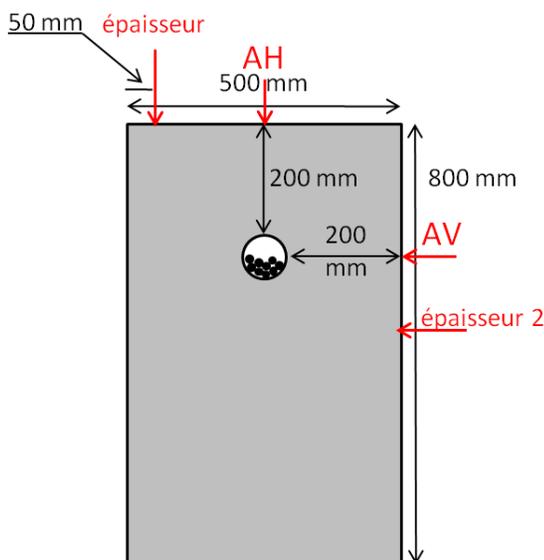


Figure 6.11- Positionnement des mesures effectuées sur le bloc A

6.2.3.1. Mesures de l'épaisseur sur la hauteur de l'échantillon

Comme pour le bloc B, la mesure de l'épaisseur sur la hauteur du bloc A a été effectuée. Cette mesure a pu être influencée par les effets de bord ainsi que par la présence de la gaine. De ce fait, deux mesures ont été pratiquées : une à la cote 15 *cm* et une seconde à la cote 145 *cm*. Cela revient, de même que pour le bloc B, à des mesures à proximité d'une gaine pleine de coulis et d'une gaine vide de coulis.

Les valeurs des fréquences attendues pour l'épaisseur sont présentées au tableau 6.17 et les paramètres utilisés pour les mesures sont donnés au tableau 6.18. Etant donné que les valeurs en fréquence attendues ne dépassaient pas 7 *kHz*, une bille de diamètre moyen a été choisie pour effectuer les essais. La résolution a été choisie de façon à obtenir des résultats précis. Les résultats obtenus sont affichés à la figure 6.12.

Tableau 6.17- Valeurs théoriques des fréquences image de l'épaisseur du bloc A (mesure sur la hauteur)

| f_1 (kHz) | f_2 (kHz) | f_3 (kHz) | f_4 (kHz) | f_5 (kHz) | f_6 (kHz) |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 2,3 | 3,6 | 4,7 | 5,1 | 5,7 | 6,5 |

Tableau 6.18- Réglages de la mesure de l'épaisseur sur la hauteur de l'échantillon A (figure 6.12)

| | |
|------------------|--------|
| Mesure | 2E5TB1 |
| f_{max} (kHz) | 33 |
| Résolution (kHz) | 0,1 |

Etant donné les dimensions et proportions de l'élément, l'interprétation des résultats devient plus difficile. Effectivement, le graphique de la figure 6.12 est plus complexe que ceux vus précédemment pour le bloc B. Cependant, une différence peut être noté entre les deux résultats de mesures regroupés sur la figure. Un décalage est notable sur plusieurs pics relevés. L'état de remplissage de la gaine étant la seule différence entre les mesures, celle-ci est le facteur prédominant influençant le positionnement des pics.

De manière générale, les résultats donnent trois fréquences dominantes suivant les pic e / f , k et o . Le pic e n'est présent que dans le cas de la gaine pleine et le pic f est présent dans le cas de la gaine vide. Du fait que les pics e et f ne soient pas confondus, cela indique qu'ils sont directement influencés par la gaine et son contenu.

Il est donc attendu que les pics k et o soient images de l'épaisseur de la pièce, mais pas forcément pour les pics e et f qui peuvent être conséquents des effets de bords et de la présence de la gaine cumulés. Il est à présent intéressant de regarder plus en détail les valeurs des fréquences obtenues. Les valeurs relevées des pics identifiés sur la figure 6.12 sont indiquées au tableau 6.19.

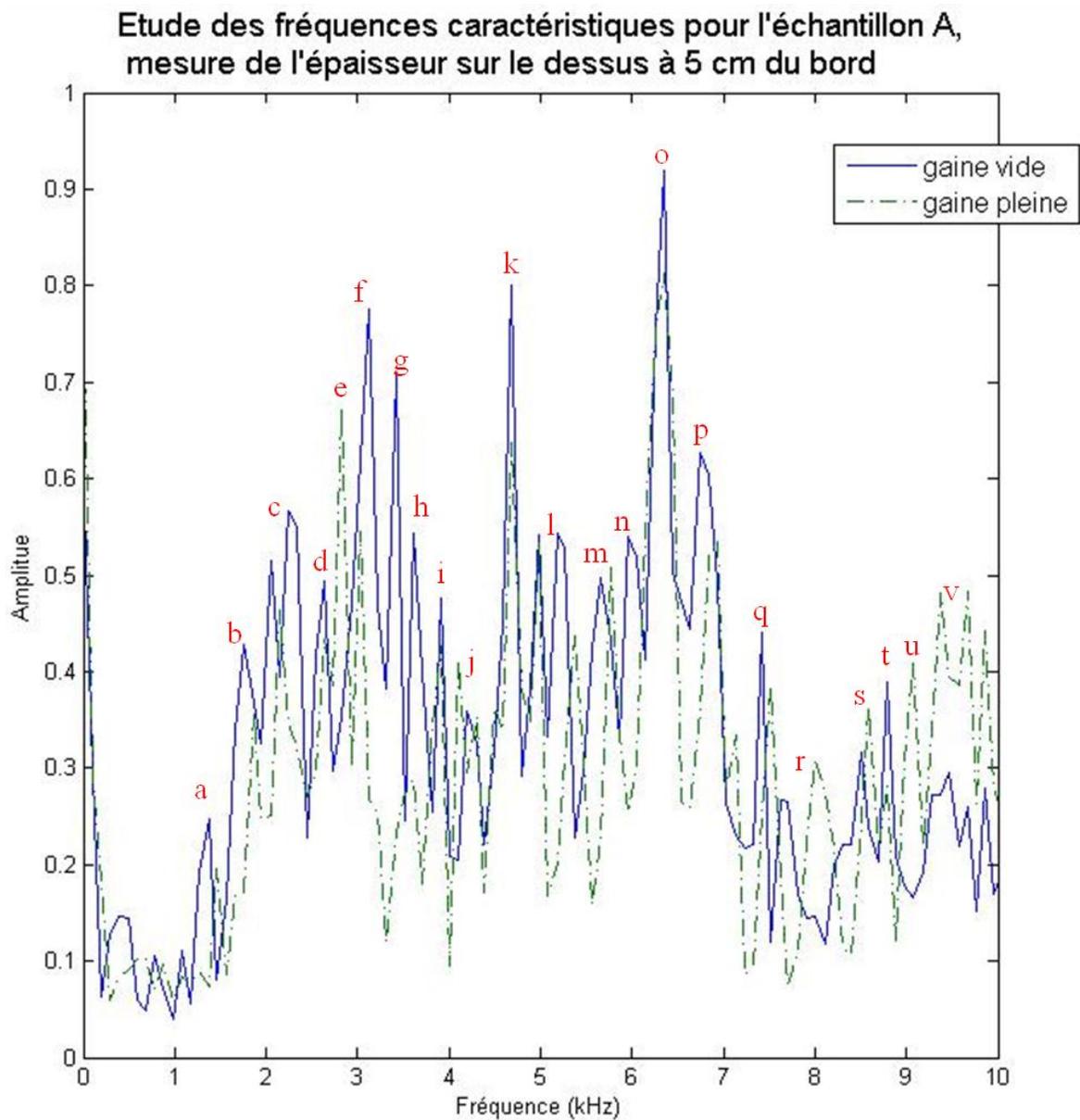


Figure 6.12- Mesure de l'épaisseur du bloc A sur sa hauteur effectuée aux cotes 15 cm (côté gaine vide) et 145 cm (côté gaine pleine)

Tableau 6.19- Valeur des pics de fréquence identifiés sur la figure 6.12

| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> | <i>h</i> | <i>i</i> | <i>j</i> | <i>k</i> |
|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| 1,4 | 1,8 | 2,0 – 2,3 | 2,6 | 2,8 | 3,1 | 3,4 | 3,6 | 2,6 | 4,1 – 4,3 | 4,7 |
| <i>l</i> | <i>m</i> | <i>n</i> | <i>o</i> | <i>p</i> | <i>q</i> | <i>r</i> | <i>s</i> | <i>t</i> | <i>u</i> | <i>v</i> |
| 5,0 – 5,2 | 5,7 | 6,0 | 6,4 | 6,7 | 7,4 | 8,0 | 8,6 | 8,8 | 9,1 | 9,4 – 9,7 |

Les pics *k* et *o* sont effectivement des fréquences caractéristiques image de l'épaisseur de la pièce, plus précisément ce sont les troisième et sixième harmoniques. Les autres fréquences f_1 , f_2 , f_4 et f_5 sont aussi présentes mais de plus faible amplitudes. Elles sont respectivement les pics *c*, *h*, *l*, et *m*.

De ce fait, il est confirmé que les pics *e* et *f* sont influencés par la géométrie de la pièce et principalement par la présence de la gaine en raison de la présence du décalage entre les deux pics. En effet, la valeur des deux pics ne correspond pas aux valeurs théoriques attendues (ces pics sont donc conséquents de la géométrie de la pièce) et le seul facteur qui amène à la variation des pics est le type de remplissage de la gaine. Ceci est aussi observable sur d'autres pics, tel que le pic *j*, mais de façon plus minime.

Ainsi, le bloc A donne une réponse en fréquence aux valeurs attendues et, de plus, de nouvelles fréquences sont obtenues en raison de la géométrie complexe de la pièce et sont fonctions de l'état de remplissage de la gaine pour certaines.

6.2.3.2. Mesure de l'épaisseur sur la largeur de l'échantillon

Dans le but d'observer la mesure d'une épaisseur d'un bloc en diminuant au maximum l'influence d'éléments parasites, la mesure de l'« épaisseur² » était une mesure importante. Le bloc A étant étudié suivant un nouveau sens (les valeurs de D et B sont inversées), de nouvelles valeurs ont été établies pour les fréquences f_1 et f_i (tableau 6.20).

Tableau 6.20- Valeurs théoriques des fréquences image de l'épaisseur du bloc A (mesure sur la largeur)

| f_1 (kHz) | f_2 (kHz) | f_3 (kHz) | f_4 (kHz) | f_5 (kHz) | f_6 (kHz) |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 3,1 | 3,4 | 4,5 | 4,7 | 5,9 | 6,0 |

Dans le sens suivant l'« épaisseur2 », le bloc A se retrouve avec les mêmes caractéristiques que le bloc D. Ainsi, les fréquences image de l'épaisseur ont été les mêmes que celles estimées pour ce bloc. Etant donné la proximité des valeurs de f_5 et f_6 (voir tableau 6.20), les deux fréquences risquent d'être confondues lors des mesures. Ainsi, seules 5 fréquences caractéristiques sont recherchées lors de la mesure.

La mesure de l'épaisseur étant effectuée au centre de la surface test, seul un point de mesure a été étudié. Les paramètres utilisés sont indiqués au tableau 6.21 et les résultats obtenus sont tracés à la figure 6.13 et les valeurs des fréquences relevées sont identifiées au tableau 6.22.

Tableau 6.21- Réglages de la mesure de l'épaisseur sur la largeur de l'échantillon A (figure 6.13)

| | |
|------------------|---------|
| Mesure | 2E10TB5 |
| f_{max} (kHz) | 16 |
| Résolution (kHz) | 0,05 |

Tableau 6.22- Valeur des pics de fréquence identifiés sur la figure 6.13

| | | | | | | | |
|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|
| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> | <i>h</i> |
| 1,6 | 1,9 | 2,2 | 2,5 | 3,2 | 3,5 | 3,8 | 4,0 – 4,3 |
| <i>i</i> | <i>j</i> | <i>k</i> | <i>l</i> | <i>m</i> | <i>n</i> | <i>o</i> | |
| 4,5 | 4,7 | 5,0 | 5,7 – 5,9 | 6,2 – 6,3 | 6,6 | 7,1 | |

Le graphique obtenu lors des résultats donne une fréquence principale : le pic *g* à 3,8 kHz. Cette valeur ne fait pas partie des fréquences attendues. Il sera fait un point sur cette fréquence particulière plus loin.

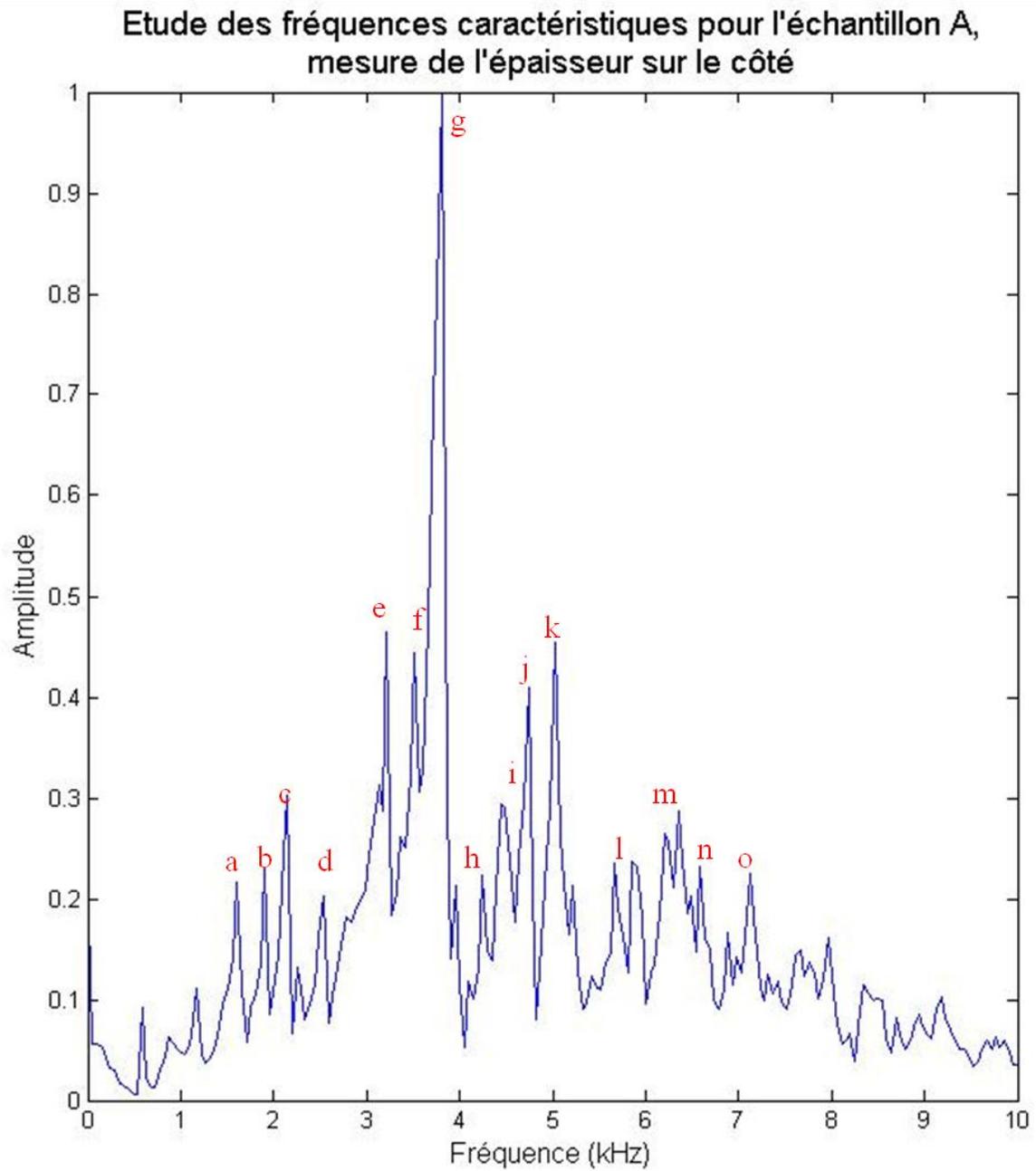


Figure 6.13 Mesure de l'épaisseur du bloc A sur sa largeur

Les autres fréquences obtenues sont, pour la plupart, des fréquences identifiées comme les harmoniques dues à l'épaisseur de la pièce. Ainsi, les pics identifiés e , f , i , j et l sont respectivement les fréquences f_1 , f_2 , f_3 , f_4 et f_5 .

Les autres pics sont de plus faible amplitude sauf pour le pic k . Comme pour le pic g , la présence de ce pic n'était pas attendu. Il se peut que ces deux pics soient influencés par la présence de la gaine dans le bloc. Ceci est une supposition puisqu'une seule mesure a été pratiquée dans ce cas.

Ainsi, même dans le cas de la mesure de l'épaisseur d'un bloc la plus simple possible dans les échantillons mis en œuvre, les résultats sont fortement influencés par la géométrie de la pièce.

6.2.3.3. Mesures suivant AH

La mesure suivant AH a été effectuée dans le même but que la mesure suivant BH : observer la variation des pics de fréquences images de l'épaisseur et le comportement des ondes passant au travers de la gaine. De ce fait, les réglages utilisés ont été les mêmes que pour BH (voir tableau 6.23).

Les fréquences attendues pour l'épaisseur du bloc (en prenant en compte la variation Δf_1 de 5 %) et la réponse de la gaine sont rappelées respectivement au tableau 6.24 et au tableau 6.25.

Les résultats de mesures aux cotes 15 cm et 145 cm sont données sur le graphique de la figure 6.14 pour lequel les valeurs des pics identifiés sont reportées au tableau 6.26.

Tableau 6.23- Réglages utilisés pour les mesures au-dessus (figure 6.14) et sur le côté de la gaine (figure 6.15)

| | |
|------------------|--------|
| Mesure | 2E5TB3 |
| f_{max} (kHz) | 27 |
| Résolution (kHz) | 0,1 |

Tableau 6.24- Valeurs théoriques des fréquences image de l'épaisseur du bloc A en prenant compte du décalage Δf_1 du à la gaine estimé à 5 %

| f_1^* (kHz) | f_2^* (kHz) | f_3^* (kHz) | f_4^* (kHz) | f_5^* (kHz) | f_6^* (kHz) |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 2,1 | 3,4 | 4,5 | 4,8 | 5,4 | 6,1 |

**Etude des fréquences caractéristiques pour l'échantillon A,
mesures faites au dessus de la gaine**

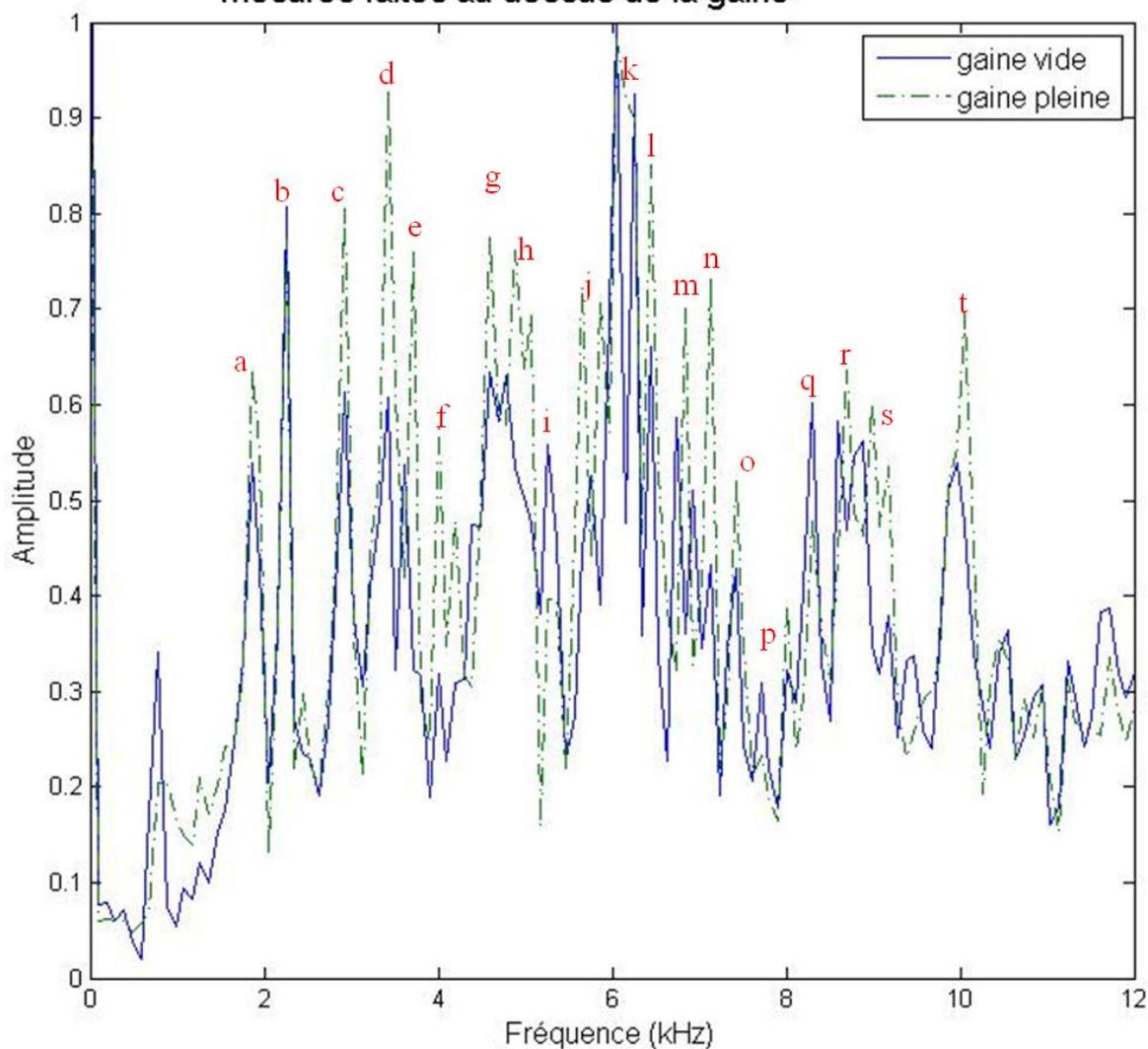


Figure 6.14- Mesure effectuée sur le bloc A au-dessus de la gaine à 15 cm (gaine vide) et 145 cm (gaine pleine)

Tableau 6.25- Identification des valeurs théoriques attendues pour les fréquences caractéristiques de vide en haut de gaine (profondeur p_g) et des barres d'acier dans la gaine (profondeur p) depuis la surface étudiée

| p_g (mm) | f_{vide} (kHz) | p (mm) | f_{acier} (kHz) |
|------------|------------------|----------|-------------------|
| 200 | 9,1 | 240 | 3,9 |

Tableau 6.26- Valeur des pics de fréquence identifiés sur la figure 6.14

| a | b | c | d | e | f | g | h | i | j |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|
| 1,9 | 2,3 | 2,9 | 3,4 | 3,7 | 4,0 | 4,6 | 4,9 | 5,3 | 5,7 – 5,8 |
| k | l | m | n | o | p | q | r | s | t |
| 6,1 – 6,3 | 6,5 | 6,8 | 7,1 | 7,4 | 8,0 | 8,3 | 8,7 | 8,9 | 10,1 |

Comme pour la mesure de l'épaisseur depuis la surface du dessus de l'échantillon, les résultats obtenus sont très difficiles à analyser. En effet, le nombre de pic obtenus est très important et, sans les valeurs théoriques de fréquences attendues, il est impossible d'identifier les pics.

Ainsi, les pics d , g , h , i et k ont été identifiés comme les fréquences f_2^* , f_3^* , f_4^* , f_5^* et f_6^* . Ces pics ont pu être identifiés grâce aux valeurs théoriques calculées au préalable. Quant à la fréquence f_1^* , elle ne semble pas être présente à la valeur attendue de 2,1 kHz. Mais deux pics de fréquences sont très proches de cette valeur : les pics a et b (à $\pm 0,2$ kHz). Il se peut que la fréquence image de l'épaisseur f_1^* soit atténuée en raison de la présence de ces deux pics.

Quant à la détection des fréquences caractéristiques dues au type de remplissage de la gaine, cela devient impossible. En effet, les fréquences f_{acier} et f_{vide} interviennent dans les résultats, mais elles sont présentes dans les deux cas. Cependant, au niveau du comportement général des résultats, il y a une nette différence entre les deux mesures au niveau de l'amplitude des pics de fréquence, bien que les pics soient présents dans les deux cas. Cela peut être une piste dans l'étude de la précontrainte par post-tension d'un élément massif. Cependant, la différence observée dans le cas des résultats de la figure 6.14

correspond à un cas bien particulier : la comparaison entre une gaine totalement vide de coulis et une gaine remplie dans son intégralité, la position de la gaine étant identique dans les deux cas. Dans le cas d'une étude sur un pont, un vide de coulis dans une gaine est rarement sur la totalité de la section. De plus, le principe même de la post-tension implique une variation du profil de la gaine le long de la poutre.

6.2.3.4. Mesures suivant AV

Les essais pratiqués sur le côté du bloc A au niveau de la gaine ont été réalisés dans le but d'être comparés aux résultats obtenus pour les mesures suivant BH et BV.

La présence de la gaine induisant une variation Δf_1 de 10 % des fréquences caractéristiques image de l'épaisseur (« épaisseur2 »), les nouvelles fréquences recherchées ont été indiquées au tableau 6.27. De même que pour la mesure de l'« épaisseur2 », les fréquences f_5^* et f_6^* sont trop proches pour être dissociées.

Comme pour le cas de l'étude suivant BV, l'orientation de l'acier change la valeur de la fréquence f_{acier} . Les valeurs théoriques établies pour la réponse de la gaine sont rappelées au tableau 6.28.

Les paramètres utilisés ont été les mêmes que pour la mesure précédente (voir tableau 6.23). Les résultats obtenus pour les essais suivant AV sont présentés à la figure 6.15 et les valeurs des pics identifiés sur les résultats sont présentés au tableau 6.29.

Tableau 6.27- Valeurs théoriques des fréquences image de l'épaisseur du bloc A en prenant compte du décalage Δf_1 dû à la gaine estimé à 10 %

| f_1^* (kHz) | f_2^* (kHz) | f_3^* (kHz) | f_4^* (kHz) | f_5^* (kHz) | f_6^* (kHz) |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 2,8 | 3,1 | 4,1 | 4,3 | 5,3 | 5,4 |

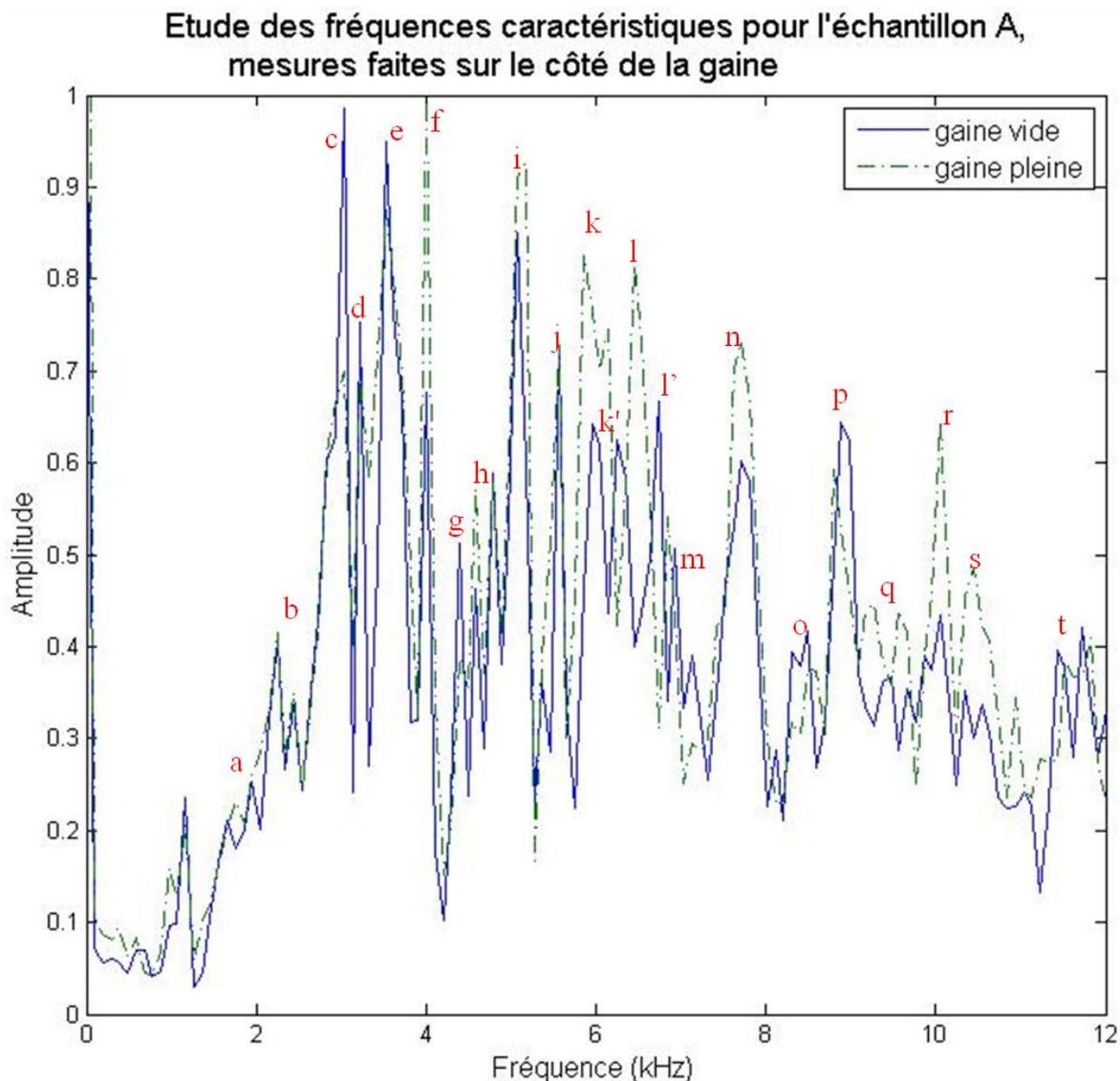


Figure 6.15- Mesure effectuée sur le bloc A sur le côté de la gaine à 15 cm (gaine vide) et 145 cm (gaine pleine)

D'un point de vue général, le graphique obtenu pour les essais suivant AV est bien plus « chargé » que le graphique obtenu pour les essais suivant BV (figure 6.10). Cette différence peut s'expliquer du fait de la non symétrie de la section d'étude au niveau du point d'étude suivant AV. Les amplitudes des pics sont beaucoup plus importantes et le

type de remplissage de la gaine influence fortement celles-ci. Comme pour les essais suivant AH, la présence du coulis de ciment dans la gaine amplifie les fréquences.

Tableau 6.28 Identification des valeurs théoriques attendues pour les fréquences caractéristiques de vide en haut de gaine (profondeur p_g) et des barres d'acier dans la gaine (profondeur p) depuis la surface étudiée

| p_g (mm) | f_{vide} (kHz) | p (mm) | f_{acier} (kHz) |
|------------|------------------|----------|-------------------|
| 200 | 9,1 | 200 | 4,8 |

Tableau 6.29- Valeur des pics de fréquence identifiés sur la figure 6.15

| a | b | c | d | e | f | g | h | i | j | k |
|-----------|-----------|------|-----|-----|-----------|-----|-----------|------|------|-----------|
| 1,7 – 2,0 | 2,3 – 2,4 | 3,0 | 3,2 | 3,5 | 4,0 | 4,4 | 4,6 – 4,8 | 5,1 | 5,6 | 5,9 – 6,2 |
| k' | l | l' | m | n | o | p | q | r | s | t |
| 6,0 – 6,4 | 6,5 | 6,7 | 6,9 | 7,7 | 8,3 – 8,5 | 8,9 | 9,3 – 9,6 | 10,1 | 10,5 | 11,4 |

Le nombre de pics de forte amplitude est élevé. Les plus importants sont les pics c , e , f , i , k et l . Mais seuls les pic c et f ont des valeurs proches des fréquences attendues (respectivement f_2^* et f_3^*). Par ailleurs, les autres pics images de l'épaisseur sont difficilement identifiables. Le pic g correspond à la fréquence f_4^* mais reste de faible amplitude comparé aux autres pics énoncé ci-avant.

Quant aux pics image du type de remplissage de la gaine, un pic de fréquence est présent à la valeur de f_{acier} , mais pour les deux mesures. Et il n'y a pas de pic en f_{vide} . Ainsi, seules les fortes différences d'amplitudes aux fréquences excitées pour les deux mesures effectuées suivant AV sont l'image de deux remplissages distincts.

Le bloc A a permis de faire ressortir la difficulté d'analyse par IE d'un élément massif à la géométrie pourtant très simple. Par conséquent, l'étude de la post-tension sur un ouvrage peut être rendue difficile pour des pièces massives. Malgré tout, des différences ont été relevées dans les amplitudes mesurées des signaux suivant le remplissage de la gaine.

6.2.4. Essais IE préliminaires sur le bloc C

Le bloc C, contenant plusieurs gaines, a servi à observer l'influence de la profondeur de la gaine dans l'échantillon et aussi de l'influence de deux gaines adjacentes. Ainsi, les gaines CA et CB ont des profondeurs différentes (respectivement à 100 mm et 150 mm) et les résultats des essais IE pratiqués sur celles-ci pourront être comparés au résultats obtenus pour BH. Quant aux gaines CC et CD, leur proximité (50 mm bord à bord) est étudiée pour observer leur influence sur les résultats IE. Ces résultats seront aussi comparés à ceux obtenus pour BH.

Chaque gaine étant étudiée par IE depuis la surface supérieure du bloc, les zones d'essais ont été nommées d'après le nom de la gaine étudiée (présenté à la figure 6.16). Comme pour les essais précédents, des mesures ont été faites aux cotes 15 cm et 145 cm afin d'observer l'influence du remplissage de la gaine.

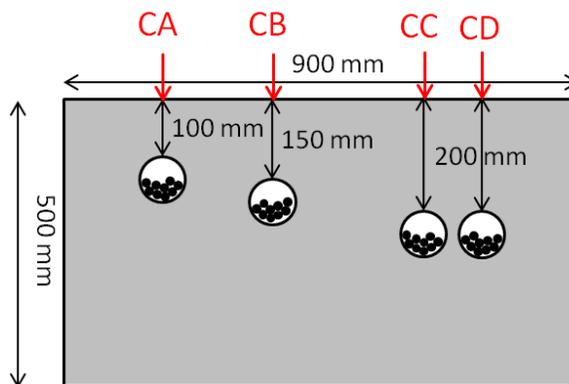


Figure 6.16- Positionnement des mesures effectuées sur le bloc C

Aucune mesure sur l'épaisseur n'a été pratiquée sur cet échantillon (les mesures d'épaisseurs sur les blocs A et B donnant des résultats convenables). Les valeurs des fréquences théoriques image de l'épaisseur sont rappelées au tableau 6.30. Étant donné les dimensions de la section, il n'y a que deux fréquences caractéristiques.

Tableau 6.30- Valeurs théoriques des fréquences image de l'épaisseur du bloc C

| f_1 (kHz) | f_2 (kHz) |
|-------------|-------------|
| 3,6 | 7,3 |

6.2.4.1. Mesures suivant CA

Les essais pratiqués sur CA ont été effectués depuis la surface du dessus de la gaine. Les valeurs des fréquences caractéristiques de l'épaisseur de la pièce (en tenant compte du décalage de 5 %) et de la gaine sont indiqués au tableau 6.31 et au tableau 6.32 respectivement.

Tableau 6.31- Valeurs théoriques des fréquences image de l'épaisseur du bloc C en prenant compte du décalage Δf_1 du à la gaine A estimé à 5 %

| f_1^* (kHz) | f_2^* (kHz) |
|---------------|---------------|
| 3,5 | 6,9 |

Tableau 6.32- Identification des valeurs théoriques attendues pour les fréquences caractéristiques de vide en haut de gaine (profondeur p_g) et des barres d'acier dans la gaine (profondeur p) depuis la surface étudiée pour la gaine A

| p_g (mm) | f_{vide} (kHz) | p (mm) | f_{acier} (kHz) |
|------------|------------------|----------|-------------------|
| 100 | 18,2 | 142 | 6,7 |

En raison de la valeur des fréquences recherchées, les paramètres d'utilisation de l'appareillage IE ainsi que le choix de la bille ont été modifiés en comparaison des autres essais sur les gaines. Ainsi, une bille plus petite a été choisie afin de s'assurer de faire ressortir les fréquences jusqu'à 20 kHz au moins. De plus, une résolution plus faible en fréquence a été choisie afin d'augmenter l'amplitude des pics dans les fréquences montantes. Les réglages sont indiqués au tableau 6.33. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 6.17 et les fréquences des pics obtenus sont inscrites au tableau 6.34.

Tableau 6.33- Réglages utilisés pour les mesures au-dessus de la gaine A (figure 6.17)

| Mesure | 5E5TPB4 |
|------------------|---------|
| f_{max} (kHz) | 49 |
| Résolution (kHz) | 0,33 |

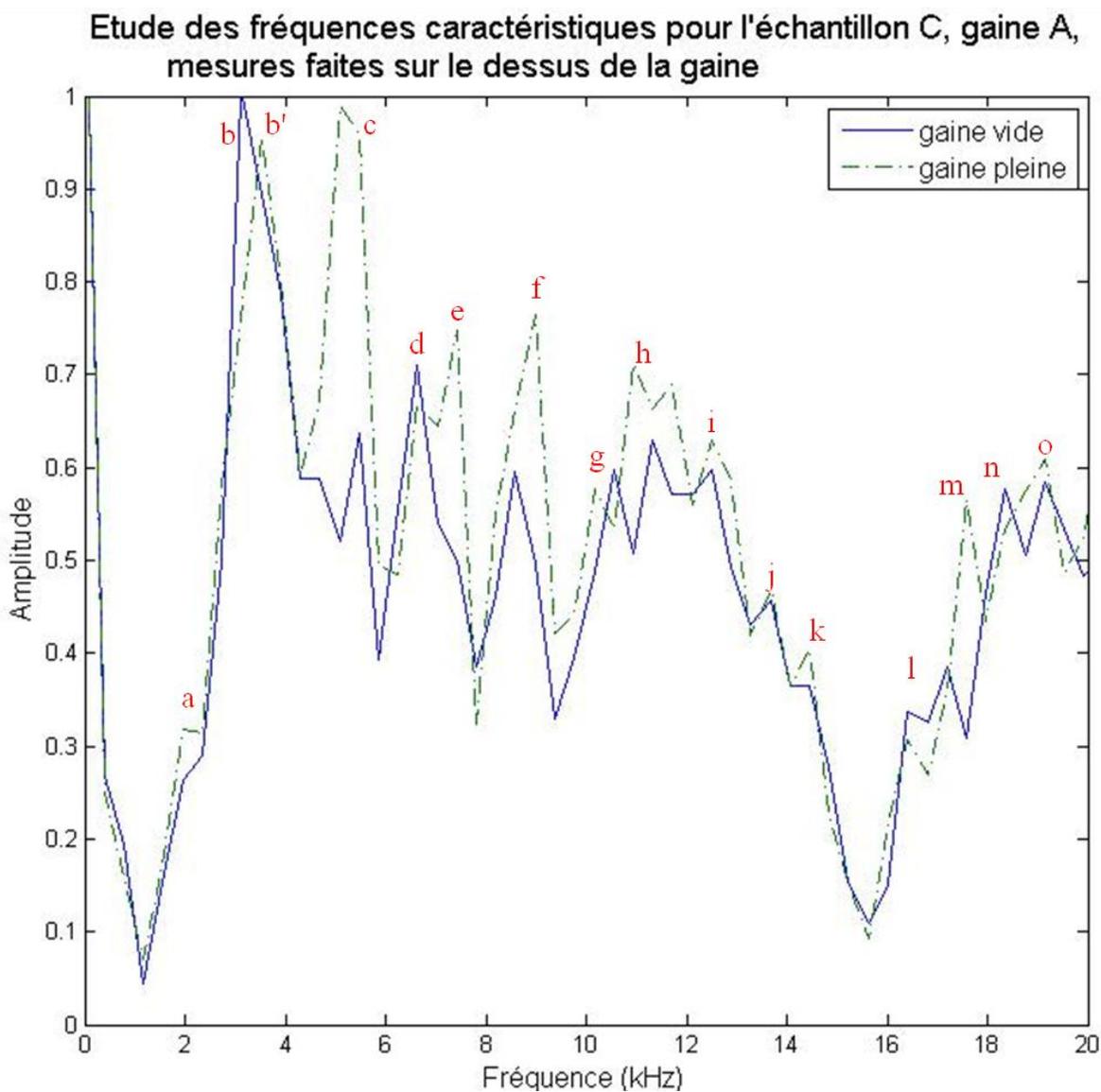


Figure 6.17- Mesure effectuée sur le bloc C au-dessus de la gaine A à 15 cm (gaine vide) et 145 cm (gaine pleine)

Tableau 6.34- Valeur des pics de fréquence identifiés sur la figure 6.12

| | | | | | | | |
|-------------|----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-------------|
| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>b'</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> |
| 2,0 | 3,1 | 3,5 | 5,1 – 5,5 | 6,7 | 7,4 | 9,0 | 10,2 – 10,6 |
| <i>h</i> | <i>i</i> | <i>j</i> | <i>k</i> | <i>l</i> | <i>m</i> | <i>n</i> | <i>o</i> |
| 10,9 – 11,7 | 12,5 | 13,7 | 14,5 | 16,4 | 17,6 | 18,4 | 19,1 |

De nombreux pics sont obtenus en raison des effets de bords et de la présence d'autres gaines.

Un fort décalage est visible entre les pics *b* et *b'*. Le pic *b* représente f_1^* pour la gaine vide et le pic *b'* représente f_1 ou f_1^* pour la gaine pleine. La différence entre les deux valeurs n'étant que de 0,1 kHz et la résolution en fréquence étant de plus de 0,3 kHz, il n'est pas possible de faire la différence entre les deux. Toutefois, la dissociation entre les pics *b* et *b'* est importante. De plus, le pic *d* qui apparaît sur les deux mesures représente la valeur de f_2^* . Le pic *b'* est donc identifié comme la fréquence f_1^* pour la mesure au-dessus de la gaine pleine.

En raison de la proximité des fréquences f_2^* et f_{acier} , il n'est pas possible de distinguer une différence entre les deux fréquences. Par contre, le pic *c*, de valeur plus faible que f_{acier} , possède une amplitude très importante dans le cas de la mesure au-dessus de la gaine pleine. Quant à la fréquence f_{vide} , celle-ci est présente au pic *n* mais pour les deux mesures.

Même si les pics de fréquences sont en grand nombre pour les deux mesures et sont présents lors des deux mesures, la valeur du pic f_1^* peut être différente suivant le remplissage de la gaine. Aussi, il a été vu que le pic *c* possède une très forte amplitude dans le cas de la gaine remplie de coulis. Il y a donc des traits caractéristiques d'une gaine pleine comparé à une gaine vide de coulis dans le cas de la gaine CA.

6.2.4.2. Mesures suivant CB

Les essais pratiqués sur CB ont été effectués depuis la surface du dessus de la gaine. Les valeurs des fréquences caractéristiques de l'épaisseur de la pièce (en tenant compte du décalage de 7 %) et de la gaine sont indiqués au tableau 6.35 et au tableau 6.36 respectivement.

Tableau 6.35- Valeurs théoriques des fréquences image de l'épaisseur du bloc C en prenant compte du décalage Δf_1 du à la gaine A estimé à 7 %

| f_1^* (kHz) | f_2^* (kHz) |
|---------------|---------------|
| 3,4 | 6,8 |

Tableau 6.36- Identification des valeurs théoriques attendues pour les fréquences caractéristiques de vide en haut de gaine (profondeur p_g) et des barres d'acier dans la gaine (profondeur p) depuis la surface étudiée pour la gaine B

| p_g (mm) | f_{vide} (kHz) | p (mm) | f_{acier} (kHz) |
|------------|------------------|----------|-------------------|
| 150 | 12,2 | 192 | 4,9 |

Les fréquences recherchées lors des mesures au-dessus de la gaine CB étant plus faible que pour la gaine CA, les mêmes paramètres de mesure et la même bille ont été utilisés que dans le cas des mesures au-dessus des gaines pour les blocs A et B. Ils sont rappelés au tableau 6.37.

Tableau 6.37- Réglages utilisés pour les mesures au-dessus de la gaine B (figure 6.18), de la gaine C (figure 6.19) et de la gaine D (figure 6.20)

| | |
|------------------|--------|
| Mesure | 2E5TB3 |
| f_{max} (kHz) | 27 |
| Résolution (kHz) | 0,1 |

Les résultats obtenus pour les deux mesures sont affichés à la figure 6.18 et les valeurs des fréquences des pics identifiés sur la figure ont été reportées au tableau 6.38.

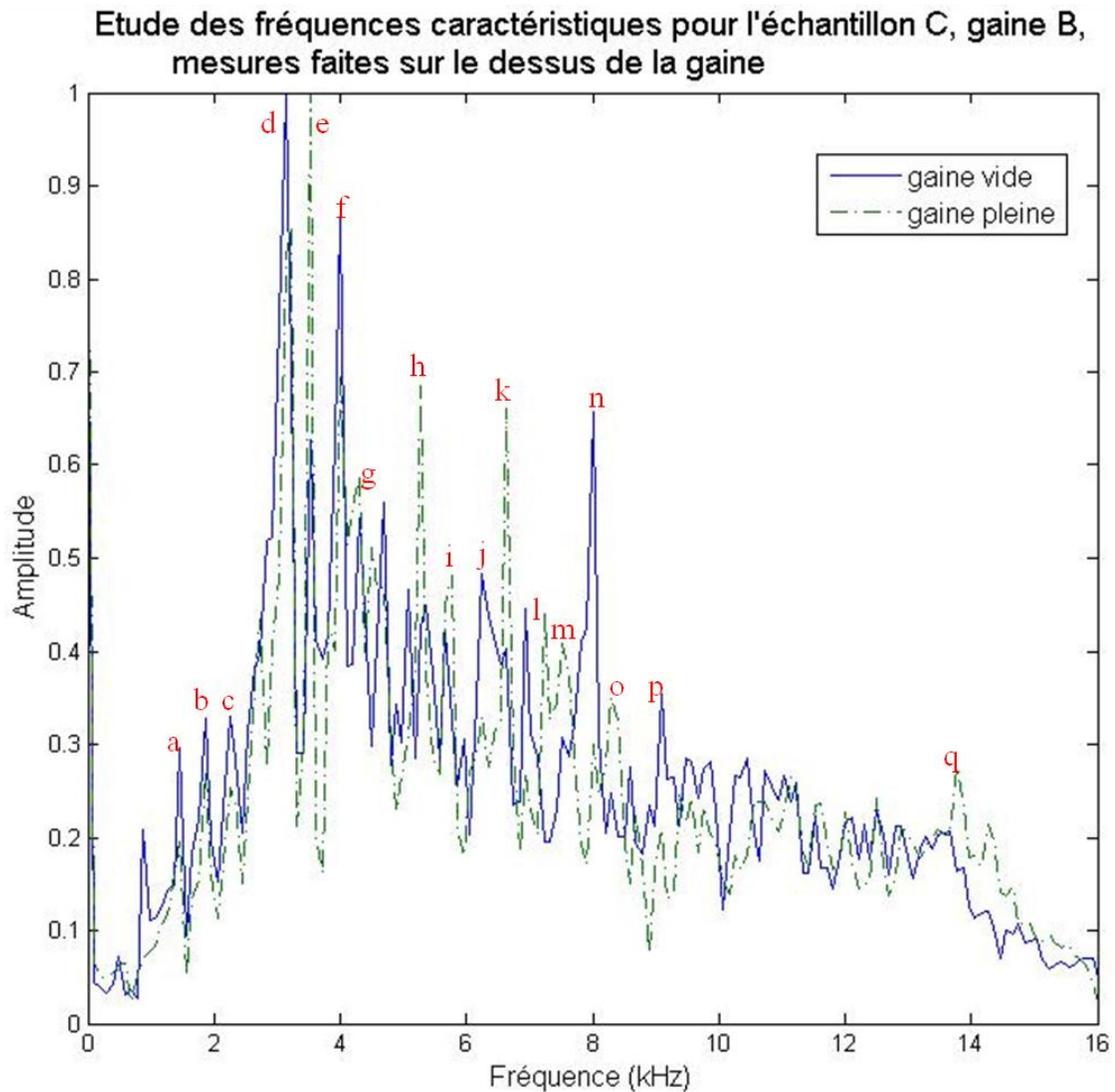


Figure 6.18- Mesure effectuée sur le bloc C au-dessus de la gaine B à 15 cm (gaine vide) et 145 cm (gaine pleine)

Tableau 6.38- Valeur des pics de fréquence identifiés sur la figure 6.18

| | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> | <i>h</i> | <i>i</i> |
| 1,5 | 1,9 | 2,3 | 3,1 | 3,5 | 4,0 | 4,3 – 4,7 | 5,3 | 5,8 |
| <i>j</i> | <i>k</i> | <i>l</i> | <i>m</i> | <i>n</i> | <i>o</i> | <i>p</i> | <i>q</i> | |
| 6,3 | 6,6 | 6,9 | 7,2 – 7,5 | 8,0 | 8,3 | 9,1 | 13,8 | |

Suivant les résultats obtenus, six pics de fréquences sont présent en importance dans les résultats : *d*, *e*, *f*, *h*, *k* et *n*. Le pic *k* représente la fréquence f_2^* et, comme dans le cas de la

gaine CA, deux pics sont présent pour f_1^* : les pics d et e . Le pic d est présent dans les deux cas de mesures. Le pic e est prédominant dans le cas de la mesures au-dessus de la gaine pleine (tout comme dans le cas de f_2^*).

Les pics images de la gaine ne sont pas présents aux valeurs des fréquences théoriques. Or, le pic h est prépondérant dans le cas de la gaine pleine. Ce pic se trouve à la valeur de $5,3 \text{ kHz}$, c'est-à-dire à la même fréquence que le pic c de la figure 6.17. Ce pic n'est donc pas en rapport avec la profondeur de la gaine mais il est caractéristique de la géométrie de la pièce et du remplissage de la gaine.

Tout comme le pic h est présent pour la mesure au-dessus de la gaine pleine, le pic n est prépondérant pour la mesure au-dessus de la gaine vide. Ce pic ne représente pas l'écho du vide au niveau du haut de la gaine mais est fonction de la géométrie de la pièce et du type de remplissage de la gaine.

Quant au pic f , il est présent sur les deux mesures et de même amplitude. Ce pic n'est pas caractéristique de la profondeur de la pièce mais est fonction de la géométrie de la pièce et des effets de bords.

Ainsi, même si les fréquences caractéristiques du type de remplissage de la gaine ne sont pas présentes dans les résultats obtenus, des fréquences distinctives entre gaine vide et gaine pleine apparaissent. Cela n'apparaissait pas sur le bloc B. Ainsi, ces fréquences apparaissent dans des cas où la profondeur de la gaine reste faible.

6.2.4.3. Mesures suivant CC et CD

Les mesures suivant CC et CD ont été pratiquées dans le but d'observer l'impact de la proximité de deux gaines l'une par rapport à l'autre, mais aussi les effets de bord (la gaine CD se trouvant à 120 mm du bord). La profondeur des gaines étant identique à la profondeur de la gaine dans l'échantillon B, les résultats seront comparés à ceux obtenus lors des mesures suivant BH.

Les fréquences attendues pour les deux zones de mesure sont présentées aux tableaux 6.39 et 6.40.

Tableau 6.39- Valeurs théoriques des fréquences image de l'épaisseur du bloc C en prenant compte du décalage Δf_1 du à la gaine A estimé à 10 %

| f_1^* (kHz) | f_2^* (kHz) |
|---------------|---------------|
| 3,3 | 6,6 |

Tableau 6.40- Identification des valeurs théoriques attendues pour les fréquences caractéristiques de vide en haut de gaine (profondeur p_g) et des barres d'acier dans la gaine (profondeur p) depuis la surface étudiée pour les gaines C et D

| p_g (mm) | f_{vide} (kHz) | p (mm) | f_{acier} (kHz) |
|------------|------------------|----------|-------------------|
| 200 | 9,1 | 242 | 3,9 |

La figure 6.19 donne les résultats obtenus pour la gaine C et la figure 6.20 donne les résultats de la gaine D. Les fréquences des pics relevés sont inscrites aux tableaux 6.41 et 6.42 respectivement pour les mesures CC et CD. Les valeurs inscrites en gras sont les pics de fréquence apparaissant sur les deux graphiques.

Ainsi, les deux graphiques ont de nombreuses fréquences en commun. Par contre, les amplitudes mesurées sont de grandeurs différentes. En effet, la proximité du bord de la pièce pour la gaine CD influence les résultats. La présence d'une limite physique aux ondes tend à augmenter l'influence du vide dans la gaine. A l'inverse, la gaine CC, la plus éloignée du bord de la pièce, obtient des fréquences de plus grande amplitude pour la gaine remplie de coulis.

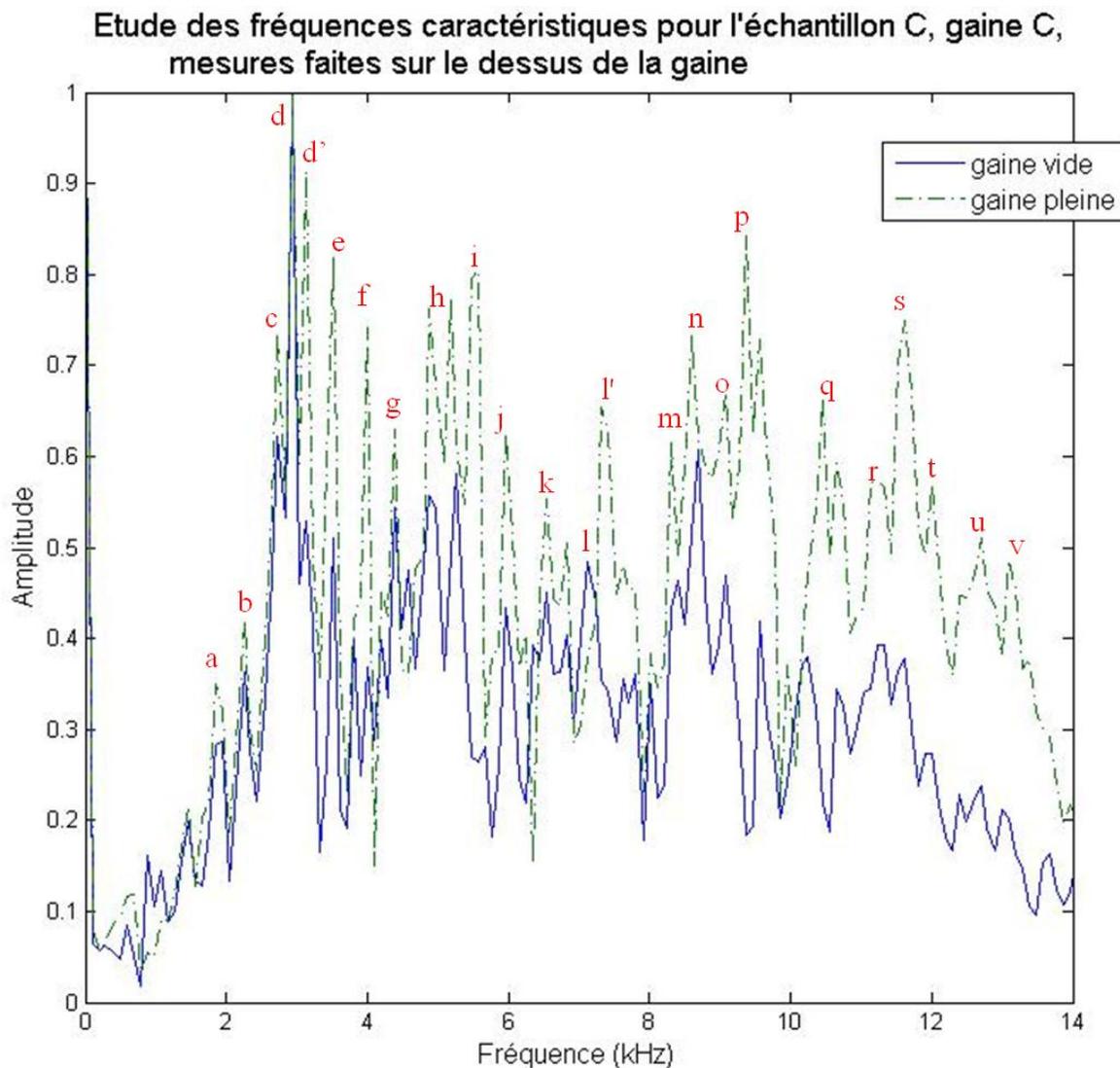


Figure 6.19- Mesure effectuée sur le bloc C au-dessus de la gaine C à 15 cm (gaine vide) et 145 cm (gaine pleine)

Tableau 6.41- Valeur des pics de fréquence identifiés sur la figure 6.19

| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>d'</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> | <i>h</i> | <i>i</i> | <i>j</i> | <i>k</i> |
|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|-------------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| 1,9 | 2,3 | 2,7 | 2,9 | 3,1 | 3,5 | 4,0 | 4,4 | 4,9 – 5,2 | 5,6 | 6,0 | 6,5 |
| <i>l</i> | <i>l'</i> | <i>m</i> | <i>n</i> | <i>o</i> | <i>p</i> | <i>q</i> | <i>r</i> | <i>s</i> | <i>t</i> | <i>u</i> | <i>v</i> |
| 7,1 | 7,3 | 8,3 | 8,6 | 9,1 | 9,4 | 10,5 – 10,6 | 11,1 | 11,6 | 12,0 | 12,7 | 13,1 |

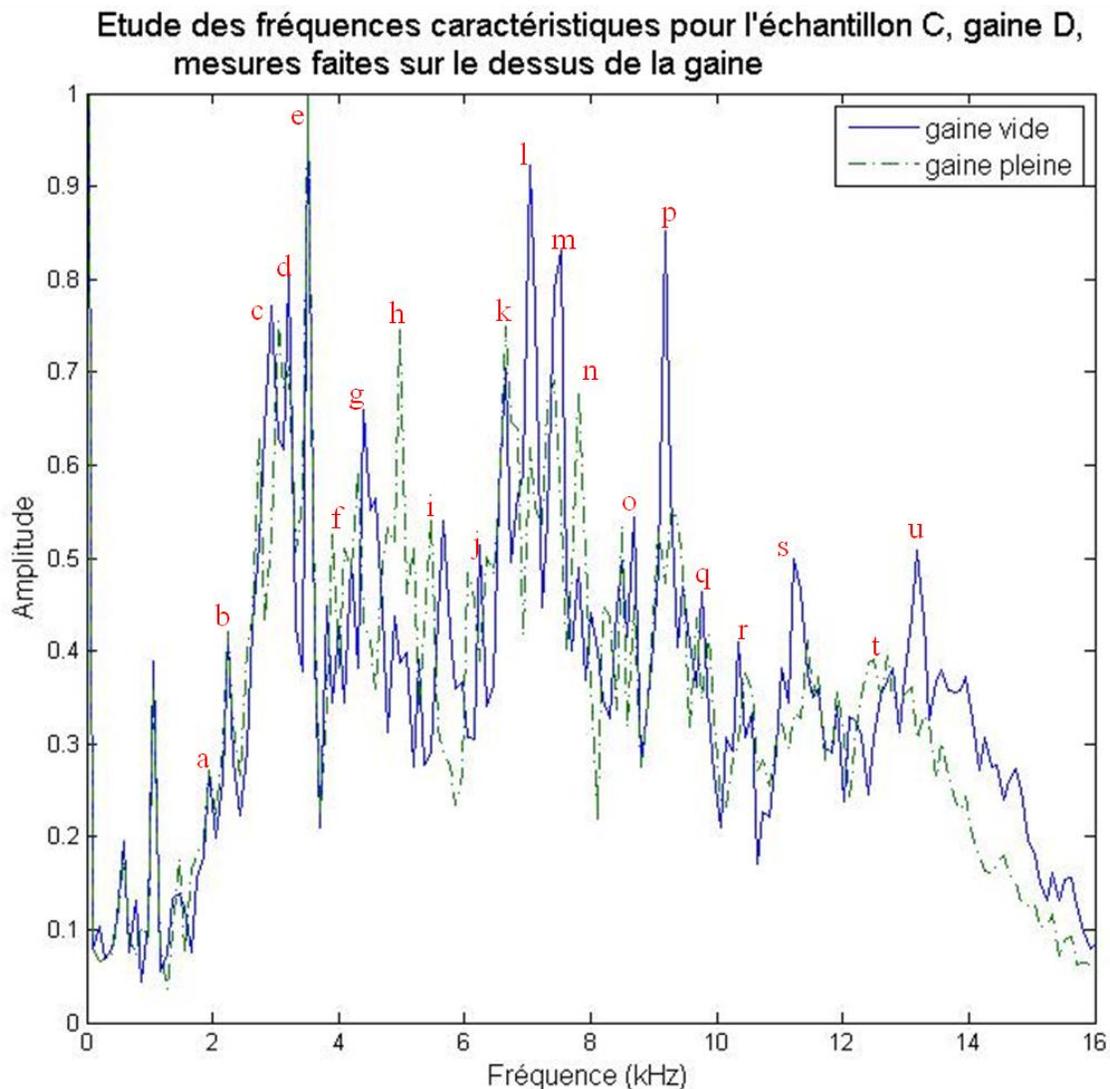


Figure 6.20- Mesure effectuée sur le bloc C au-dessus de la gaine D à 15 cm (gaine vide) et 145 cm (gaine pleine)

Tableau 6.42- Valeur des pics de fréquence identifiés sur la figure 6.20

| | | | | | | | | | | |
|------------|------------|------------|------------------|------------|------------------|-------------|-------------|------------------|-------------|------------|
| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> | <i>h</i> | <i>i</i> | <i>j</i> | <i>k</i> |
| 1,9 | 2,3 | 2,9 | 3,2 | 3,5 | 3,9 – 4,0 | 4,4 | 5,0 | 5,5 – 5,8 | 6,3 | 6,6 |
| <i>l</i> | <i>m</i> | <i>n</i> | <i>o</i> | <i>p</i> | <i>q</i> | <i>r</i> | <i>s</i> | <i>t</i> | <i>u</i> | |
| 7,0 | 7,5 | 7,8 | 8,5 – 8,7 | 9,2 | 9,8 | 10,4 | 11,2 | 12,5 | 13,2 | |

L'ensemble des fréquences théoriques attendues ont été relevées sur les deux mesures. Mais les effets de bords ainsi que la proximité des deux gaines multiplie le nombre de

fréquences présentes sur les graphiques. Comparé aux résultats obtenus suivant BH, seule la fréquence f_1^* est aisément identifiable. Les autres fréquences sont identifiées grâce à leur valeur théorique calculée.

Mis à part les grandes différences d'amplitude des fréquences entre les résultats obtenues pour la gaine vide et la gaine pleine, les pics obtenus ne permettent pas de confirmer la présence de vide de coulis dans la gaine.

Ainsi, ces comparaisons en deux points de remplissage extrême des gaines (gaine vide et gaine pleine de coulis) ont permis de faire plusieurs constats. En premier lieu, la disposition générale des éléments présents dans le béton influence fortement les résultats. En second, plus l'échantillon étudié a des dimensions importantes, plus le nombre de fréquences obtenu est important. Ce phénomène est encore amplifié lorsqu'une mesure IE est effectuée au niveau d'une gaine. De ce fait, la détection de pics de fréquence images du type de remplissage de la gaine devient difficile. Toutefois, moins la gaine est profonde, plus la réponse en fréquence de la géométrie de la pièce semble être influencée par le type de remplissage de la gaine.

6.2.5. Mesures le long des gaines

Afin de vérifier les observations faites sur les résultats précédents pour les blocs, une mesure IE a été pratiquée le long de chaque gaine pour tous les blocs. Les mesures suivantes ont donc été effectuées : suivant BH, BV, BB, AH, AV, CA, CB, CC et CD. Les réglages utilisés pour les mesures sont les mêmes que ceux utilisés dans les essais précédents sur les blocs.

Un grand nombre de résultats a ainsi été créé. Afin d'être concis, seuls les plus représentatifs sont présentés dans cette section. Tous les résultats obtenus sont présentés à l'annexe J.

Chaque essais IE pratiqué le long des gaines a été effectué tous les 5 *cm*. Afin d'éliminer au maximum l'influence des effets de bords ou des effets induits par les crochets de

portage, l'impact de la bille a toujours été effectué le plus loin de l'extrémité du bloc ou le plus loin du crochet.

Le nombre de point de mesure étant très important par gaine, il n'était pas possible de traiter les résultats obtenus sur les mêmes graphiques que ceux utilisés jusqu'ici. A titre d'exemple, la figure 6.21 montre les résultats obtenus pour une gaine sur un graphique 2D.

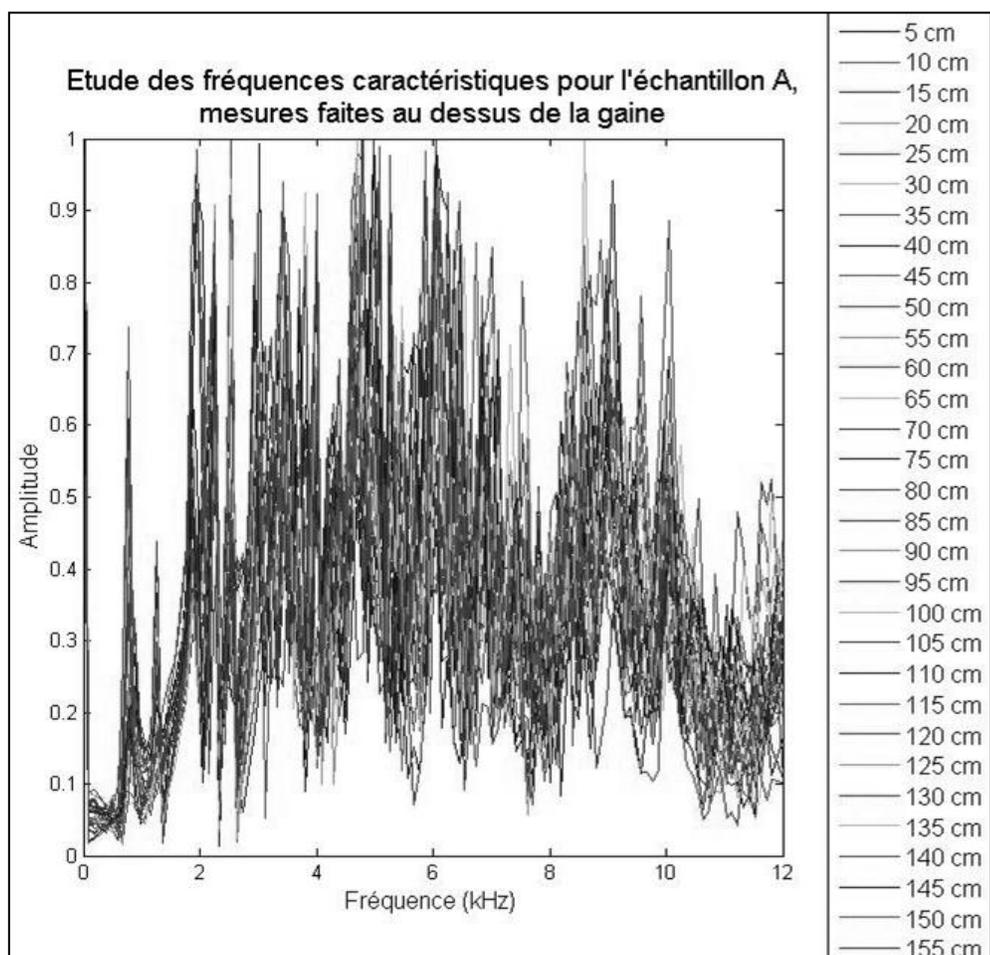


Figure 6.21- Résultats IE obtenus le long d'une gaine regroupés sur un graphique 2D

De ce fait, les résultats ont été traité en trois dimensions afin d'ajouter un axe correspondant à la cote du point de mesure. Ainsi, il a été possible de regrouper sur un graphique les données relatives à la position de la mesure, la fréquence excitée et l'amplitude des pics (Figure 6.22). De toute évidence, l'interprétation des résultats sous cette forme n'est pas

aisée. De ce fait, un gradient de couleur a été utilisé pour identifier les amplitudes des pics : le noir correspondant à une amplitude nulle et le blanc correspondant à une amplitude supérieure à 0,9 (afin de faire ressortir les amplitudes comprises entre 0,6 et 0,9 en gris clair).

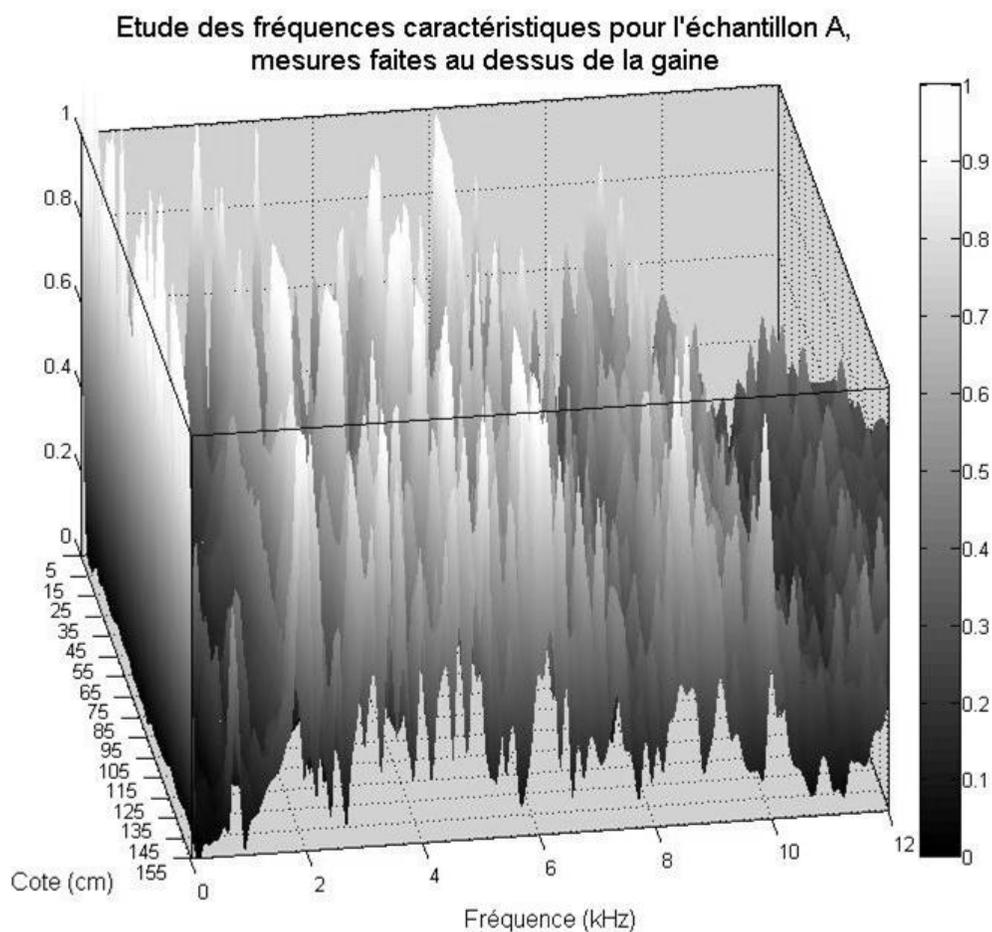


Figure 6.22- Résultats IE obtenus le long d'une gaine regroupés sur un graphique 3D

Afin de faciliter l'interprétation du graphique 3D, ce dernier a été « mis à plat » de façon à ne donner comme information que la position de la mesure et les pics de fréquence obtenus (les pics apparaissant en blanc ou gris clair). Les résultats obtenus sont présentés sous la forme de la figure 6.23.

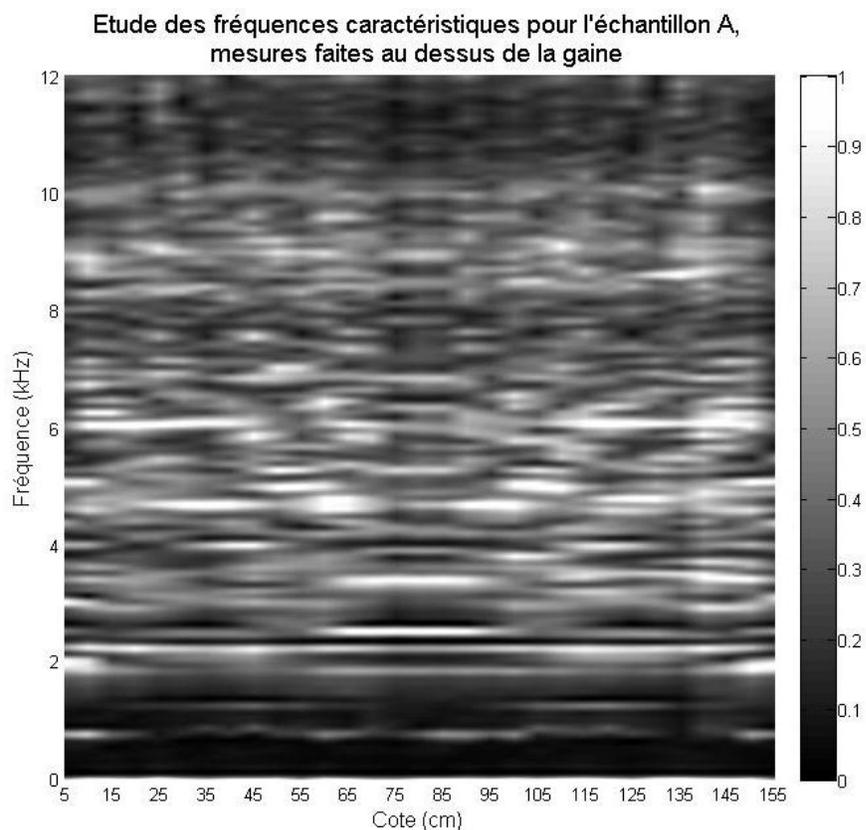


Figure 6.23- Résultats IE obtenus le long d'une gaine regroupés sur un graphique 3D « mis à plat »

6.2.5.1. Résultats portant sur l'échantillon B

Aux deux points de mesures étudiés à la section 6.2.2, aucune différence particulière due au type de remplissage de la gaine n'a été notée. Ainsi, il été important de vérifier si les résultats obtenus en 2 points de mesures sur le bloc B représentait un résultat général pour l'ensemble du bloc.

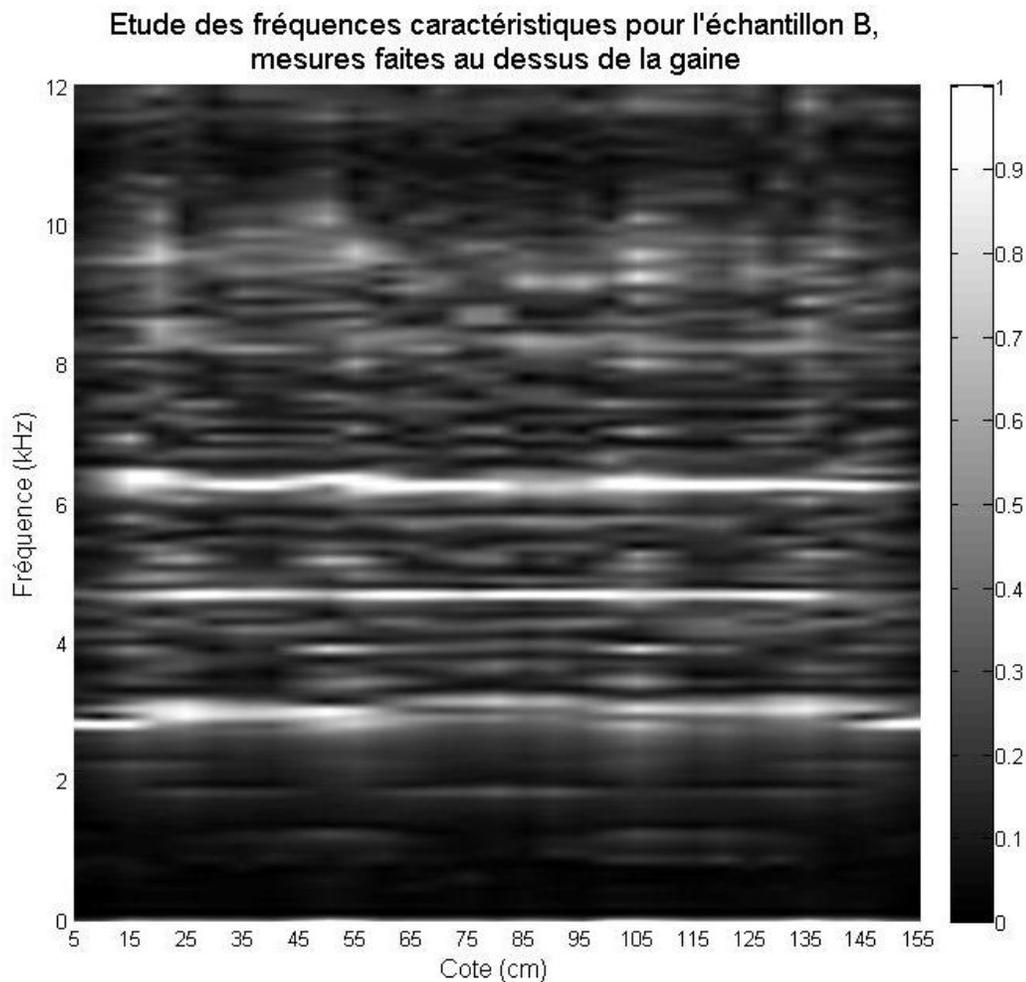


Figure 6.24- Résultats obtenus le long de la gaine suivant la mesure BH

La figure 6.24 montre les résultats obtenus pour une mesure tous les 5 *cm* le long de la gaine suivant BH. Ces résultats sont fortement réguliers sur l'ensemble du bloc. Autour des cotes 50 à 60 et 105 à 115, les pics de fréquence ont un léger décalage. Ce décalage existe en raison de la présence des crochets sur le bloc à ce niveau.

Les résultats obtenus suivant BV et BB donnent des graphiques de même comportement. La figure 6.25 montre les résultats obtenus pour la mesure suivant BB. Mise à part une légère atténuation de l'amplitude de certains pics, le graphique est identique au précédent.

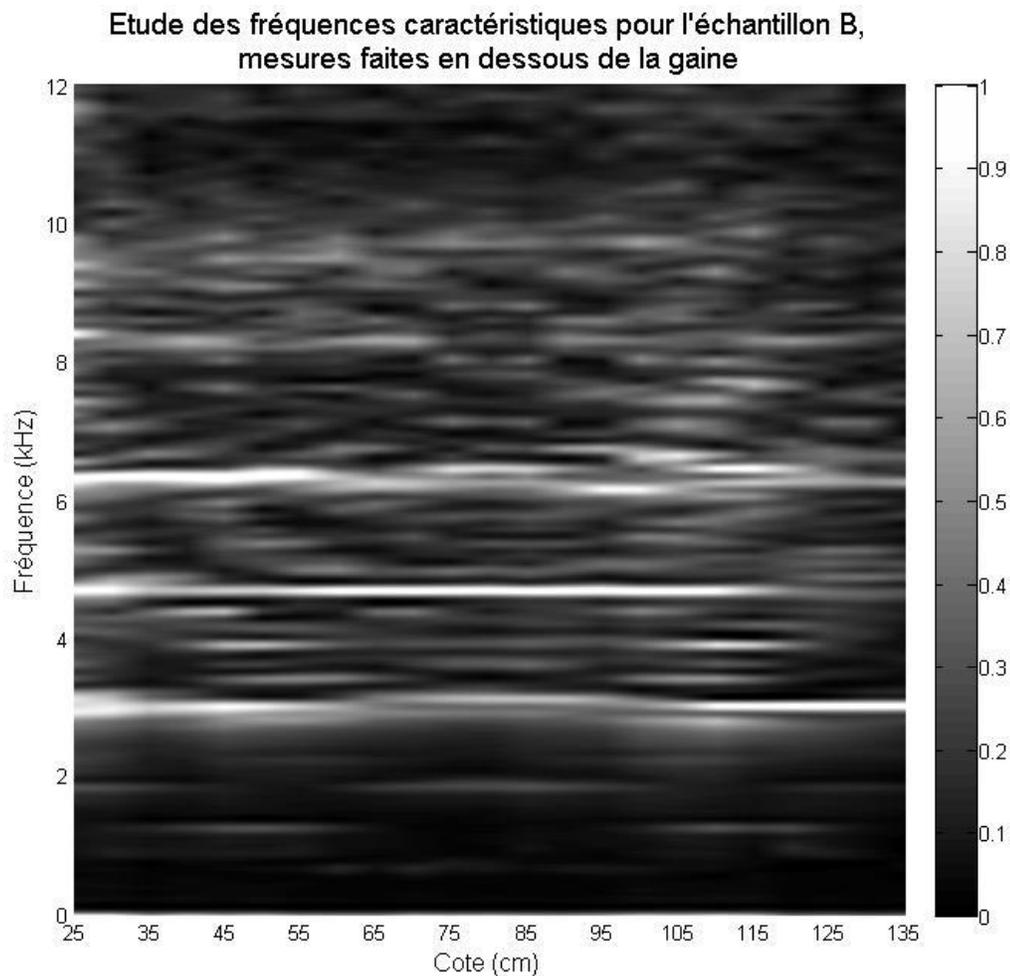


Figure 6.25- Résultats obtenus le long de la gaine suivant la mesure BB

Ainsi, les mesures IE sur le bloc B n'ont pas été fonction du type de remplissage de la gaine.

6.2.5.2. Différences d'amplitude des pics de fréquences entre les deux états extrêmes de la gaine

En ce qui concerne les mesures suivant AH, AV, CC et CD, des différences fortes d'amplitude entre les deux points de mesures étudiés permettaient une possible distinction entre une gaine vide et une gaine remplie de coulis.

Les résultats provenant des mesures IE suivant AH, AV, CC et CD donnent les mêmes comportements. En exemple, la figure 6.26 montre les résultats obtenus pour les mesures effectuées suivant CC.

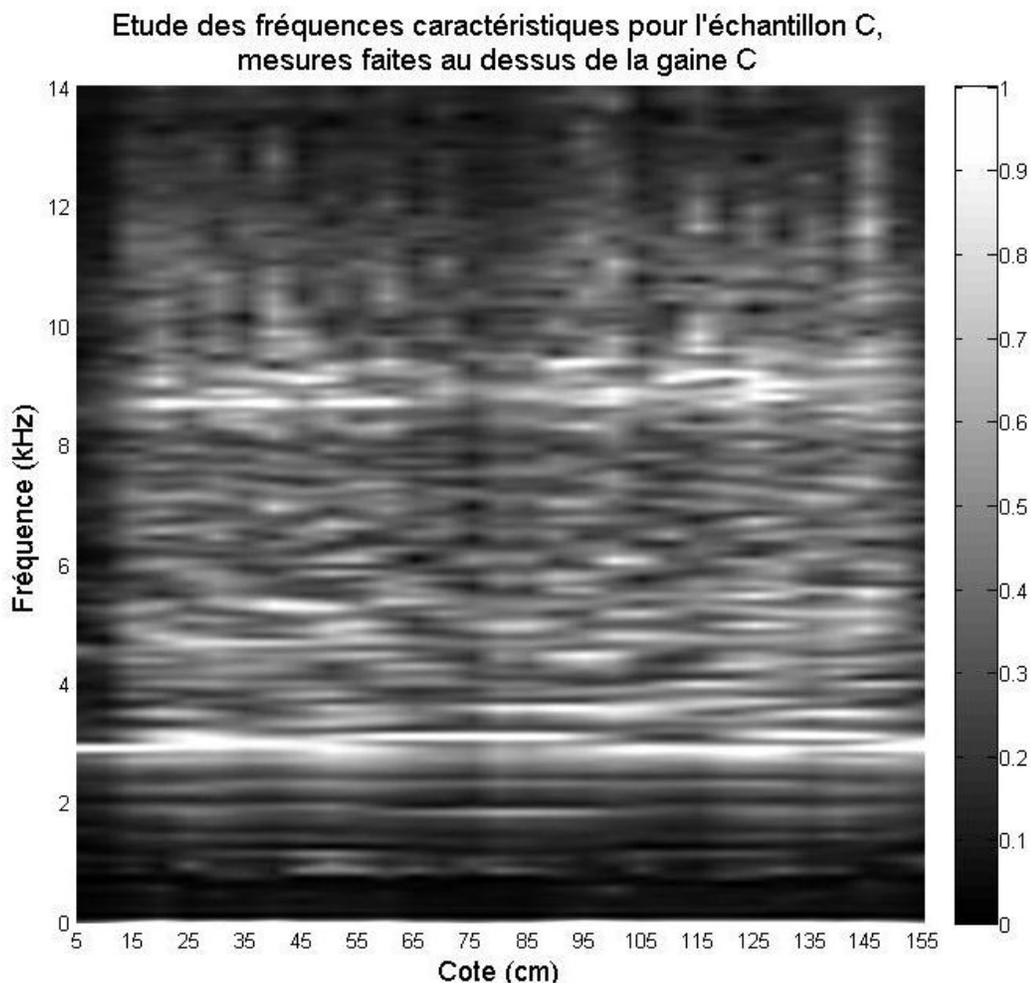


Figure 6.26- Résultats obtenus le long de la gaine suivant la mesure CC

Les résultats obtenus des mesures IE suivant CC sont très homogènes. Ainsi les fréquences excitées avec une haute amplitude à la cote 145 cm ne se différencient pas des autres points de mesures.

Une fois de plus, il n'y a pas de différence notable et détectable par mesure IE suivant le type de remplissage de la gaine.

6.2.5.3. Influence de la profondeur de la gaine étudiée

En ce qui concerne les études faites suivant CA et CB, des pics de fréquences sortant des valeurs théoriques attendues mais n'apparaissant que dans le cas d'une gaine vide de coulis ou dans le cas inverse, toujours avec une forte amplitude, ont été relevés.

Ainsi, les résultats obtenus le long des gaines suivant CA et CB sont présentés aux figures 6.27 et 6.28.

Lors de l'étude de la gaine CA, à la sous-section 6.2.4.1, le pic de fréquence c autour de $5,3 \text{ kHz}$ avait été mis en avant en raison de sa haute amplitude et de son existence dans le cas de la gaine pleine uniquement. Hors, les résultats obtenus sur la figure 6.27 montrent la présence de cette fréquence des cotes 115 cm à 155 cm . Or les barres d'acier présentes dans la gaine sont complètement noyées jusqu'à la cote estimée de 100 cm environ. Ainsi, cette fréquence est caractéristique d'une gaine pour laquelle le coulis recouvre entièrement l'acier à l'intérieur de celle-ci.

Lors de l'étude de la gaine CB, à la sous-section 0, le pic de fréquence n à $8,0 \text{ kHz}$ avait été mis en avant, comme pour le pic c de la gaine CA, mais cette fois-ci dans le cas de la gaine vide uniquement. La figure 6.28 montre que ce pic est fortement présent pour les cinquante premiers centimètres des mesures. Cette fréquence est donc caractéristique d'un vide de coulis complet ou important dans la gaine.

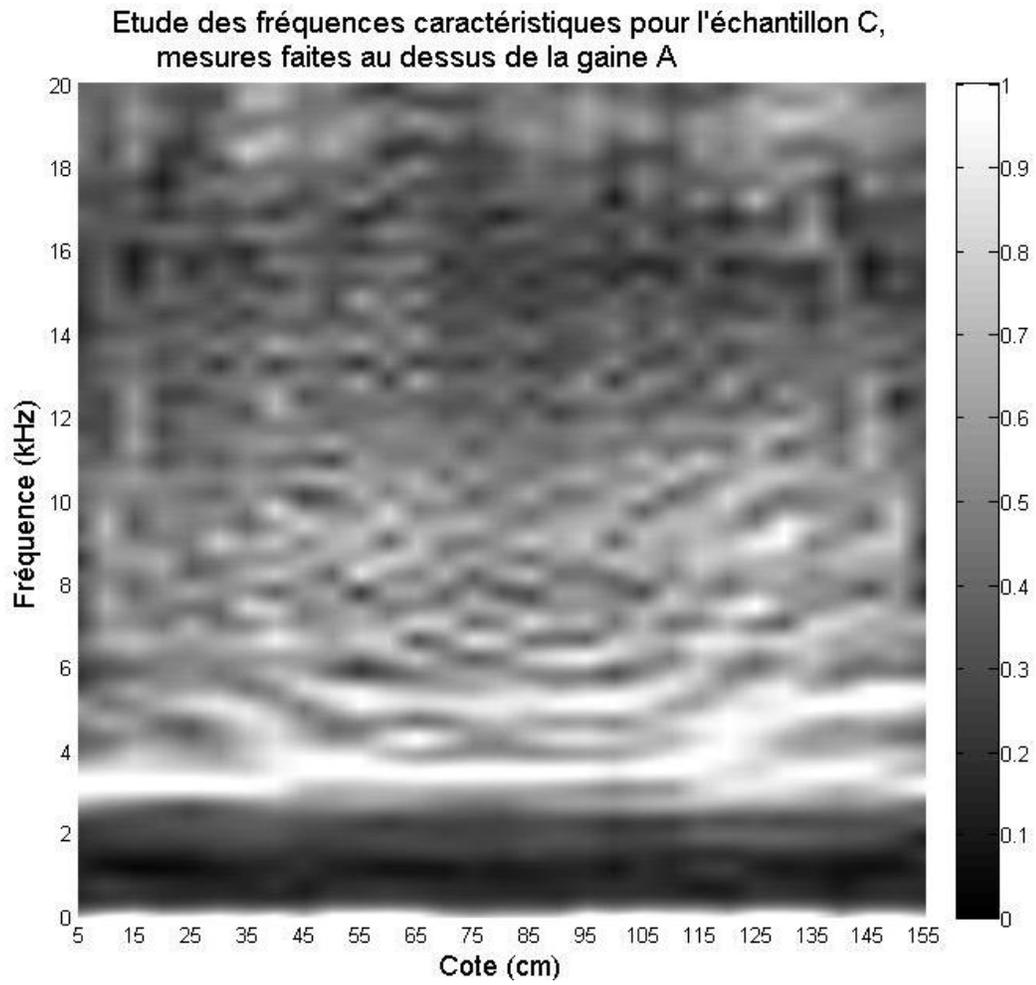


Figure 6.27- Résultats obtenus le long de la gaine suivant la mesure CA

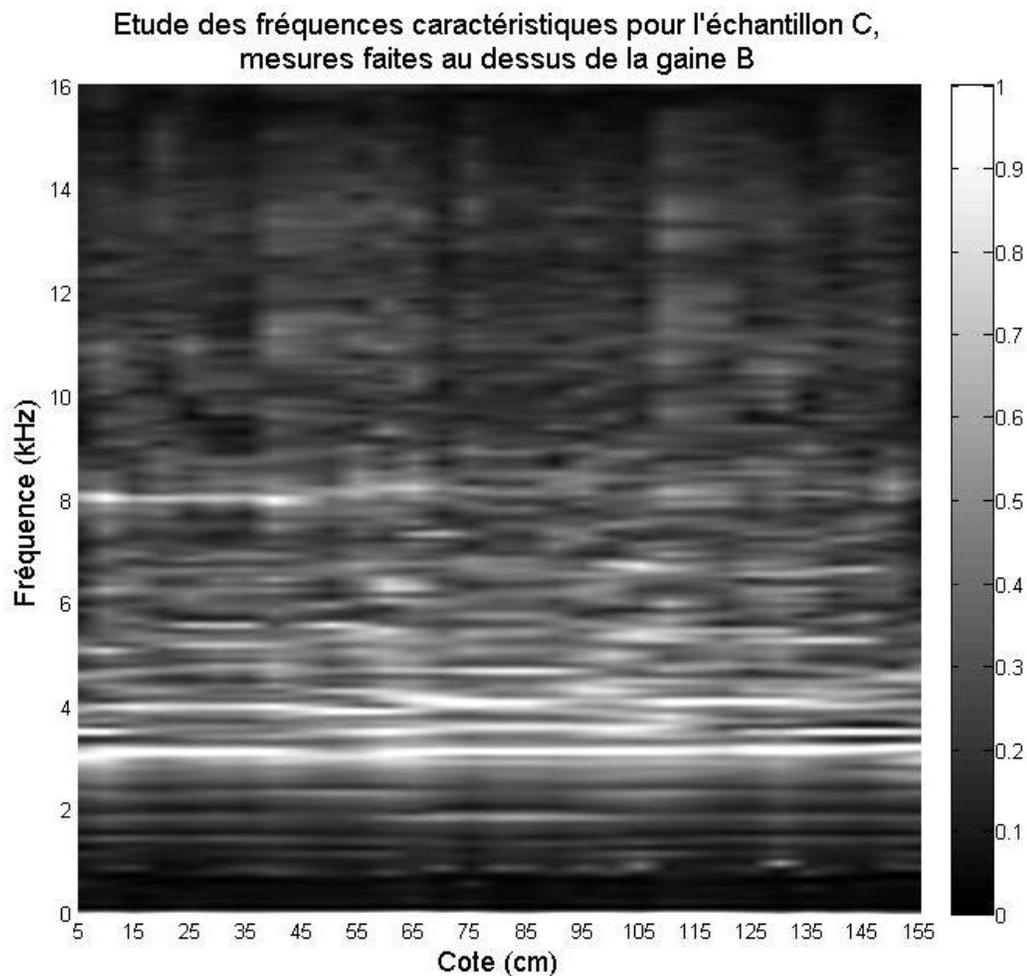


Figure 6.28- Résultats obtenus le long de la gaine suivant la mesure CB

Ces deux dernières figures prouvent qu'il est possible d'observer des variations de remplissage d'une gaine de précontrainte dans un élément massif en béton et ce, malgré la présence d'autres éléments.

Comparé aux autres gaines et blocs, la profondeur des gaines CA et CB était moins importante (100 mm et 150 mm comparé à 200 mm pour les autres gaines). Ainsi, la profondeur de la gaine est un facteur déterminant pour l'étude de la précontrainte par post-tension d'un élément massif par mesure IE.

6.2.6. Vérification du remplissage par endoscopie

Ci-après, figure 6.29, les photographies prises par endoscopie ont été regroupées. Chaque photo représente une zone précise du bloc, quantifiée par le pourcentage de remplissage de la gaine. La position du cliché a été estimée à l'aide de la longueur de câble optique inséré dans la gaine.

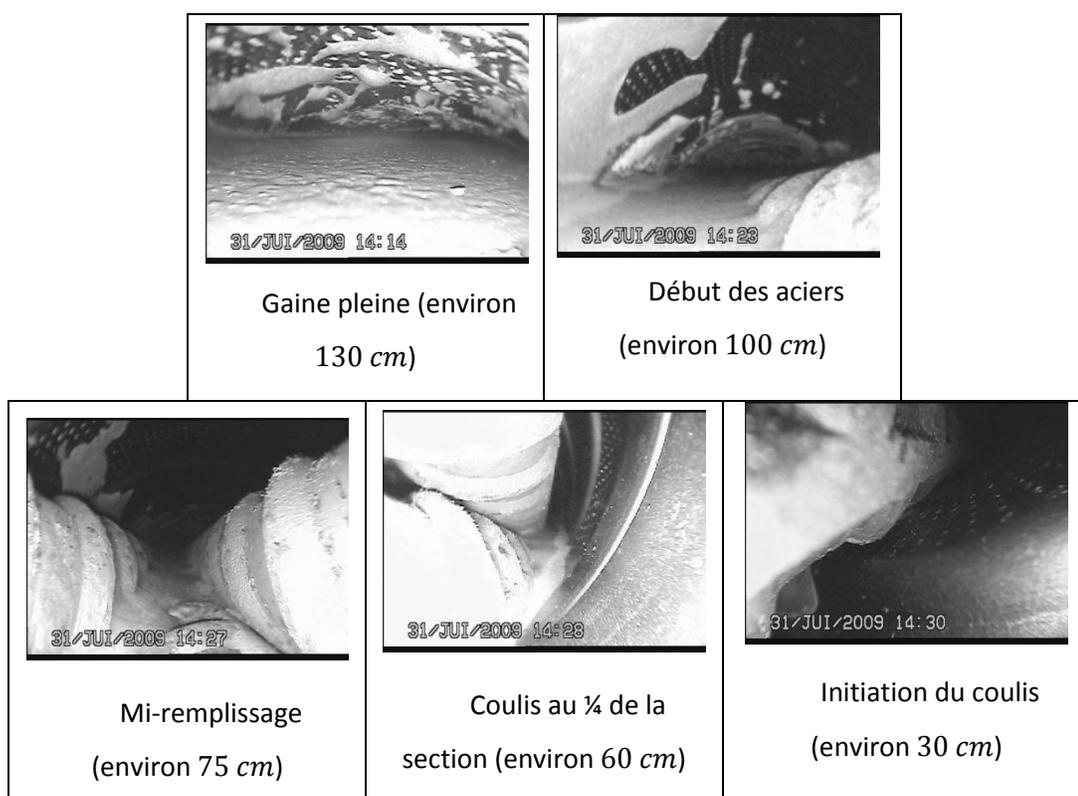


Figure 6.29- Photographies tirées de l'endoscopie de la gaine du bloc B

6.3. Segments de poutres (*in situ*)

Les segments de poutres ont été étudiés par IE et par endoscopie. Les mesures IE et les endoscopies ont été effectuées depuis la surface supérieure des segments pour les points hauts du profil des gaines de précontrainte et depuis la surface inférieure des segments pour les points bas des profils des gaines. En raison de l'effet semi-destructif de l'exploration par endoscopie, les essais IE ont été pratiqués en premier, suivis des endoscopies. Par la suite,

le sciage des segments de poutre a été effectué de manière à pouvoir récupérer une à deux gaines par segment. Aussi, plusieurs ancrages ont été sciés afin d'en observer la qualité de remplissage de coulis.

Chaque gaine étudiée a été auscultée à au moins 30 cm des bords sectionnés des segments de poutre afin de limiter l'influence des effets de bord. Comme pour les blocs, des mesures IE ont été effectuées tous les 5 cm le long des gaines quand l'état de la surface étudiée le permettait. Les endoscopies ont été effectuées à différents emplacements le long des gaines. Les mesures IE ont été effectuées le même jour pour l'ensemble des gaines d'un segment (mêmes conditions extérieures mise à part la variation de température variant au cours de la journée). Il en est de même pour les endoscopies.

Les réglages de l'appareillage IE ont été les mêmes pour l'ensemble des mesures : $N = 2048$ points et $\Delta T = 0,5 \mu s$ (résolution en fréquences inférieure à 1 kHz). Les billes utilisées ont été la bille PB3 ($f_{max} = 58$ kHz) pour les segments B2S4 B4S4 et B4S3, tandis que bille PB4 ($f_{max} = 49$ kHz) a été utilisée pour le segment B2S3 en raison du bris de la bille PB3. L'ensemble des poutres ayant le même rapport D/B, les valeurs de fréquences attendues sont calculées et inscrits au tableau 6.43.

Tableau 6.43- Facteurs multiplicatifs permettant de déterminer la valeur des harmoniques attendues pour les segments de poutre

| D/B | β de la fréquence caractéristique f_1 | f_2 | f_3 | f_4 | f_5 | f_6 |
|-------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1,45 | $\beta = 0,94$ | $1,55f_1$ | $2,03f_1$ | $2,13f_1$ | $2,55f_1$ | $2,66f_1$ |

Les résultats sont identifiés pour chaque segment de poutre par la lettre de la gaine étudiée ainsi que la côte (en centimètre) à laquelle l'auscultation est effectuée pour les endoscopies. En ce qui concerne les résultats IE, les résultats sont présentés sous forme de graphique 3D « mis à plat » comme pour les blocs à la sous section 6.2.5. Sur les graphiques des résultats IE, il est possible que les points de mesures aient été espacés de plus de 5 cm lorsque la qualité de la surface l'exigeait (surface abimée, reste de bitume,...).

6.3.1. Segment de poutre B4S4

Le segment de poutre B4S4 étant un point bas, il possède une surface d'étude plane ce qui a rendu les essais IE aisé (excepté pour l'extrémité abimée lors de la démolition). Par contre, les fissures présentes sur l'échantillon sont à proximité des gaines voir même au-dessus des gaines. En

particulier, la



figure 6.30 montre une fissure passant alternativement de part et d'autre d'une gaine.

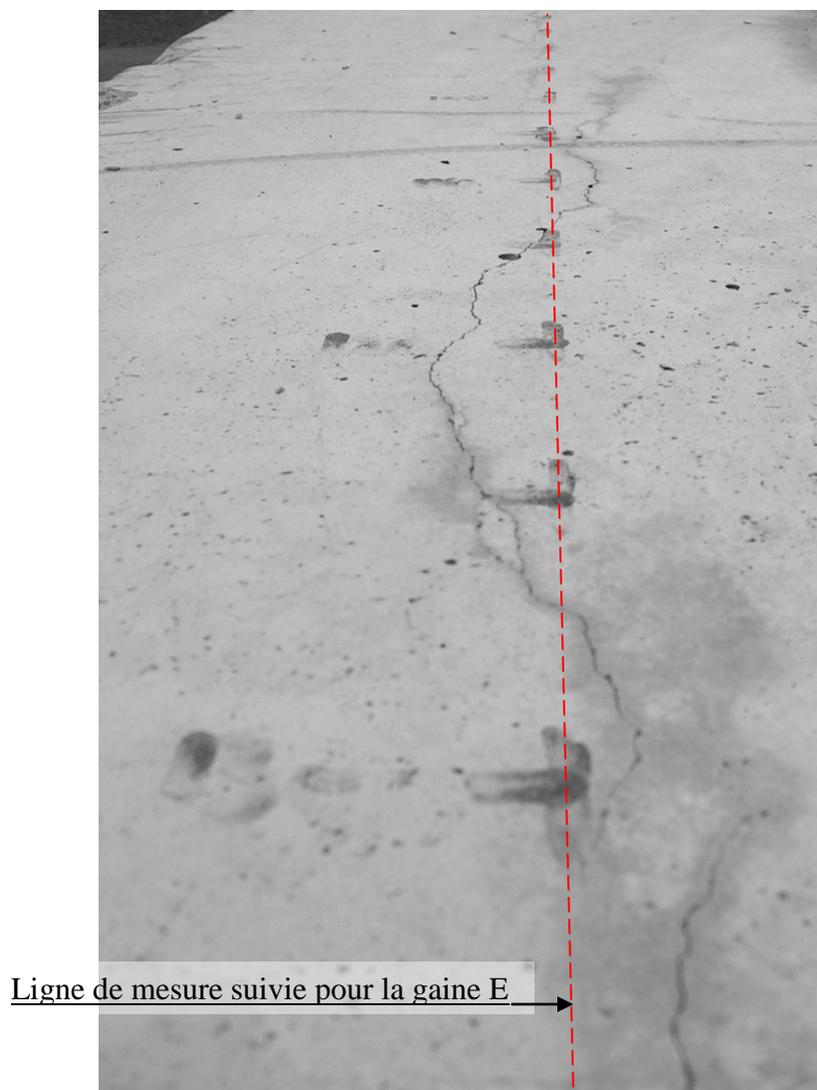


Figure 6.30- Fissure observée sur la gaine E du segment de poutre B4S4 entre les centimètres 110 et 130

Les mesures IE ont été effectuées depuis la cote 30 jusqu'aux cotes 215 à 230 *cm* sur les 5 gaines de l'élément (la cote 0 *cm* part correspondant à la face Nord du segment). Les endoscopies ont été effectuées en un nombre important sur toutes les gaines comme le montre la figure 6.31.



Figure 6.31 - Segment de poutre B4S4 percé suivant les différents endroits d'étude pour l'endoscopie

L'étude du segment par endoscopie a permis d'atteindre deux objectifs : d'une part l'étude et l'analyse de l'intérieure des gaines (utilisation usuelle des résultats d'endoscopes) puis elle a servi de support à l'interprétation des résultats issus de l'IE.

Dans les paragraphes suivants, les résultats obtenus par endoscopie sont présentés en premier, puis les résultats IE sont interprétés à l'aide des résultats précédents. Le déchiffrement des résultats endoscopiques est expliqué à l'annexe K afin de mieux comprendre les résultats qui vont suivre.

6.3.1.1. Observation à l'endoscope (prise de vue directe)

Les résultats obtenus des endoscopies sont présentés dans l'ordre des prises de clichés. Les photos du tableau 6.44 ne présentent que les résultats obtenus lors des prises de vues directes (sans l'outil d'observation à 90° ; résultats présentés à la sous-section 5.2.1.2).

Les résultats montrent différentes caractéristiques du segment de poutre. Par exemple, lors des perçages effectués des barres d'acier ont été rencontrées à plusieurs reprises (par exemple aux cotes B195 ou B190). De plus, dans certains cas, le perçage a permis d'atteindre la gaine. Passé la gaine, trois situations différentes surviennent : la gaine n'a pu être perforée ou elle s'est « écrasée » (exemple à la cote E160) ; la gaine est perforée et le perçage est arrêté avant d'atteindre les torons (exemple à la côte A115) ; la gaine est perforée et les torons sont atteints (exemple à la cote C180).

Tableau 6.44 - Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B4S4

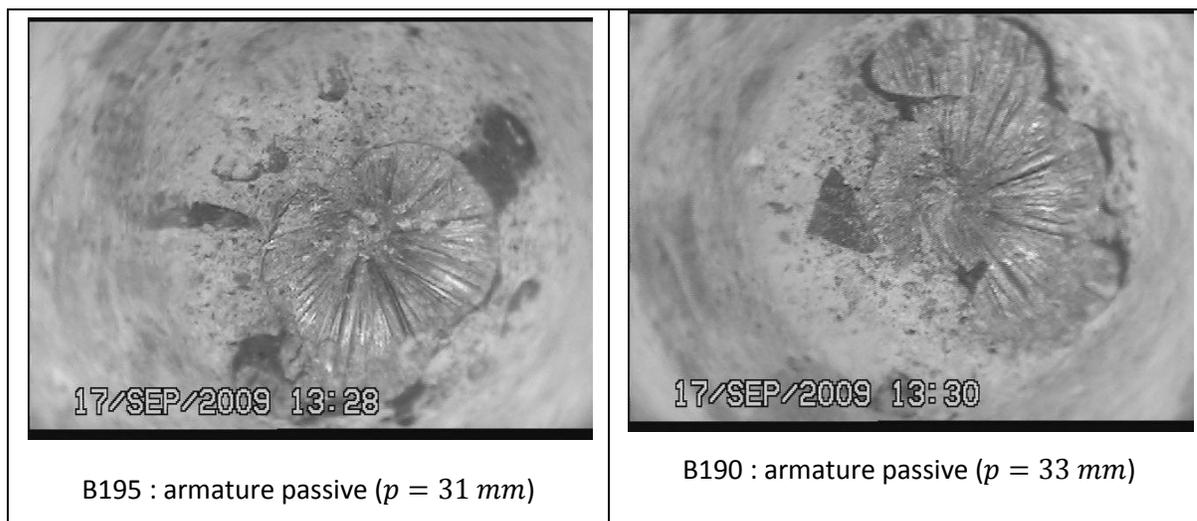


Tableau 6.44 (suite) - Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B4S4

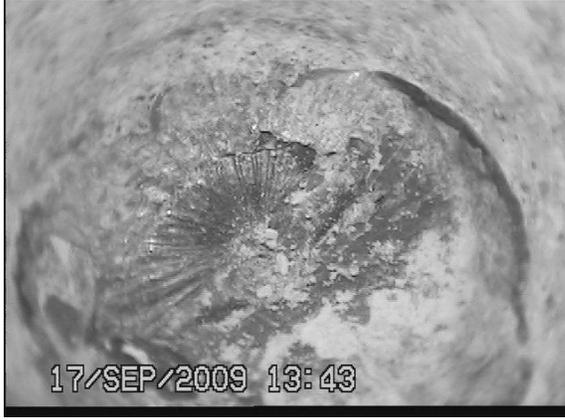
| | |
|---|---|
|  <p>C180 : gaine perforée avec torons apparents ($p = 85 \text{ mm}$)</p> |  <p>E160 : gain perforée écrasée contre les torons ($p = 86 \text{ mm}$)</p> |
|  <p>A160 : gaine perforée ($p = 84 \text{ mm}$)</p> |  <p>C155 : gaine perforée avec torons apparents ($p = 84 \text{ mm}$)</p> |

Tableau 6.44 (suite) - Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B4S4

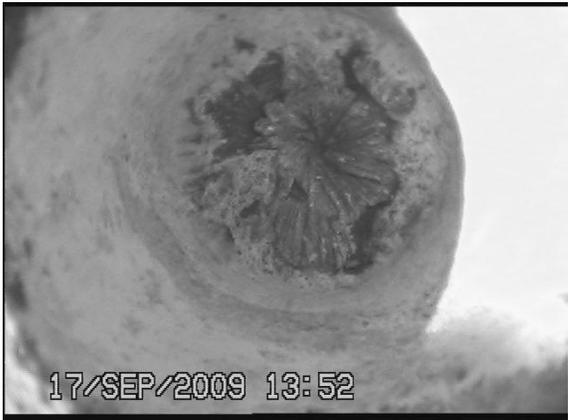
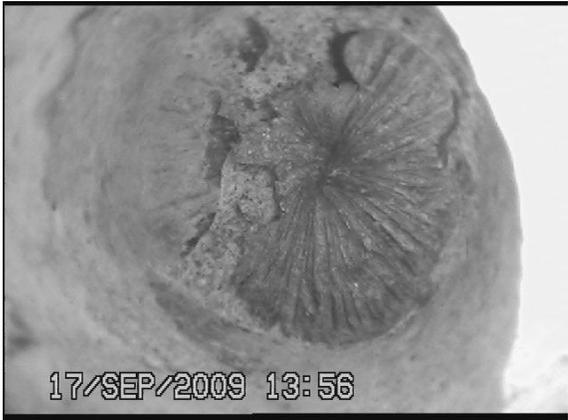
| | |
|--|---|
|  <p>17/SEP/2009 13:52</p> |  <p>17/SEP/2009 13:54</p> |
| B150 : armature passive ($p = 31 \text{ mm}$) | D145 : armature passive ($p = 60 \text{ mm}$) |
|  <p>17/SEP/2009 13:56</p> |  <p>17/SEP/2009 13:59</p> |
| B140 : armature passive ($p = 34 \text{ mm}$) | E125 : gaine perforée avec torons apparents ($p = 91 \text{ mm}$) |

Tableau 6.44 (suite) - Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B4S4

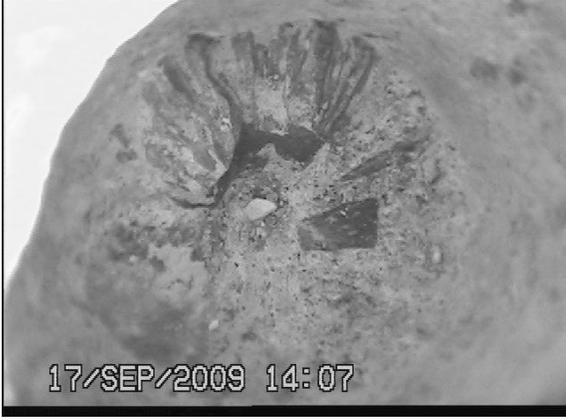
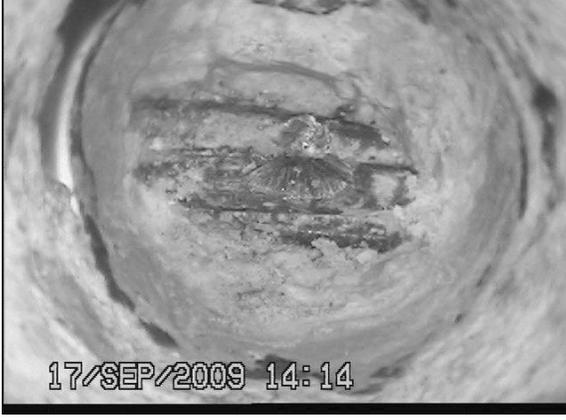
| | |
|--|---|
|  <p>17/SEP/2009 14:03</p> |  <p>17/SEP/2009 14:07</p> |
| <p>A120 : gaine perforée avec torons apparents ($p = 89 \text{ mm}$)</p> | <p>B120 : armature passive ($p = 31 \text{ mm}$)</p> |
|  <p>17/SEP/2009 14:09</p> |  <p>17/SEP/2009 14:14</p> |
| <p>C120 : gaine perforée avec torons apparents ($p = 90 \text{ mm}$)</p> | <p>C115 : gaine perforée avec torons apparents ($p = 87 \text{ mm}$)</p> |

Tableau 6.44 (suite) - Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B4S4

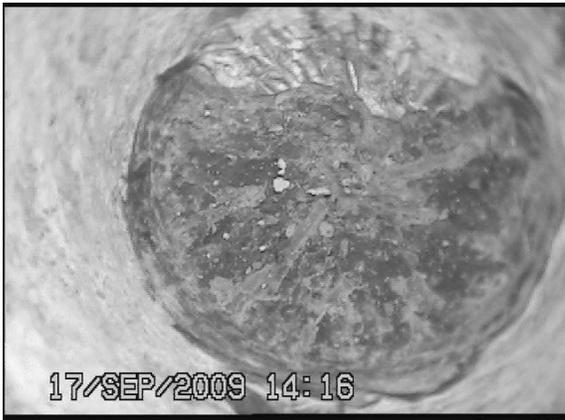
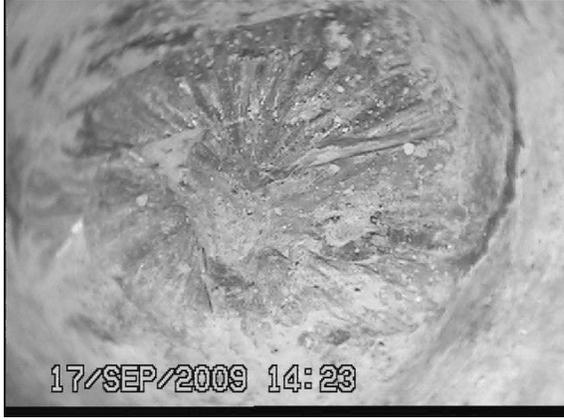
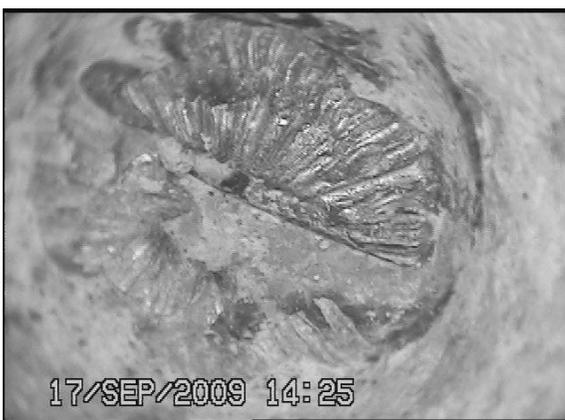
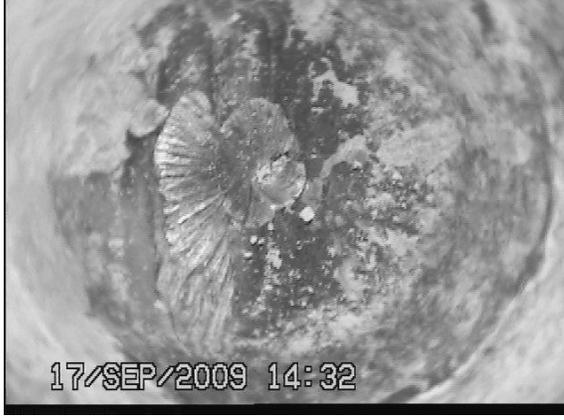
| | |
|---|--|
|  <p>17/SEP/2009 14:16</p> |  <p>17/SEP/2009 14:23</p> |
| <p>A115 : gaine perforée avec coulis apparent ($p = 83 \text{ mm}$)</p> | <p>D115 : gaine perforée ($p = 88 \text{ mm}$)</p> |
|  <p>17/SEP/2009 14:25</p> |  <p>17/SEP/2009 14:32</p> |
| <p>D110 : gaine perforée avec torons apparents ($p = 90 \text{ mm}$)</p> | <p>E105 : gaine perforée avec torons apparents ($p = 90 \text{ mm}$)</p> |

Tableau 6.44 (suite) - Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B4S4

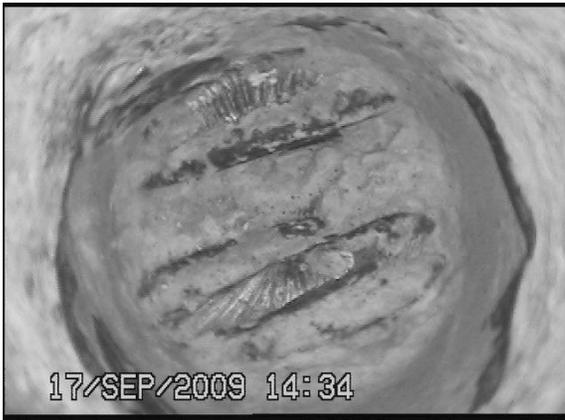
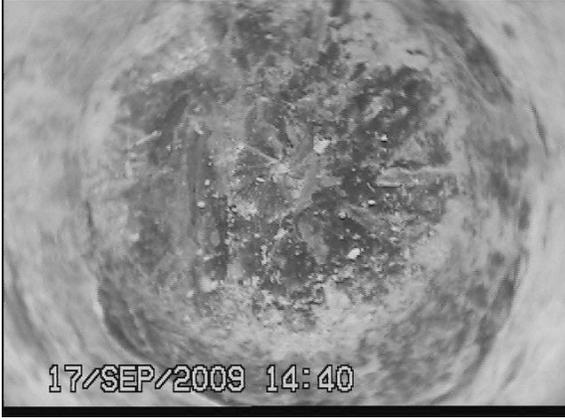
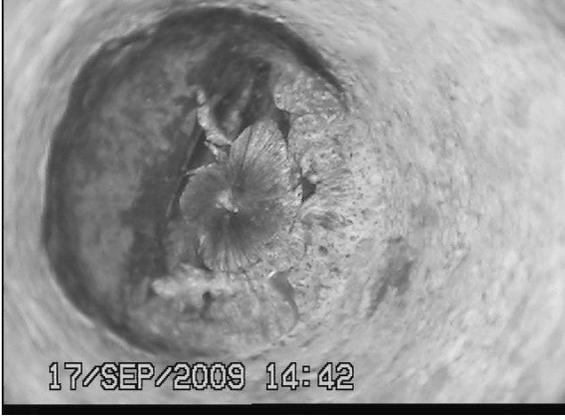
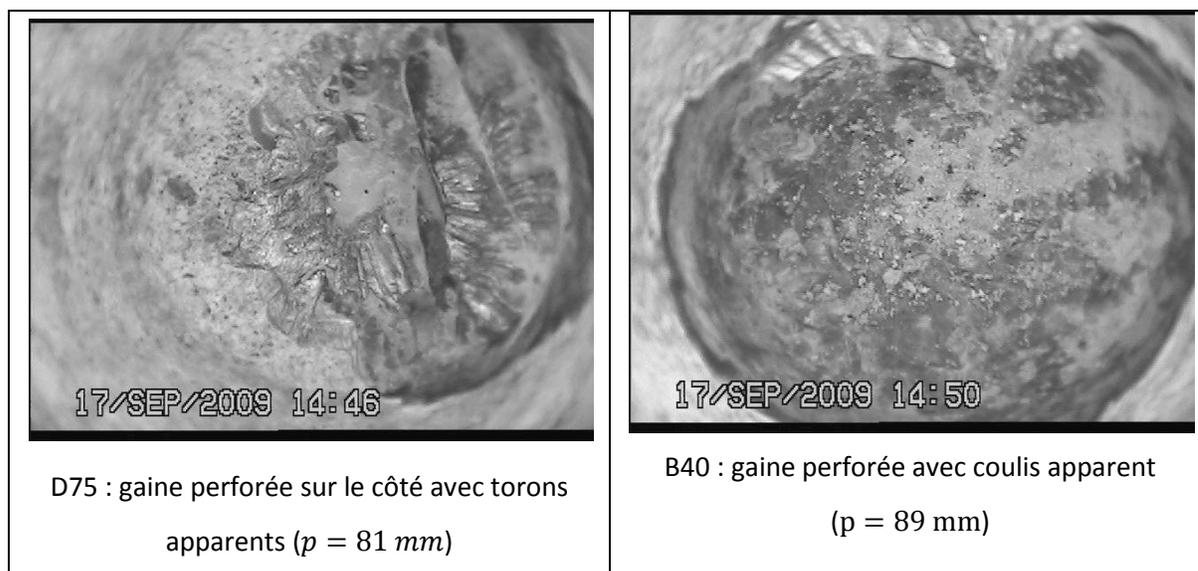
| | |
|---|---|
|  <p>17/SEP/2009 14:34</p> <p>B100 : gaine perforée avec torons apparents ($p = 90 \text{ mm}$)</p> |  <p>17/SEP/2009 14:40</p> <p>E90 : gaine perforée à fleur des torons ($p = 83 \text{ mm}$)</p> |
|  <p>17/SEP/2009 14:41</p> <p>B90 : Arrêt du perçage par la présence d'une barre d'armature sur le pourtour du trou bloquant le foret ($p = 34 \text{ mm}$)</p> |  <p>17/SEP/2009 14:42</p> <p>A80 : gaine perforée avec torons apparents ($p = 88 \text{ mm}$)</p> |

Tableau 6.44 (suite et fin) - Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B4S4



Contrairement aux résultats obtenus par IE pour lesquels l'interprétation des mesures demande une analyse plus étendue, il est évident que les résultats obtenus par endoscopie sont bien plus rapides. Effectivement, l'analyse des résultats se fait en direct sur l'écran de l'endoscope. L'acquisition d'images permet de conserver les résultats obtenus.

De nombreuses barres d'aciers ont été rencontrées durant le perçage, surtout pour la gaine B. Dans le cas des perçages parvenus jusqu'aux gaines, le perçage demande une certaine dextérité. En effet, il était difficile de savoir à quel moment les torons étaient atteints avec le foret. Ainsi, en plusieurs endroits, il est possible de visualiser des torons abimés (par exemple en A120 ou B100) non pas par l'usure de l'ouvrage mais dû au perçage effectué pour l'endoscopie. C'est pour cette raison qu'il est important d'utiliser un système de contacteur relié à l'acier passif de l'ouvrage afin d'arrêter automatiquement le perçage au contact de la gaine. Une fois la gaine atteinte, il suffit de percer la gaine avec un foret plus adapté et de percer peu profondément.

Le perçage supprimant le coulis entre la gaine et les torons, il est difficile de l'analyser à l'aide de ces premiers clichés. Il est tout de même possible de remarquer que le coulis semble être injecté correctement autour des torons (exemple en B100) et aussi qu'il remplit

correctement la gaine (le coulis sectionné par le perçage est visible depuis les torons jusqu'au rebord de la gaine sectionnée sur le pourtour du trou, exemple en C180). Aussi, des différences de couleur et d'homogénéité du coulis sont observables.

Cette différence, ainsi que la qualité du coulis s'observe beaucoup mieux grâce à l'outil d'observation à 90° fourni avec l'endoscope. La sous-section suivante présente les acquisitions d'image obtenues avec cet outil.

6.3.1.2. Observation à 90° du coulis et des vides

Pour l'ensemble des trous ayant été percés jusqu'à l'intérieur des gaines, une acquisition d'image à 90° a été effectuée grâce à l'outil d'observation à 90° de l'endoscope. Les images acquises sont présentées au tableau 6.45. Chaque cliché a été pivoté de 180° afin de le mettre dans le sens de l'étude (bord de la gaine percée au-dessus des torons).

Tableau 6.45- Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B4S4 (vues à 90°)

| | |
|---|--|
|  |  |
| C180 : coulis homogène et remplissant la gaine | E160, haut de gaine : coulis non homogène (plusieurs couleurs) |

Tableau 6.45 (suite) - Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B4S4 (vues à 90°)

| | |
|--|---|
|  <p>17/SEP/2009 13:47</p> |  <p>17/SEP/2009 13:48</p> |
| <p>A160 : coulis homogène</p> | <p>C155 : Coulis homogène avec traces de ressuage</p> |
|  <p>17/SEP/2009 14:01</p> |  <p>17/SEP/2009 14:06</p> |
| <p>E125 : coulis homogène de couleur très foncée</p> | <p>A120 : coulis homogène de couleur foncée</p> |

Tableau 6.45 (suite) - Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B4S4 (vues à 90°)

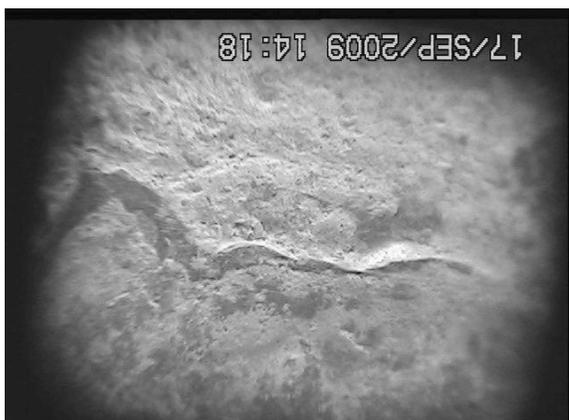
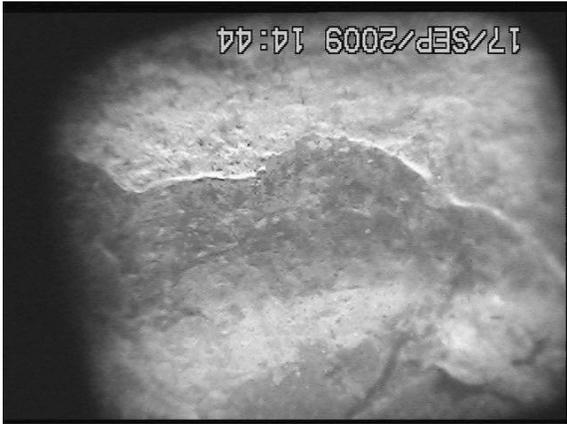
| | |
|---|--|
|  <p>17/SEP/2009 14:12</p> |  <p>17/SEP/2009 14:13</p> |
| <p>C120 : coulis homogène</p> | <p>C115 : coulis homogène</p> |
|  <p>17/SEP/2009 14:18</p> |  <p>17/SEP/2009 14:22</p> |
| <p>A115 : coulis non homogène de couleur foncée</p> | <p>D115 : coulis homogène</p> |

Tableau 6.45 (suite) - Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B4S4 (vues à 90°)

| | |
|---|--|
|  <p>17/SEP/2009 14:26</p> |  <p>17/SEP/2009 14:31</p> |
| <p>D110 : coulis homogène</p> | <p>E15 : coulis homogène de couleur foncée</p> |
|  <p>17/SEP/2009 14:36</p> |  <p>17/SEP/2009 14:39</p> |
| <p>B100 : coulis homogène</p> | <p>E90 : coulis homogène de couleur foncée</p> |

Tableau 6.45 (suite et fin) - Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B4S4
(vues à 90°)

| | |
|---|--|
|  |  |
| <p>A80, haut de gaine : le coulis est dissocié en deux parties : un coulis de couleur sombre à proximité du bord de la gaine, un coulis claire à proximité des torons</p> | <p>D75 : coulis homogène</p> |
|  <p>B40 : coulis non homogène de couleur foncée</p> | |

Les clichés obtenus permettent de montrer différentes caractéristiques du coulis. En premier lieu, à la cote C180, il est possible de constater que le coulis s'inscrit parfaitement autour des torons. Aussi, pour l'ensemble des ouvertures observées, aucun vide de coulis n'est apparu : l'ensemble des gaines était donc parfaitement rempli aux points d'étude.

Deux types de coulis ont été observés. Effectivement, pour les gaines B, C et D, un coulis de couleur claire était présent de façon homogène, alors que pour les gaines A et E, le coulis était plus foncé, voir très sombre et peu homogène (surtout pour la gaine A). Dans le cas du coulis de couleur foncée, il est possible que l'impression de non homogénéité provienne de la poussière de béton introduite durant le perçage car le coulis présente une texture plus rugueuse dans le cas du coulis foncé comparativement au coulis clair. De plus, dans le cas d'un coulis clair, le coulis a une couleur très proche de celle du béton (visible au-dessus de la gaine sectionnée). La présence de poussière de béton est donc difficilement détectable.

Ainsi, un très bon remplissage des gaines a pu être constaté avec la présence de deux coulis différents.

6.3.1.3. Résultats IE

En vue des résultats obtenus précédemment avec les plaques et les blocs, les fréquences théoriques proposées par la littérature scientifique ne sont pas attendues en raison de la complexité de la pièce étudiée. Toutefois, il est intéressant de noter que les fréquences image de l'épaisseur de la pièce sont attendues à 3 *kHz* ou en dessous (voir tableau 6.46).

La hauteur des gaines variant de 55 à 80 *mm* en moyenne sur la longueur de la poutre, la fréquence caractéristique f_{acier} appartient à l'intervalle 11 – 16 *kHz* (pour des torons ayant une profondeur variant de 60 à 90 *mm* depuis la surface d'étude).

Tableau 6.46- Valeurs des fréquences théoriques image de l'épaisseur de la pièce

| h (mm) | v_p (m/s) | f_1 (kHz) | f_2 (kHz) | f_3 (kHz) | f_4 (kHz) | f_5 (kHz) | f_6 (kHz) |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1600 | 3900 | 1,15 | 1,78 | 2,33 | 2,44 | 2,94 | 3,06 |

Les résultats obtenus par IE sont reportés aux figures 6.33 à 6.36. Ils sont comparés aux résultats obtenus par endoscopies (les zones percées sont représentées par les tirets).

- Gaine B :

Puisque la gaine B a fait l'objet du plus de perçages pour l'endoscopie, les résultats IE de cette gaine sont présentés en premier. Les résultats obtenus à partir de l'endoscopie de la gaine B sont récapitulés au tableau 6.47. Pour chaque perçage, la fréquence théorique image de la profondeur d'une barre d'acier passif ou des torons dans la gaine a été calculée et présenté dans le tableau.

Tableau 6.47- Récapitulatif des résultats obtenus pour la gaine B par endoscopie avec les fréquences théoriques calculées associées

| Cote | Profondeur atteinte p (mm) | Résultats par endoscopie (gaine ou barre rencontrée) | Fréquence attendue (kHz) |
|------|------------------------------|--|--------------------------|
| B195 | 31 | barre | 31 |
| B190 | 33 | barre | 30 |
| B150 | 31 | barre | 31 |
| B140 | 34 | barre | 29 |
| B120 | 31 | barre | 31 |
| B100 | 90 | gaine | 11 |
| B90 | 34 | barre | 29 |
| B40 | 89 | gaine | 11 |

Sur la figure 6.32, un pic de fréquence autour de 3 – 4 kHz est présent sur pratiquement la totalité des points de mesures IE. Ce pic est le plus important sur les résultats des mesures. D'autres pics, moins fréquents apparaissent. Pour la plus part, leur fréquence est beaucoup plus faible et ils sont donc difficilement identifiables. Effectivement, comme lors de l'étude des blocs, un grand nombre de fréquences est mis en excitation. Seulement, leur faible amplitude ne permet pas de dissocier les pics caractéristiques des pics dus aux irrégularités de la pièce.

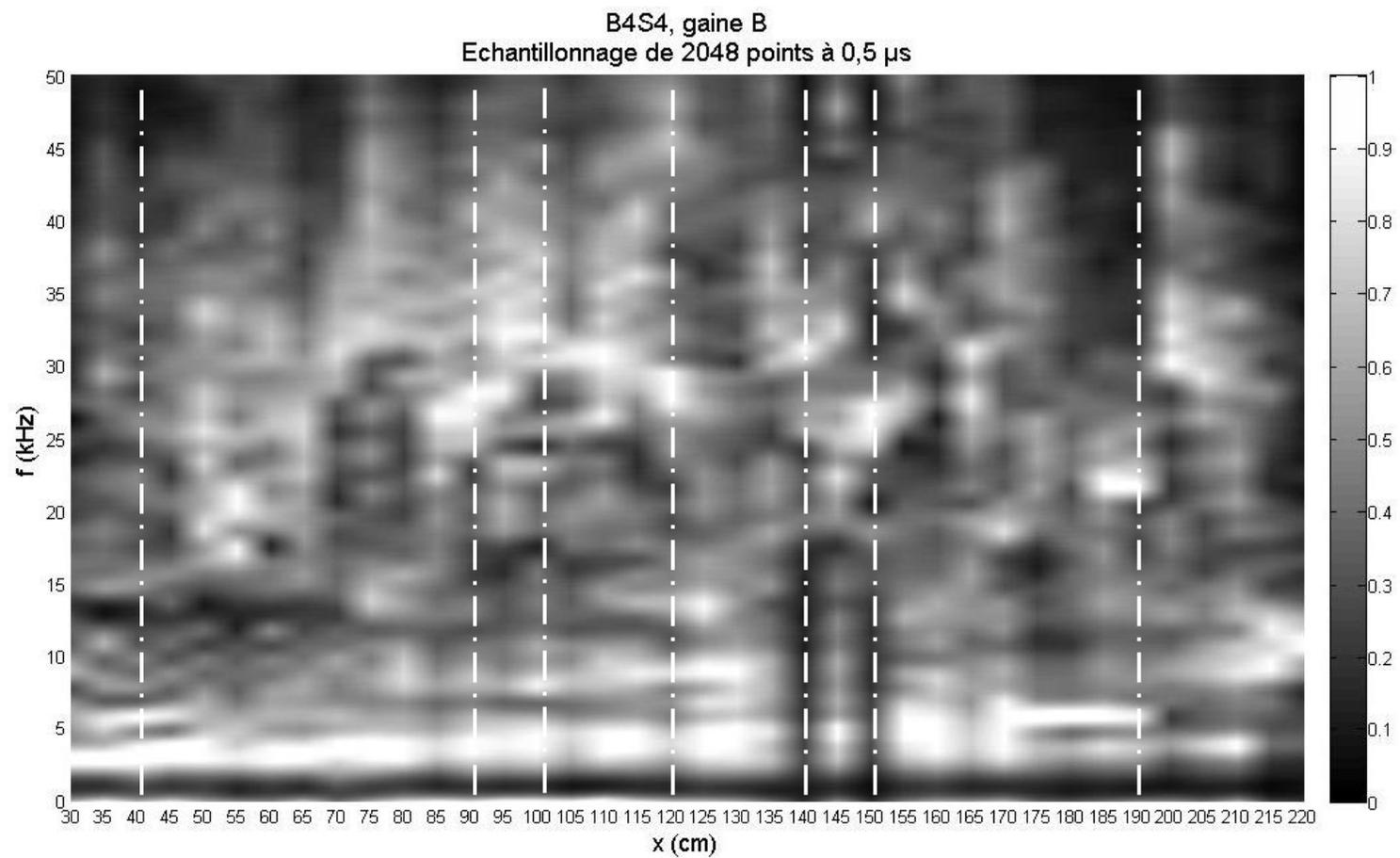


Figure 6.32- Résultats IE du segment B4S4, gaine B

Cependant, les autres pics de fréquences de forte amplitude sont présents autour de 30 *kHz*, en grand nombre entre les cotes 85 et 150 et présent aussi à 190 *cm*. Les pics obtenus correspondent à la présence de barres d'acier (armature passive) aux profondeurs obtenues lors des perçages.

- Gaine A :

Les résultats IE obtenus pour la gaine A sont présentés à la figure 6.33 et un récapitulatif des endoscopies est présenté au tableau 6.48.

Tableau 6.48- Récapitulatif des résultats obtenus pour la gaine A par endoscopie avec les fréquences théoriques calculées associées

| Cote | Profondeur atteinte <i>p</i> (mm) | Résultats par endoscopie (gaine ou barre rencontrée) | Fréquence attendue (kHz) |
|------|-----------------------------------|--|--------------------------|
| A160 | 84 | gaine | 12 |
| A120 | 89 | gaine | 11 |
| A115 | 83 | gaine | 12 |
| A80 | 88 | gaine | 11 |

Le pic de fréquence autour de 3 – 4 *kHz* est présent, comme dans le cas de la gaine B, sur pratiquement la totalité des points de mesures IE. Cette fois ci, les fréquences autour de 10 et 13 *kHz* sont très présentes, particulièrement jusqu'à la cote 210 avec une forte irrégularité à la cote 160.

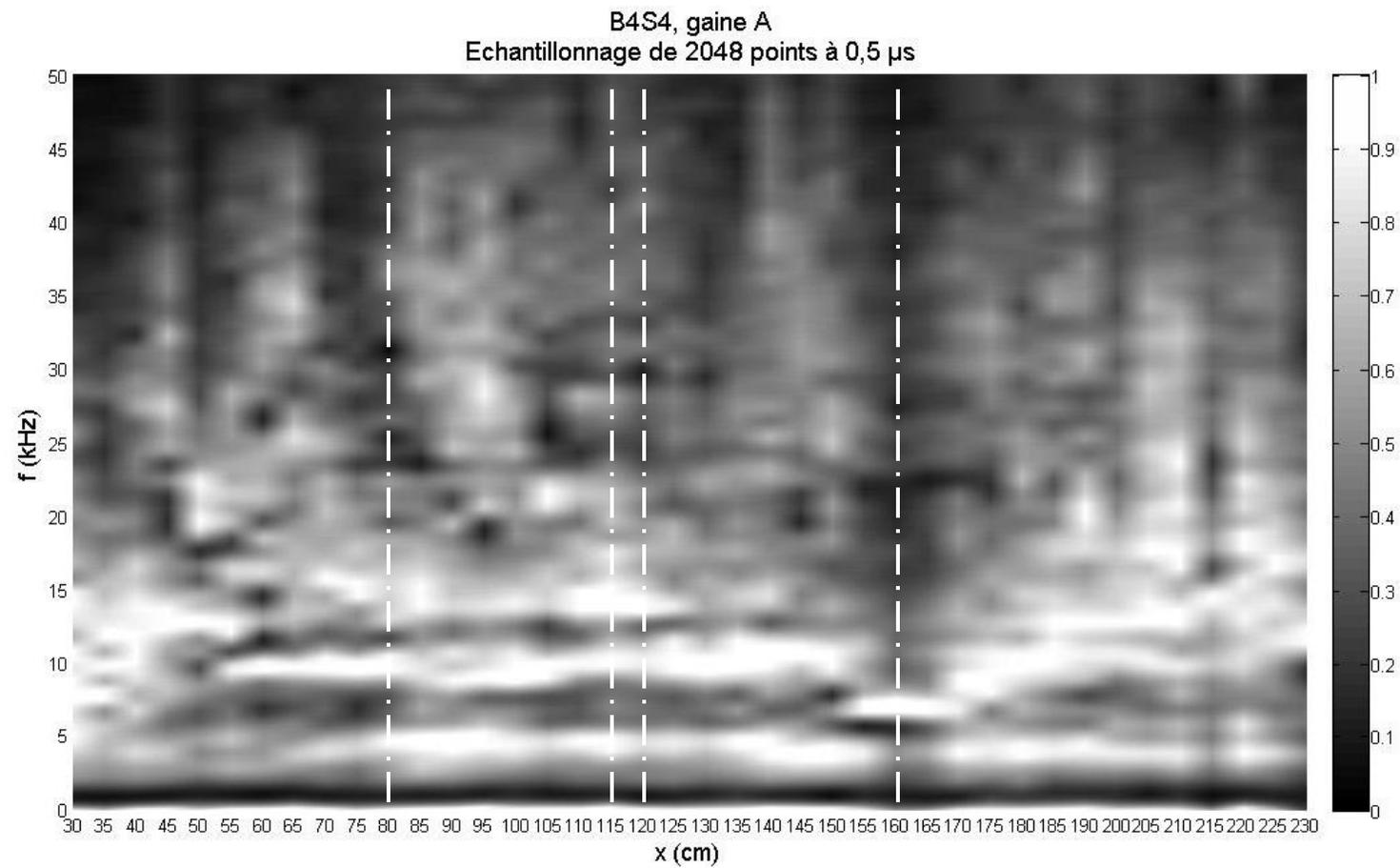


Figure 6.33- Résultats IE du segment B4S4, gaine A

A partir de la cote 190, un plus grand nombre de fréquence commence à être excité. Effectivement, plusieurs pics de forte amplitude sont présents entre 15 et 25 *kHz*. La présence de barres d'armature pourrait expliquer ce phénomène.

En ce qui concerne les zones percées, toutes ont mené à l'intérieur de la gaine. Pourtant, un grand nombre de disparités se présente entre le point d'étude à 160 *cm* et les trois autres. Effectivement, une seule fréquence (relevé à 7 *kHz*) apparait à la mesure IE à 160 *cm* comparé aux 3 fréquences relevées sur pratiquement l'ensemble de la poutre (dont les 3 autres points d'étude par endoscopie). Comme il a été possible d'atteindre la gaine à la cote 160 sans difficulté et que le remplissage de la gaine a été trouvé constant, la différence de résultat IE pourrait s'expliquer par la présence d'un vide important dans le segment de poutre à ce niveau (estimé à une profondeur de 280 *mm* environ). Ceci est une hypothèse qui n'a pu être vérifiée par la suite.

- Gaine C :

Les résultats IE obtenus pour la gaine C sont présentés à la figure 6.34 et un récapitulatif des endoscopies est présenté au tableau 6.49.

Tableau 6.49- Récapitulatif des résultats obtenus pour la gaine C par endoscopie avec les fréquences théoriques calculées associées

| Cote | Profondeur atteinte p (<i>mm</i>) | Résultats par endoscopie (gaine ou barre rencontrée) | Fréquence attendue (<i>kHz</i>) |
|------|---------------------------------------|--|-----------------------------------|
| C180 | 85 | gaine | 11 |
| C155 | 84 | gaine | 12 |
| C120 | 90 | gaine | 11 |
| C115 | 87 | gaine | 11 |

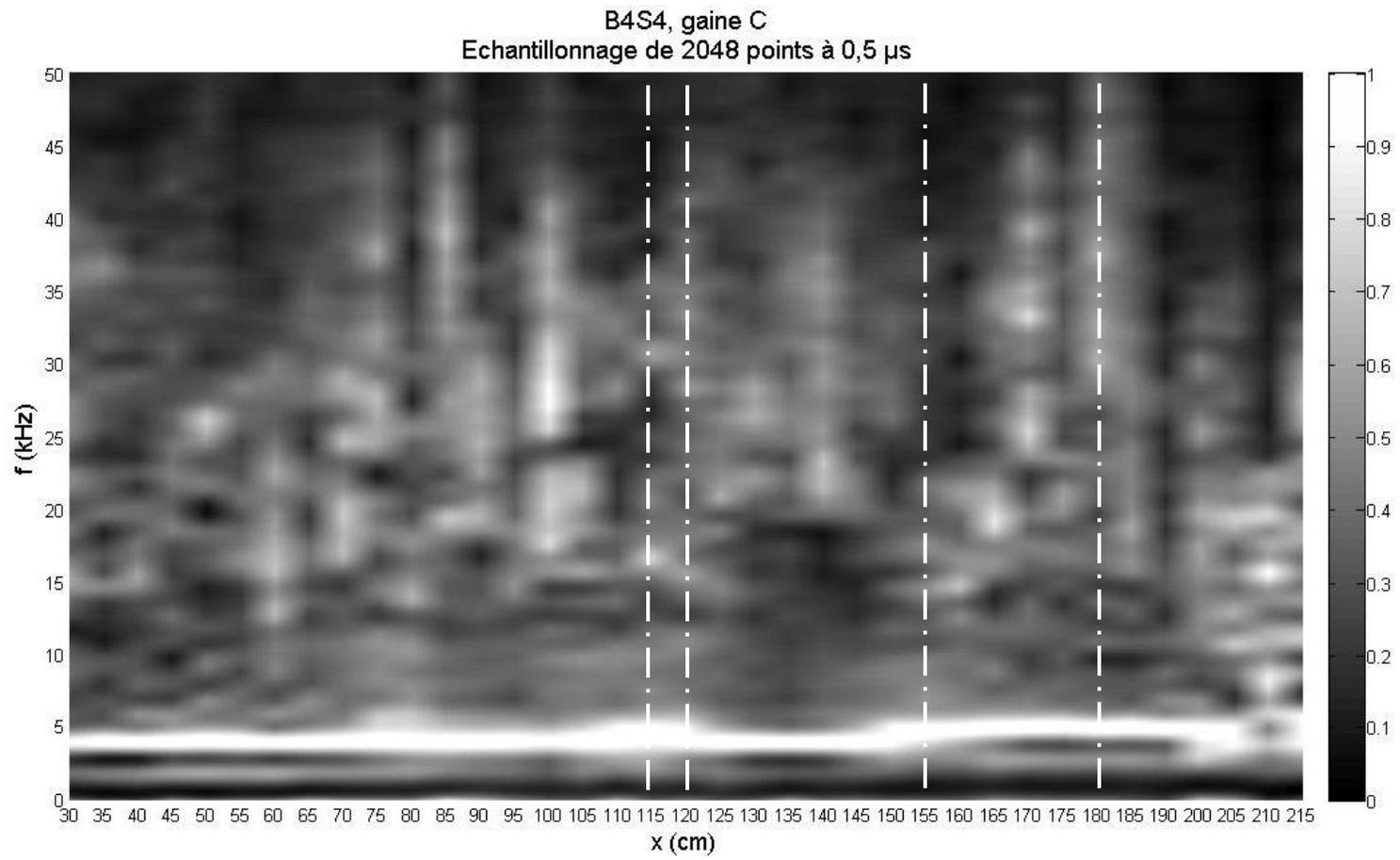


Figure 6.34 - Résultats IE du segment B4S4, gaine C

Contrairement aux résultats précédents, les résultats de la figure 6.34 ne montrent qu'un seul pic de fréquence autour de 4 – 5 *kHz*. La gaine C étant située au centre des gaines et donc sur le milieu du segment de poutre (Figure 5.36), il est possible que les effets de bord soient très atténués et que seule la fréquence image de l'écho du fond de la pièce ressorte.

Il est présumé que peu de barres d'acier ont été placées au-dessus de la gaine C pour obtenir un diagramme en fréquence aussi « plat ». Les quatre endoscopies ont menées aux mêmes observations sur le diagramme. Les résultats sont identiques. Tous les perçages ont mené à la gaine (aucune barre).

- Gaine D :

Les résultats IE obtenus pour la gaine D sont présentés à la figure 6.35 et un récapitulatif des endoscopies est présenté au tableau 6.50.

Tableau 6.50- Récapitulatif des résultats obtenus pour la gaine D par endoscopie avec les fréquences théoriques calculées associées

| Cote | Profondeur atteinte p (mm) | Résultats par endoscopie (gaine ou barre rencontrée) | Fréquence attendue (kHz) |
|------|------------------------------|--|--------------------------|
| D145 | 60 | barre | 16 |
| D115 | 88 | gaine | 11 |
| D110 | 90 | gaine | 11 |
| D75 | 81 | gaine | 12 |

Dans le cas de la gaine D, le pic de fréquence à 3 – 4 *kHz* est présent mais souvent atténué par un phénomène d'étalement du pic, en particulier passé la cote 140. De nombreux autres pics de fréquences de forte amplitude ont été relevés. Un pic de fréquence à 9 – 10 *kHz* est relevé pratiquement en continuité sur tout le segment de poutre secondé par un pic à 13 – 14 *kHz* entre les cotes 55 et 120.

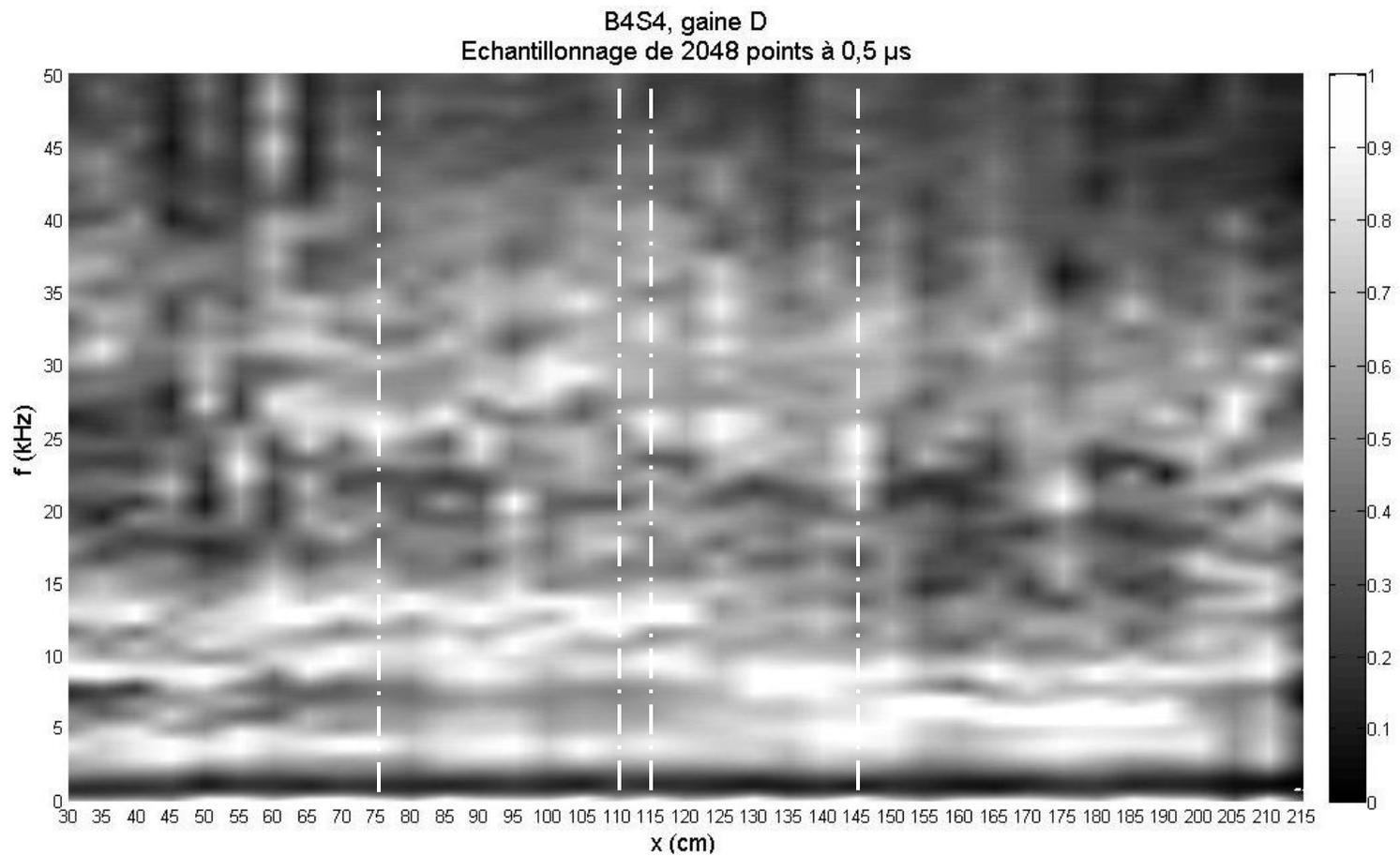


Figure 6.35- Résultats IE du segment B4S4, gaine D

Les observations obtenues de l'endoscopie montrent que les pics entre 25 et 30 *kHz* ne sont pas des fréquences relatives aux barres métalliques. En effet, les perçages effectués au-dessus de la gaine D auraient été interrompus par des barres pour les perçages aux cotes 75, 115 et 145 d'après les résultats IE. L'hypothèse des pics de fréquence autour de 25 et 30 *kHz* présents en raison de barres métalliques posée lors de l'observation des résultats de la gaine B n'est pas validée. De plus, une fréquence excitée autour de 13 – 15 *kHz* n'est pas identifiée.

- Gaine E :

Les résultats IE obtenus pour la gaine E sont présentés à la figure 6.36 et un récapitulatif des endoscopies est présenté au tableau 6.51.

Tableau 6.51- Récapitulatif des résultats obtenus pour la gaine E par endoscopie avec les fréquences théoriques calculées associées

| Cote | Profondeur atteinte p (mm) | Résultats par endoscopie (gaine ou barre rencontrée) | Fréquence attendue (<i>kHz</i>) |
|------|----------------------------|--|-----------------------------------|
| E160 | 86 | gaine | 11 |
| E125 | 91 | gaine | 11 |
| E105 | 90 | gaine | 11 |
| E90 | 83 | gaine | 12 |

Dans le cas des résultats IE de la gaine E, la fréquence relevée habituellement à 3 – 4 *kHz* pour les autres gaines n'apparaît pas ici. Ceci vient du fait que la découpe du tablier du segment de poutre se situe au flan de la poutre sur son côté Ouest (du côté de la gaine E). Les irrégularités de la découpe réduisent l'écho du fond de la pièce (voir figure 5.36).

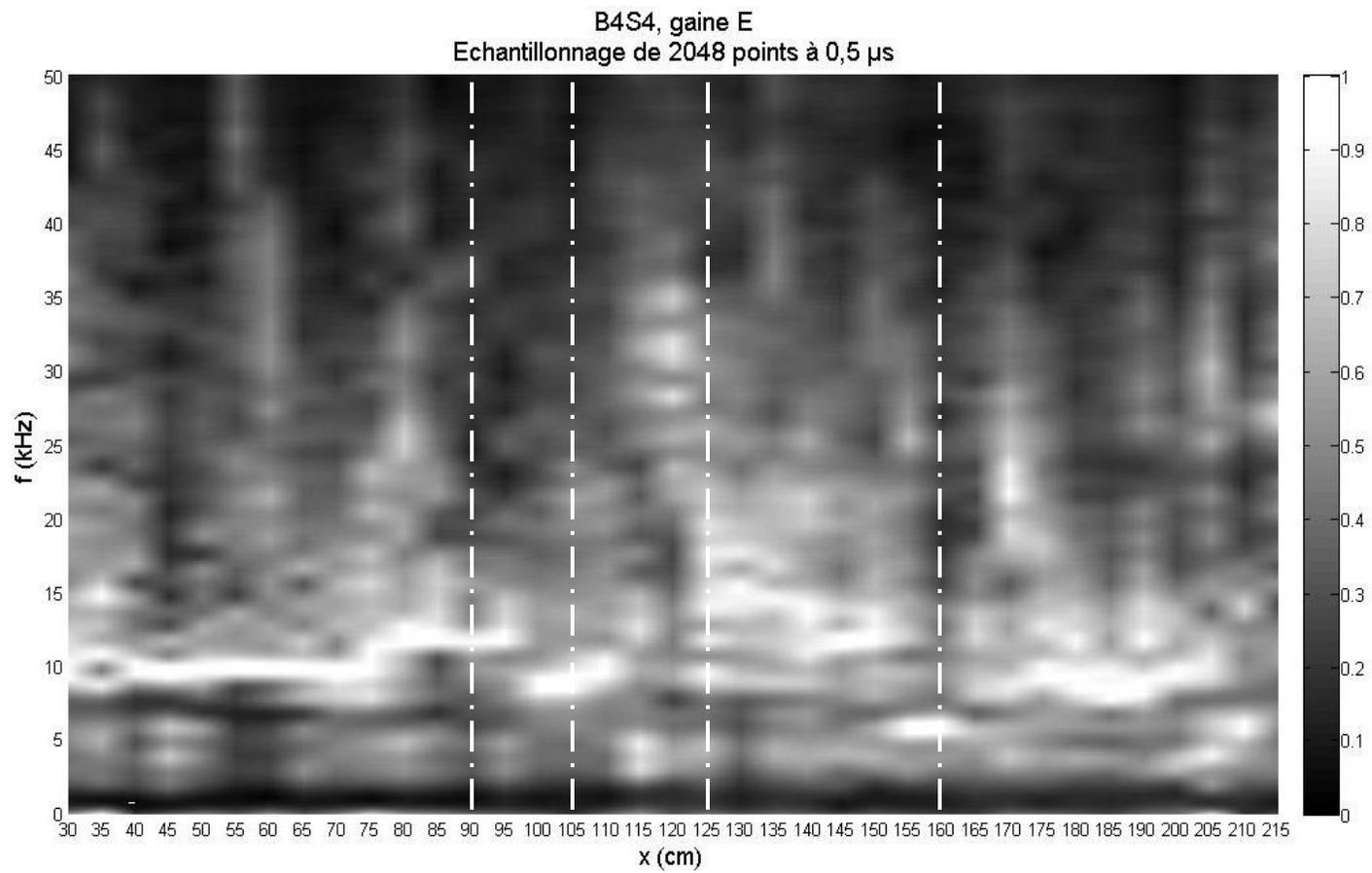


Figure 6.36- Résultats IE du segment B4S4, gaine E

Un pic de fréquence apparaît en continu entre les cotes 30 et 100 à hauteur de 10 – 12 *kHz*. Par la suite, les résultats IE sont très variés : plusieurs fréquences excitées entre 30 et 35 *kHz* à la cote 120 ; plusieurs fréquences excitées entre 10 et 17 *kHz* à partir de la cote 125.

Sur les quatre perçages effectués au-dessus de la gaine, tous ont permis d'observer l'intérieur de celle-ci. Aucune différence n'a été observée à l'endoscope sur ces 4 ouvertures malgré les différences importantes obtenues lors de l'impact-écho.

6.3.2. Segment de poutre B2S3

Contrairement au segment de poutre B4S4, le segment B2S3 est un point haut. Par conséquent, la surface supérieure de ce segment de poutre correspond à une surface dont le revêtement d'asphalte a été retiré. Cette surface est donc peu plane (figure 6.37) ce qui a rendu les essais IE difficiles car le capteur n'a pas réussi à capter de signal en certains points d'étude. De plus, en raison du procédé de découpe des bords du tablier le long du segment, les extrémités de la surface ne sont pas en bon état comme en témoigne la figure 6.37. Il a été impossible de pratiquer des essais IE au-dessus de la gaine A car la surface était presque inexistante à son niveau.

En plus des irrégularités de surface, la présence de restes de goudron à partir de la côte 40 *cm* jusqu'à 110 *cm* (pour les gaines A, B et C) a limité les résultats IE. Aussi, la présence des événements (autour de 120 – 125 *cm*) permettant le remplissage des gaines a empêché l'emploi de l'impact-écho localement.

Les mesures IE ont été effectuées depuis la côte 30 jusqu'à la côte 195 *cm* dans le cas où cela a été possible sur les gaines B à E de l'élément (la côte 0 *cm* correspond à la face Sud du segment). Les endoscopies ont été effectuées sur les gaines auscultées par IE (voir la figure 6.38).

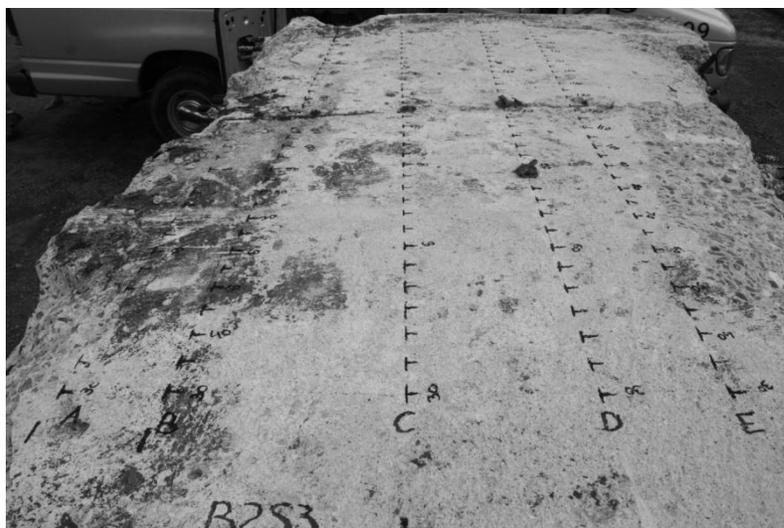


Figure 6.37- Surface d'étude de la poutre B2S3



Figure 6.38 - Segment de poutre B2S3 percé en différents endroits d'étude pour l'endoscopie

Comme pour le segment B4S4, les endoscopies ont permis de poursuivre deux objectifs : l'analyse de l'intérieur des gaines (utilisation normale des résultats endoscopiques) ainsi

que l'aide à l'interprétation des résultats obtenus par IE. Dans les paragraphes qui suivent, les résultats obtenus par endoscopie sont présentés en premier, puis, en second lieu, les résultats IE sont interprétés à l'aide des résultats précédents.

6.3.2.1. Observation à l'endoscope

Les résultats obtenus par endoscopie sont présentés dans l'ordre des prises de clichés. Les photos du tableau 6.52 présentent les résultats obtenus lors des prises de vues.

Les résultats perçages ont menés à beaucoup de barres (85% des cas). En effet, la zone étudiée sur la structure correspondant à un point haut, la présence importante de barre métallique est inéluctable. Il aurait été possible de diminuer le nombre de perçage donnant un contact avec une barre en étudiant au préalable les plans de l'ouvrage ainsi qu'en détectant la présence de barres à l'aide d'un pachomètre. Seuls deux perçages ont permis d'observer l'intérieur des gaines (cotes B35 et D135). Ces observations ont permis d'examiner des vides de coulis et du ressuage sur le dessus du coulis.

Tableau 6.52- Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B2S3

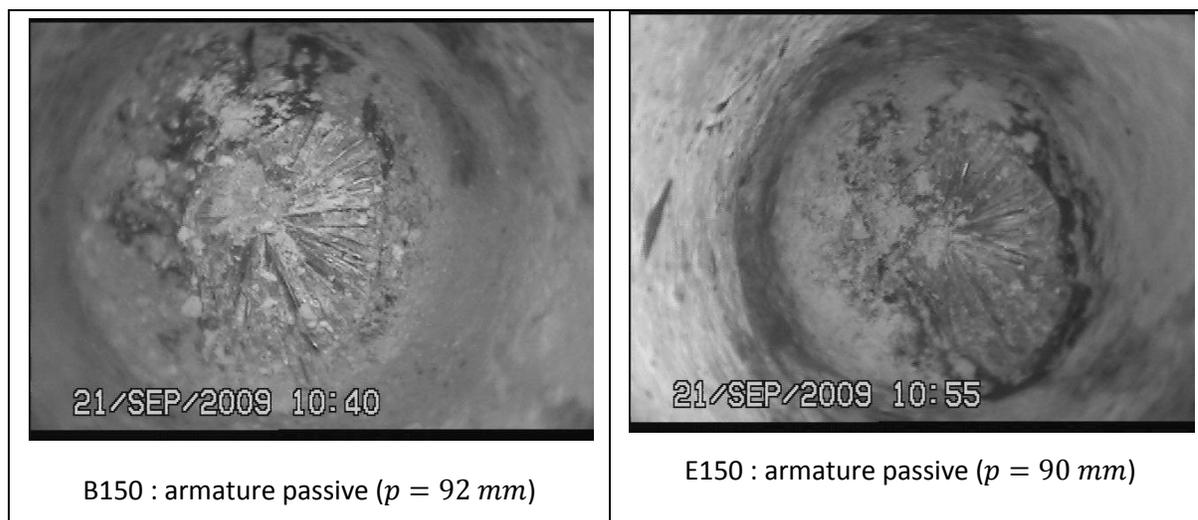


Tableau 6.52 (suite) - Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B2S3

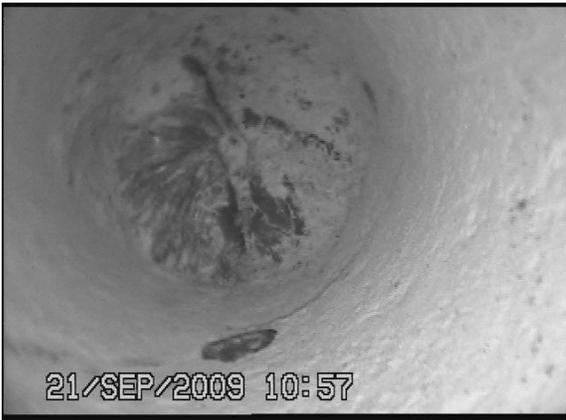
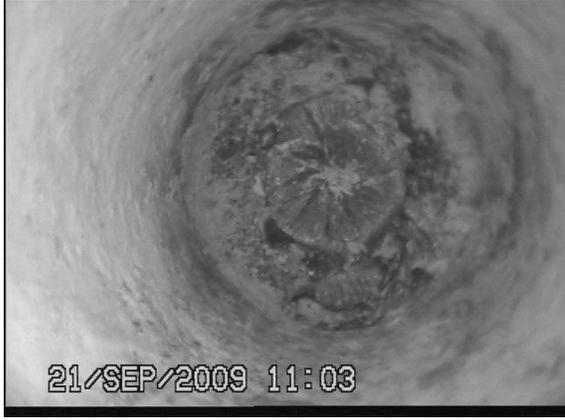
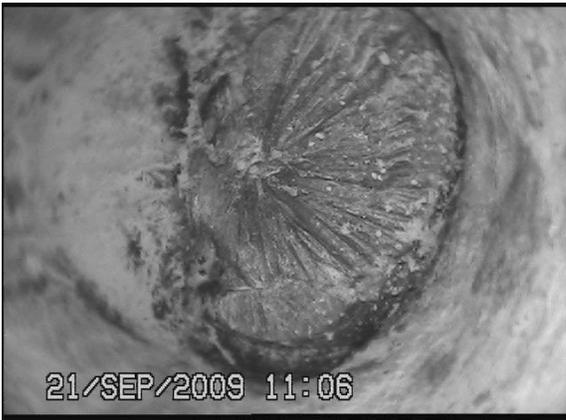
| | |
|---|--|
|  <p>21/SEP/2009 10:57</p> |  <p>21/SEP/2009 11:03</p> |
| E145 : armature passive ($p = 88 \text{ mm}$) | E140 : armature passive ($p = 83 \text{ mm}$) |
|  <p>21/SEP/2009 11:06</p> |  <p>21/SEP/2009 11:12</p> |
| D145 : armature passive ($p = 89 \text{ mm}$) | D135 : gaine perforée avec torons apparents ($p = 145 \text{ mm}$) |

Tableau 6.52 (suite) - Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B2S3

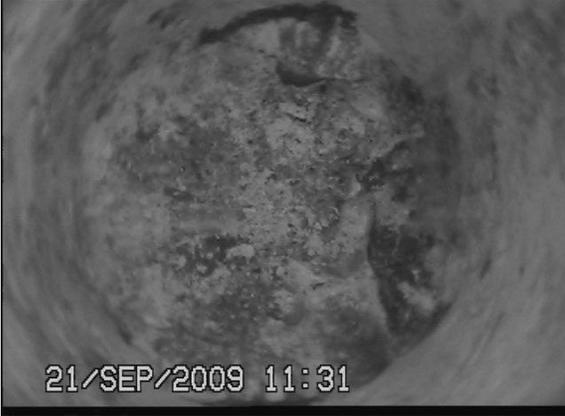
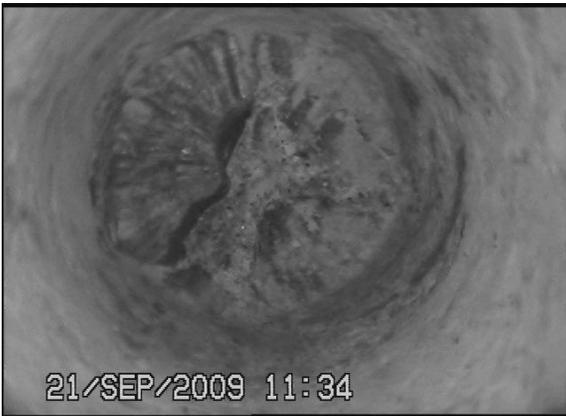
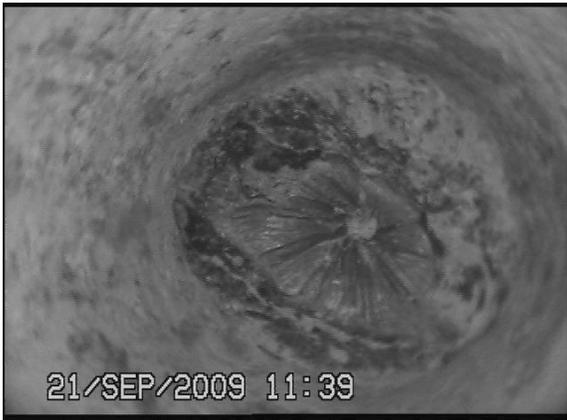
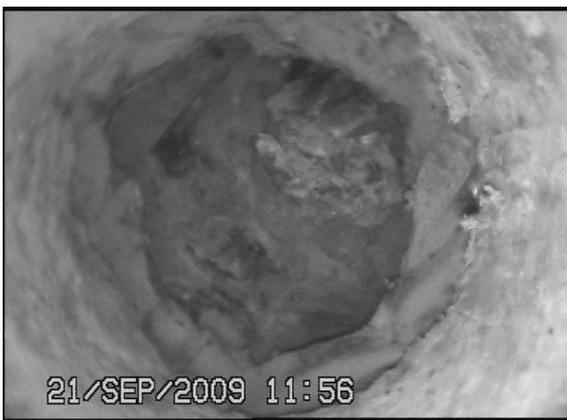
| | |
|--|---|
|  <p>21/SEP/2009 11:18</p> |  <p>21/SEP/2009 11:31</p> |
| <p>D110 : armature passive ($p = 83 \text{ mm}$)</p> | <p>C80 : Arrêt du perçage par la présence d'une barre d'armature sur le pourtour du trou bloquant le foret ($p = 89 \text{ mm}$)</p> |
|  <p>21/SEP/2009 11:34</p> |  <p>21/SEP/2009 11:37</p> |
| <p>C75 : armature passive ($p = 89 \text{ mm}$)</p> | <p>C65 : armature passive ($p = 88 \text{ mm}$)</p> |

Tableau 6.52 (suite) - Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B2S3

| | |
|---|---|
|  <p>21/SEP/2009 11:39</p> |  <p>21/SEP/2009 11:42</p> |
| <p>C60 : armature passive ($p = 80 \text{ mm}$)</p> | <p>D65 : armature passive ($p = 80 \text{ mm}$)</p> |
|  <p>21/SEP/2009 11:56</p> |  <p>21/SEP/2009 12:04</p> |
| <p>B35 : gaine perforée avec coulis apparent ($p = 170 \text{ mm}$)</p> | <p>B30 : Arrêt du perçage par la présence d'une barre d'armature sur le pourtour du trou bloquant le foret ($p = 68 \text{ mm}$)</p> |

Sur les deux ouvertures faites dans les gaines, le coulis a pu être observé. Bien qu'il ne remplisse pas entièrement les gaines, le coulis recouvre parfaitement les torons. Il n'y a pas de traces d'oxydation des torons dans les gaines D et B auscultées.

6.3.2.2. Observation à 90° du coulis et des vides

Pour les deux perçages menant à l'intérieur des gaines, les clichés obtenus à l'aide de l'outil d'observation à 90° sont présentés au tableau 6.53.

Tableau 6.53- Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B2S3 (vues à 90°)

| | |
|--|--|
|  <p>D135, haut de gaine : vide apparent de coulis, traces de ressuage</p> |  <p>D135 : coulis homogène</p> |
|  <p>B35 : présence de vide partiel de coulis ; sur la photographie, la surface supérieure du coulis est très visible, coulis d'apparence homogène</p> |  <p>B35 : la lumière s'introduisant dans la gaine grâce au vide de coulis depuis l'extrémité du segment de poutre est détectée par l'endoscope</p> |

Les clichés à 90° confirment les informations obtenues avec l'observation directe à l'endoscope. Le coulis recouvre les torons et montre du ressuage en surface. Il est remarqué que lorsque la gaine présente du vide de coulis, la gaine métallique se déforme durant le perçage rendant la visibilité sur le prolongement de la gaine moins bonne.

6.3.2.3. Résultats IE

Comme pour le segment de poutre B4S4, les fréquences image de l'épaisseur de la pièce sont attendu à 3 kHz ou en dessous (voir tableau 6.54). La position des gaines variant de 140 à 200 mm en moyenne sur la longueur de la poutre depuis la surface supérieure du segment, la fréquence caractéristique f_{vide} appartient à l'intervalle 9 – 14 kHz.

Les barres d'acier rencontrées lors des perçages sont à peu près à mi-profondeur des gaines par rapport à la surface d'étude. En raison de la présence du vide dans les gaines, les fréquences théoriques attendues pour les gaines sont autour des fréquences théoriques obtenues pour les barres d'acier. Dans un tel cas, il est difficile, si les résultats pratiques suivent la théorie, de localiser les vides de coulis et surtout de les dissocier des barres métalliques.

Tableau 6.54- Valeurs des fréquences théoriques image de l'épaisseur de la pièce

| h (mm) | v_p (m/s) | f_1 (kHz) | f_2 (kHz) | f_3 (kHz) | f_4 (kHz) | f_5 (kHz) | f_6 (kHz) |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1600 | 4000 | 1,18 | 1,83 | 2,39 | 2,51 | 3,01 | 3,14 |

Les résultats obtenus par IE sont reportés aux figures 6.39 à 6.42. Contrairement aux résultats exhaustifs obtenus pour le segment de poutre B4S4, l'état de surface du segment B2S3 n'a pas permis d'acquérir autant d'information.

Les résultats obtenus sont comparés aux résultats obtenus par endoscopies (les zones percées sont représentées par les tirets).

- Gaine B :

Les résultats IE obtenus pour la gaine B sont présentés à la

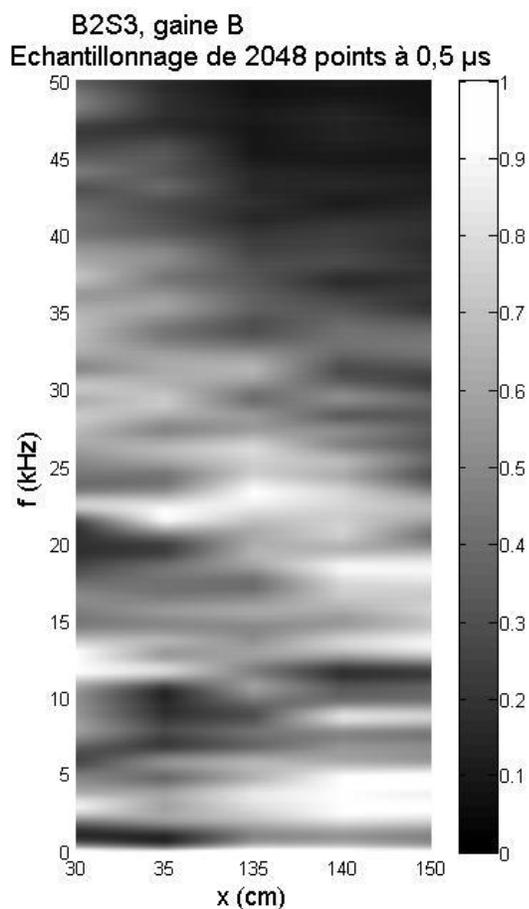


figure 6.39 et un récapitulatif des endoscopies est présenté au tableau 6.55. Pour chaque perçage, la fréquence théorique image de la profondeur d'une barre d'acier passif ou du vide de coulis dans la gaine a été calculée et présentée dans le tableau.

Seuls 5 points d'étude ont pu donner des résultats au-dessus de la gaine B. En effet, la présence de traces de goudron ajouté à une surface très irrégulière a fortement diminué la qualité d'adhérence entre le capteur et la surface.

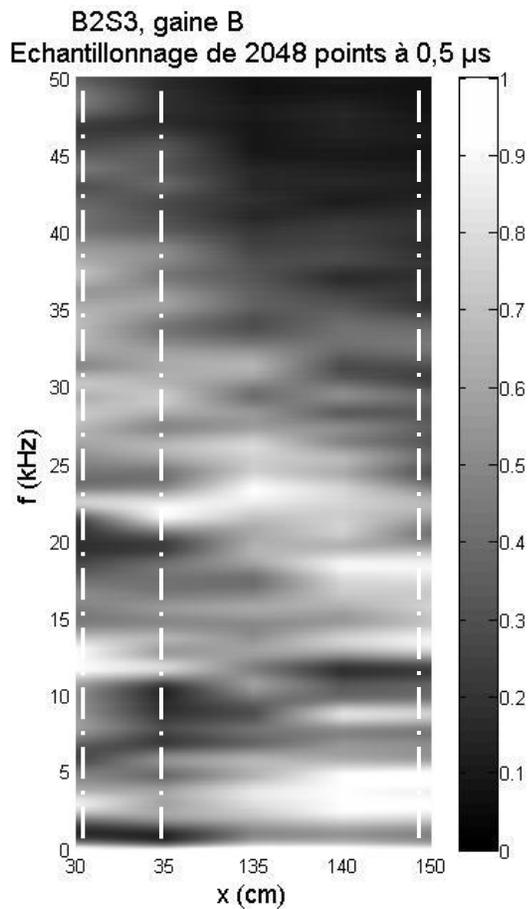


Figure 6.39- Résultats IE du segment B2S3, gaine B

Tableau 6.55- Récapitulatif des résultats obtenus pour la gaine B par endoscopie avec les fréquences théoriques calculées associée

| Cote | Profondeur atteinte p (mm) | Résultats par endoscopie (gaine ou barre rencontrée) | Fréquence attendue (kHz) |
|------|------------------------------|--|--------------------------|
| B150 | 92 | barre | 11 |
| B35 | 170 | gaine | 12 |
| B30 | 68 | barre | 15 |

Un pic de fréquence autour de $3 - 4 \text{ kHz}$ est présent pour toutes les mesures mais son amplitude varie suivant le point d'étude. En raison du peu de nombre de points d'étude, il est difficile de détecter les points de mesures donnant des résultats caractéristiques des gaines ou de barres métalliques. Cependant, il est remarqué que les mêmes fréquences sont sollicitées aux cotes 30 et 35 alors que dans le premier cas le perçage a mené tout droit à une barre et dans le second, il a mené à la gaine. Cela peut être dû à la proximité des deux points d'étude.

- Gaine C :

Les résultats IE obtenus pour la gaine C sont présentés à la figure 6.40 et un récapitulatif des endoscopies est présenté au tableau 6.56.

Tableau 6.56- Récapitulatif des résultats obtenus pour la gaine C par endoscopie avec les fréquences théoriques calculées associée

| Cote | Profondeur atteinte p (mm) | Résultats par endoscopie (gaine ou barre rencontrée) | Fréquence attendue (kHz) |
|------|------------------------------|--|--------------------------|
| C80 | 89 | barre | 11 |
| C75 | 89 | barre | 11 |
| C65 | 88 | barre | 11 |
| C60 | 80 | barre | 13 |

Dans le cas des mesures au-dessus de la gaine C, il a été possible d'obtenir plus de résultats que pour la gaine B car il n'y avait présence de restes de goudron qu'entre les cotes 95 et 110.

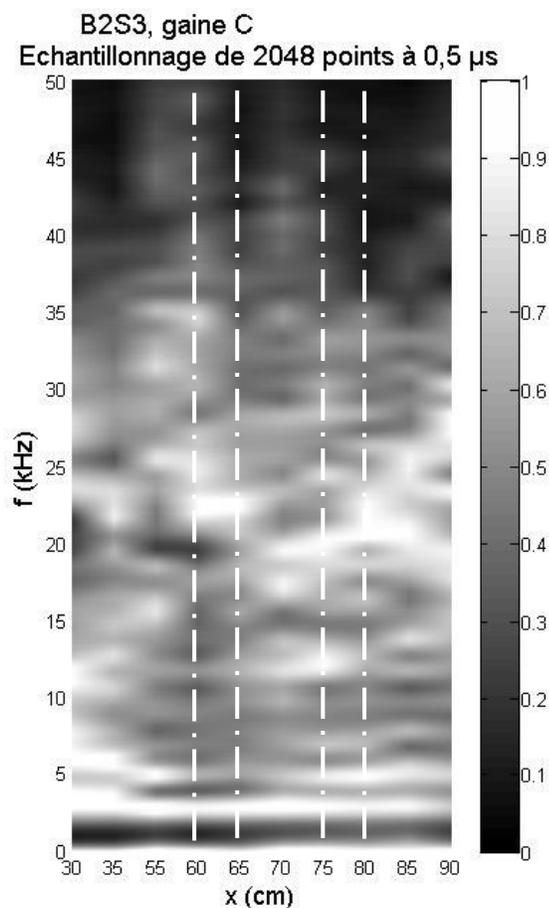


Figure 6.40- Résultats IE du segment B2S3, gaine C

La fréquence image de l'épaisseur de la pièce autour de 3 kHz est présente sur l'ensemble des mesures. En ce qui concerne les autres fréquences excitées, elles se trouvent toutes entre 21 et 23 kHz . Cela représente une profondeur environ équivalente à 90 mm pour un vide et à 45 mm pour de l'acier. Les perçages effectués aux cotes 60, 65, 75 et 80 n'ont pas permis de relever de détails correspondant à des fréquences autour de 22 kHz pourtant présentes sur les résultats IE en ces point. Ces fréquences n'ont pas donc pas pu être identifiées.

- Gaine D :

Les résultats IE obtenus pour la gaine D sont présentés à la figure 6.41 et un récapitulatif des endoscopies est présenté au tableau 6.57.

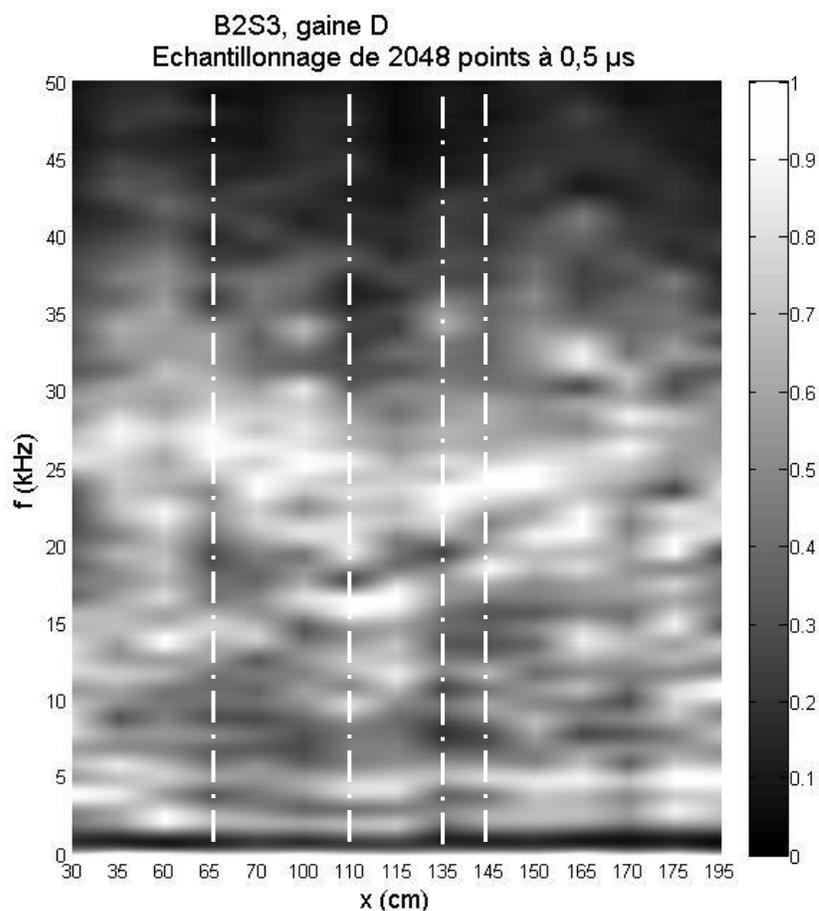


Figure 6.41- Résultats IE du segments B2S3, gaine D

Dans le cas des résultats de la figure 6.41, la fréquence habituellement détectée autour de 3 – 4 kHz n'a pas été relevée ou à très faible amplitude. Sur les 4 trous percés au-dessus de la gaine D, un seul a permis d'atteindre l'intérieur de la gaine. Cependant, suivant les résultats IE obtenus, il n'est pas possible de tirer des informations permettant de détecter

une gaine ou une barre métallique (fréquences théoriques non apparentes dans les résultats, présence de fréquences entre 25 et 30 *kHz*).

Tableau 6.57- Récapitulatif des résultats obtenus pour la gaine D par endoscopie avec les fréquences théoriques calculées associée

| Cote | Profondeur atteinte <i>p</i> (mm) | Résultats par endoscopie (gaine ou barre rencontrée) | Fréquence attendue (kHz) |
|------|-----------------------------------|--|--------------------------|
| D145 | 89 | barre | 11 |
| D135 | 145 | gaine | 14 |
| D110 | 82 | barre | 12 |
| D65 | 85 | barre | 12 |

- Gaine E :

Les résultats IE obtenus pour la gaine E sont présentés à la figure 6.42 et un récapitulatif des endoscopies est présenté au tableau 6.58.

Tableau 6.58- Récapitulatif des résultats obtenus pour la gaine E par endoscopie avec les fréquences théoriques calculées associée

| Cote | Profondeur atteinte <i>p</i> (mm) | Résultats par endoscopie (gaine ou barre rencontrée) | Fréquence attendue (kHz) |
|------|-----------------------------------|--|--------------------------|
| E150 | 90 | barre | 11 |
| E145 | 88 | barre | 11 |
| E140 | 83 | barre | 12 |

Malgré le mauvais état de la surface au-dessus de la gaine E, les mesures IE ont permis d'obtenir un plus grand nombre de résultats comparativement aux autres gaines du segment.

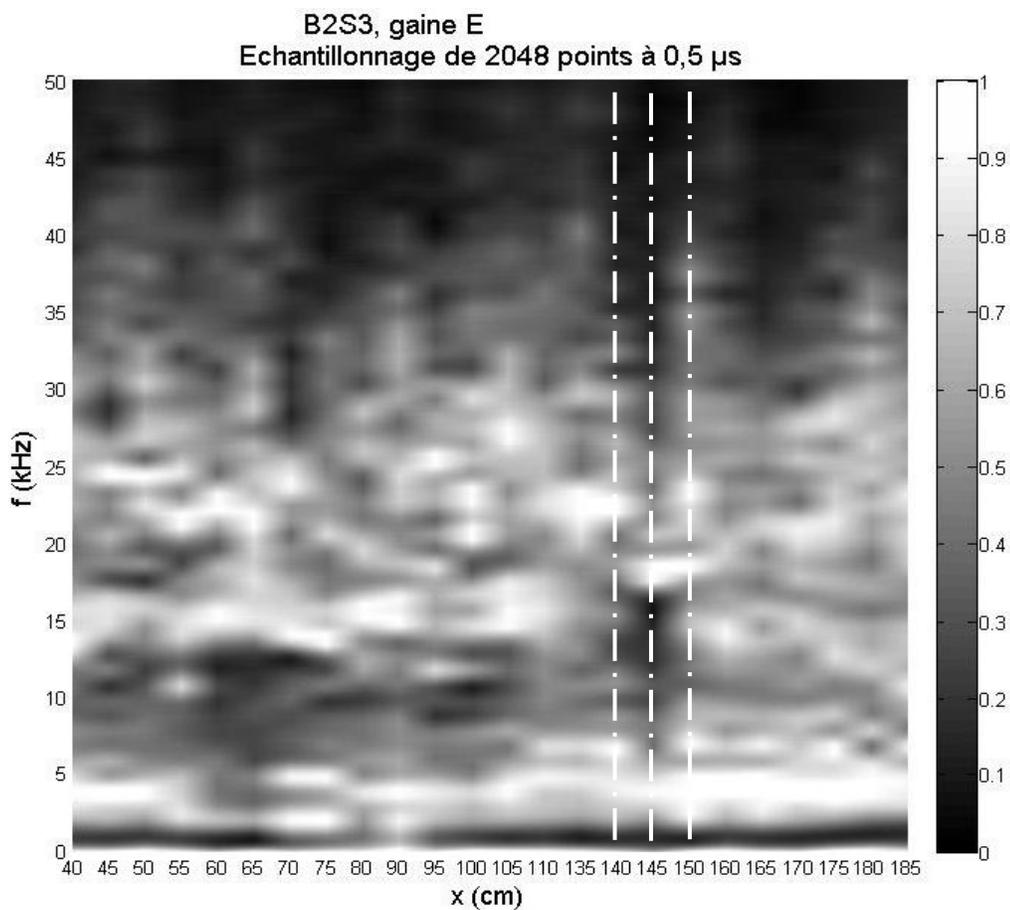


Figure 6.42- Résultats IE du segment B2S3, gaine E

Mise à part entre les cotes 55 et 80, les résultats contiennent tous le pic de fréquence autour de 3 *kHz* image de l'épaisseur de la pièce. Comme pour les mesures IE au-dessus de la gaine D, les fréquences attendues pour la gaine E aux zones percées n'ont pas été trouvées mais d'autres pics ont été mesurés avec des valeurs d'environ 10 *kHz* de plus que celles attendues. Les pics de fréquence détectés 'ont pas été identifiés (hormis le pic autour de 3 *kHz*)

6.3.3. Segments de poutre B4S3 et B2S4

Les résultats des deux derniers segments ne sont pas présentés ici dans leur totalité en raison de la quantité importante de données à présenter. Les segments de poutres B2S3 et B4S4 ont permis de montrer les capacités de l'endoscope et ont exposé les difficultés rencontrées avec la méthode impact-écho. Seuls quelques cas supplémentaires obtenus des segments B4S3 et B2S4 sont donc abordés ici. L'ensemble des résultats obtenus pour les deux segments sont présentés à l'annexe L.

6.3.3.1. Comportement des segments durant les endoscopies

L'observation à l'endoscope a permis d'obtenir des données visuelles sur l'intérieur des gaines du segment B4S3. Il a été possible d'observer un coulis de bonne qualité recouvrant complètement les torons même si un vide de coulis était présent en haut de la gaine (exemple aux tableaux 6.59 et 6.60).

Quant au segment de poutre B2S4, celui-ci n'a pas permis d'obtenir des résultats endoscopiques concrets de l'intérieur des gaines car les perçages n'ont pas abouti à l'intérieur de celles-ci.

Tableau 6.59- Observation à l'endoscope à la cote B160 (B4S3)
 (A gauche : observation directe; à droite : observation à l'aide de l'outil à 90°)

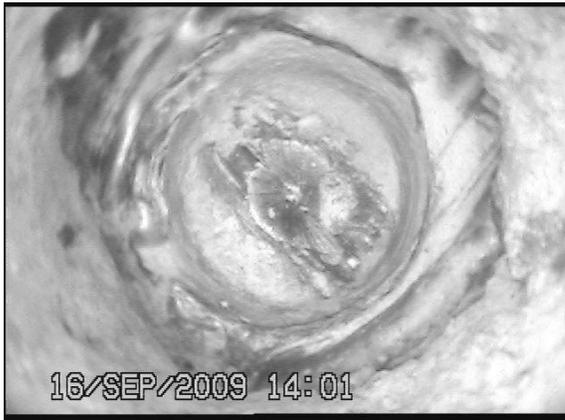
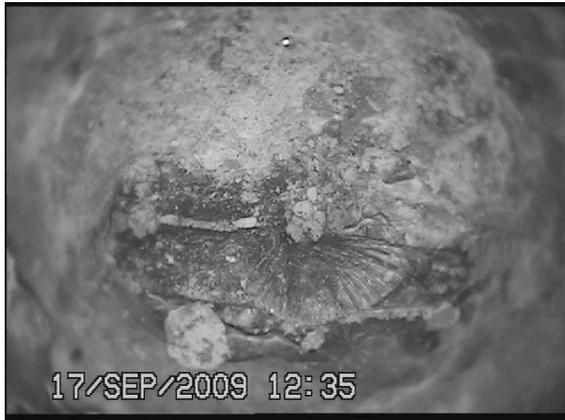
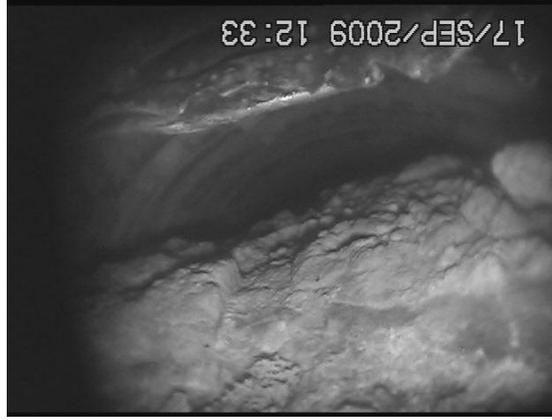
| | |
|--|--|
|  <p>16/SEP/2009 14:01</p> |  <p>16/SEP/2009 14:00</p> |
| <p>B160 : gaine perforée avec torons apparents <i>(p = 128 mm)</i></p> | <p>B160 : coulis homogène avec marque de ressuage sur le dessus (à gauche) ; remplissage incomplet de la gaine</p> |

Tableau 6.60- Observation à l'endoscope à la cote C60 (B4S3)
 (A gauche : observation directe; à droite : observation à l'aide de l'outil à 90°)

| | |
|--|--|
|  <p>17/SEP/2009 12:35</p> |  <p>17/SEP/2009 12:33</p> |
| <p>C60 : gaine perforée avec torons apparents <i>(p = 164 mm)</i></p> | <p>C60, haut de gaine : le coulis recouvre les torons mais il y a présence d'un vide de coulis ; fort ressuage observé</p> |

6.3.3.2. Comportements des segments avec l'impact-écho

Bien que l'impact-écho n'ait donné de résultats concrets sur l'état de remplissage des gaines, il a tout de même été possible de remarquer un comportement distinctif pour le segment de poutre B4S3. En effet, le segment présentant un plan de fissurations important sur le dessus des gaines (voir figure 5.27), il a été possible de remarquer l'influence que cela a apporté aux résultats IE.

La figure 6.43 présente les résultats obtenus pour les essais IE au-dessus de la gaine A. La plupart des pics de fréquence varient entre 15 et 25 *kHz*. Si ces pics sont images d'un vide, ils se trouvent au-dessus du plan des gaines (dont les fréquences sont attendues en-dessous de 16 *kHz*, voir tableau 6.61). De plus, même si leurs valeurs varient, les pics se suivent les uns par rapport aux autres. Cela montre une continuité dans le défaut détecté même si sa profondeur varie le long du segment de poutre. Ce comportement est caractéristique de la présence d'un plan de fissuration au-dessus de la gaine A.

Cette observation a été la plus flagrante pour la gaine A en raison de la taille des fissures et de leur nombre au niveau de cette gaine en comparaison des autres. Toutefois, il a été possible d'observer le même phénomène pour les essais IE au-dessus des gaines B et C mais de façon plus ponctuelle.

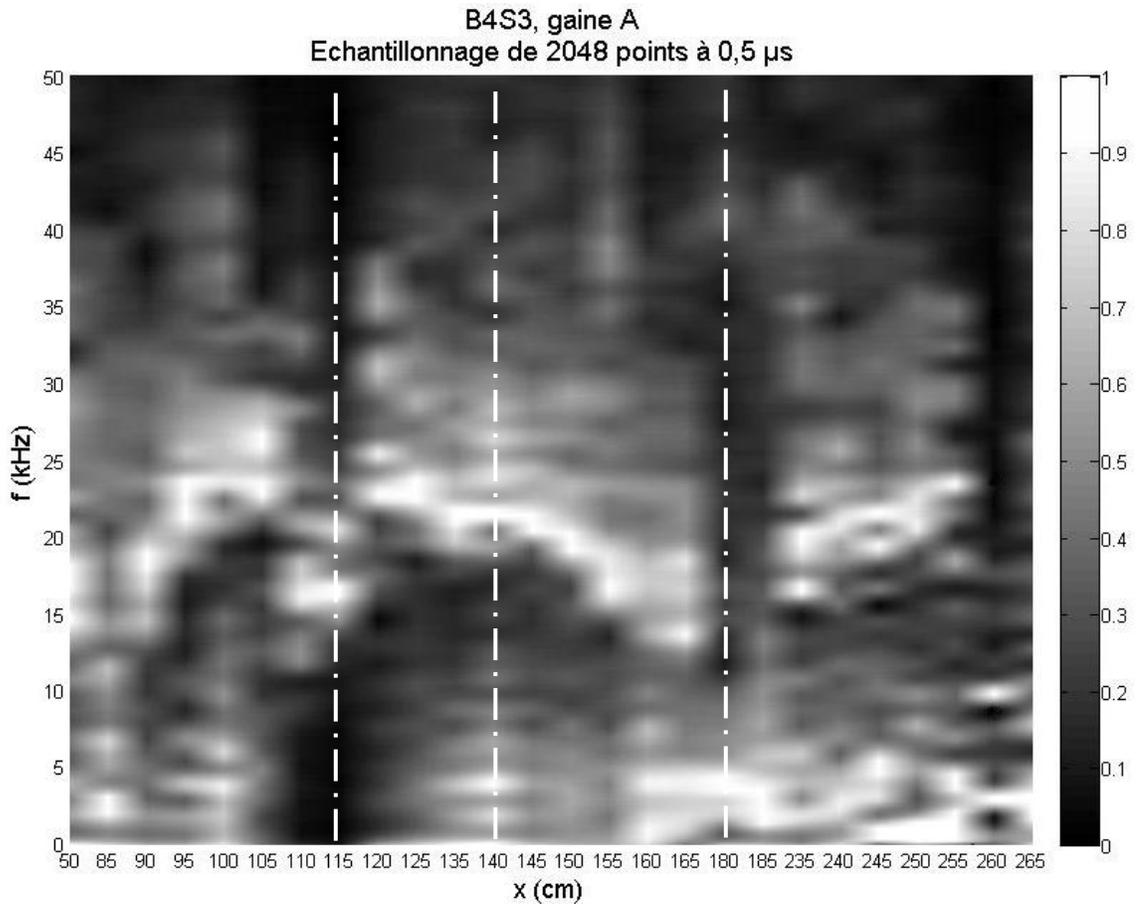


Figure 6.43- Résultats IE du segment B4S3, gaine A

Tableau 6.61- Récapitulatif des résultats obtenus pour la gaine A par endoscopie avec les fréquences théoriques calculées associée

| Cote | Profondeur atteinte p (mm) | Résultats par endoscopie (gaine ou barre rencontrée) | Fréquence attendue (kHz) |
|------|------------------------------|--|--------------------------|
| A215 | 72 | barre | 11 |
| A180 | 113 | gaine | 14 |
| A140 | 73 | barre | 11 |
| A115 | 128 | gaine | 12 |

En ce qui concerne le segment de poutre B2S4, la qualité de la surface d'étude a permis de collecter un nombre très important de données lors des mesures IE. Cependant, les diagrammes obtenus n'ont pas permis de discerner la qualité d'injection des gaines. Une observation générale a été faite sur l'atténuation des pics de fréquences au-dessus de 15 kHz pour les gaines éloignées des bords du segment. Cela prouve l'importance des effets de bords et l'incidence que cela peut avoir sur l'interprétation des résultats IE.

6.3.4. Observations par tests destructifs

Après les essais IE et d'endoscopies, les segments de poutre ont été soumis à des découpes afin de pouvoir identifier l'état actuel du coulis et des torons. Il y a aussi eu carottage des segments de poutre étudiés par IE afin de pouvoir estimer la vitesse de propagation v_p dans le béton de chaque élément (exemple figure 6.44).



Figure 6.44- Carottes obtenues du segment de poutre B2S4

La partie destructive des essais a consisté à effectuer des découpes autour des gaines afin de pouvoir les extraire pour en observer le contenu. D'autres découpes ont été effectuées sur

les ancrages afin d'atteindre l'arrière des têtes d'ancrage pour pouvoir en observer l'état ainsi que la qualité de remplissage du coulis.

6.3.4.1. Opérations sur les gaines

Il n'a pas été simple de retirer les gaines de l'intérieur des blocs : en plus d'une scie circulaire pour effectuer la découpe principale du béton autour des gaines choisies (une à deux gaines par segment de poutre), l'emploi d'un marteau piqueur et de masses afin d'éliminer le béton restant a été inévitable (exemple à la figure 6.45). De ce fait, l'état de fissuration du coulis à l'intérieur des gaines n'a pu être jugé par la suite.



Figure 6.45- Récupération de la gaine E du segment de poutre B4S4

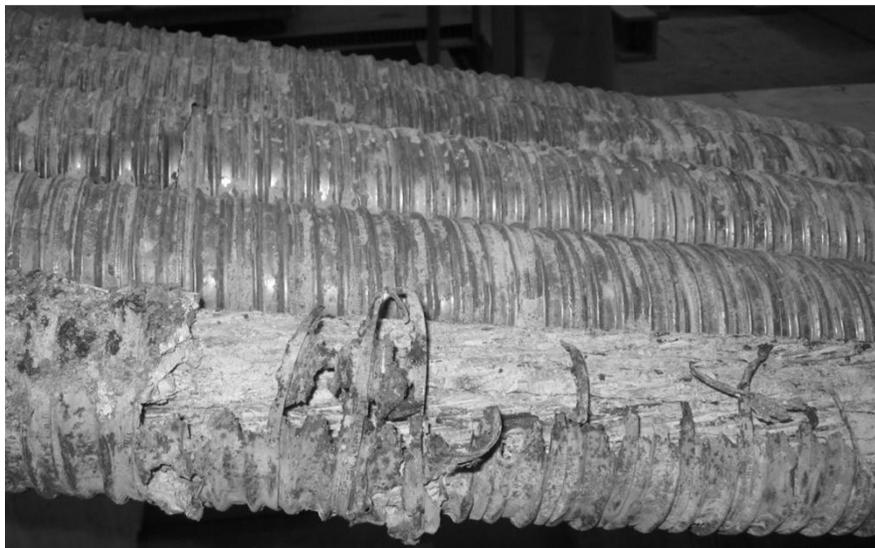


Figure 6.46- Gaines récupérées sur les segments de poutre

Note : Au premier plan, la gaine A du segment B2S3 : la gaine est fortement désagrégée.

Une fois les gaines extraites des segments, elles ont été emmenées au laboratoire de l'université afin de pouvoir les ouvrir. D'un point de vue général, toutes les gaines présentaient un aspect extérieur sain mis à part la gaine A du segment B2S3 (qui n'a pas pu être étudié par IE). En effet, lors de la démolition de l'échangeur, la poutre a subi de nombreux dommages au niveau du tablier du côté de la gaine A sur le segment B2S3. Lors du dégagement de la gaine, une grande ouverture de celle-ci a été constatée au niveau du milieu du segment de poutre (voir figure 6.46, au premier plan).

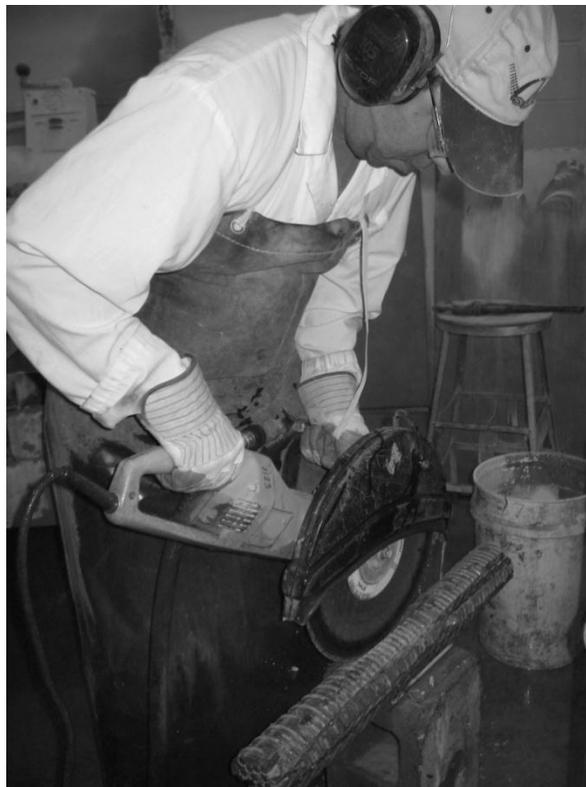


Figure 6.47- Ouverture de la gaine B2S4F de la cote 150 à 210

Au laboratoire de l'université, une gaine par segment de poutre a été ouverte sur une portion de 60 à 80 *cm* à l'aide d'une scie circulaire (figure 6.47).

Toutes les gaines ont présenté le même aspect sain à l'intérieur mis à part pour la gaine B2S3A. Un exemple de la coupe de la gaine B4S4E est donné à la figure 6.48. Il est possible d'observer le coulis : son homogénéité est bien confirmée (ce qui avait été remis en doute à la sous-section 6.3.1). Quant à la qualité de l'injection autour des torons, il est possible d'observer que l'injection enrobe bien les torons, ce qui est confirmé par la figure 6.49. Toutefois, il est possible d'observer sur la figure 6.50 que le coulis ne s'est pas inséré dans tous les interstices entre les fils des torons.

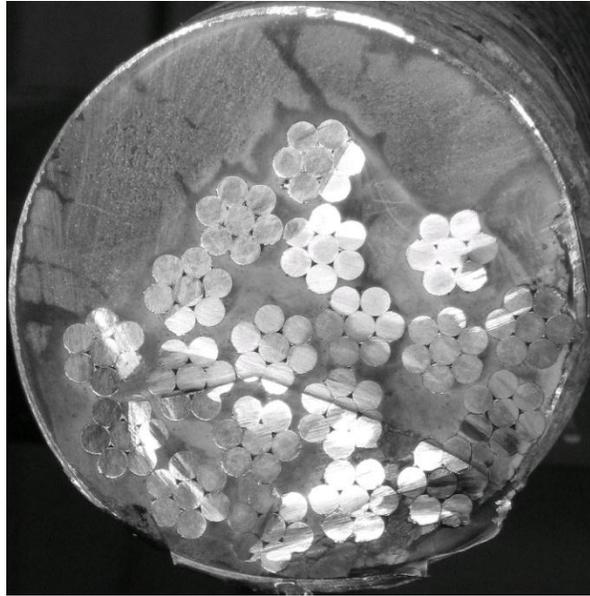


Figure 6.48- Section de la gaine B4S4E à la cote 110

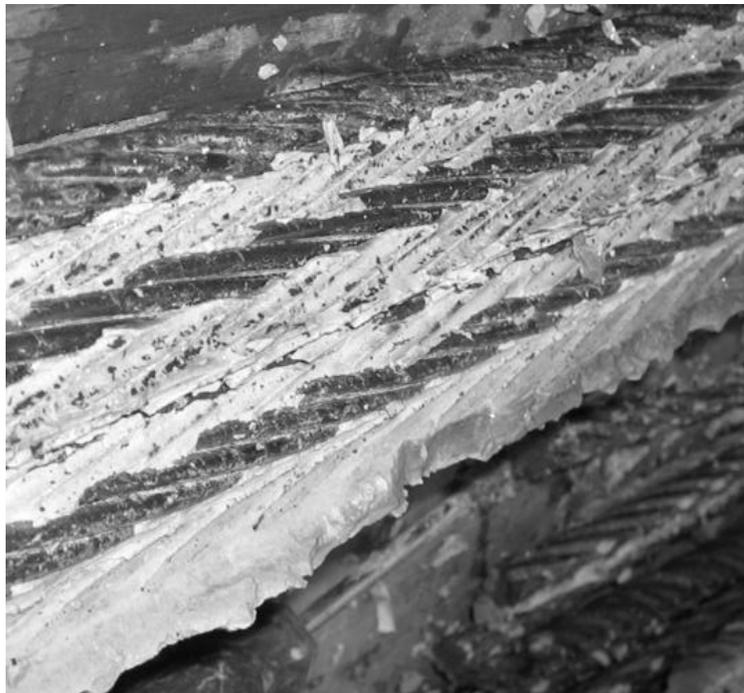


Figure 6.49- Observation de la qualité d'injection autour des torons (gaine B2S4F)

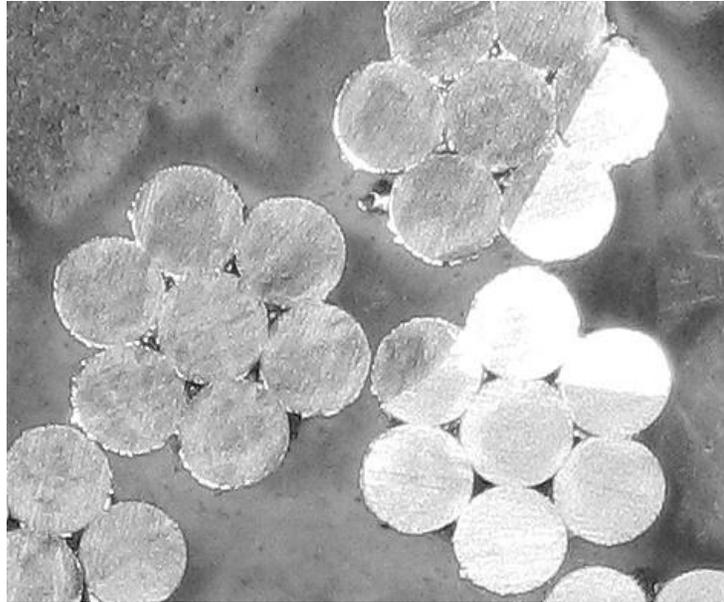


Figure 6.50- Zoom sur le « cœur » des torons à la coupe B4S4E110

La gaine B2S3A présentant une zone très abimée, son comportement moment de sa découpe s'est différencié des autres gaines. Effectivement, les torons se sont désolidarisés très rapidement du coulis (voir figure 6.51, après découpe). De plus, les torons situés dans le haut de la gaine montrent des traces de corrosion (figure 6.52).



Figure 6.51- Découpe de la gaine B2S3A à la cote 120

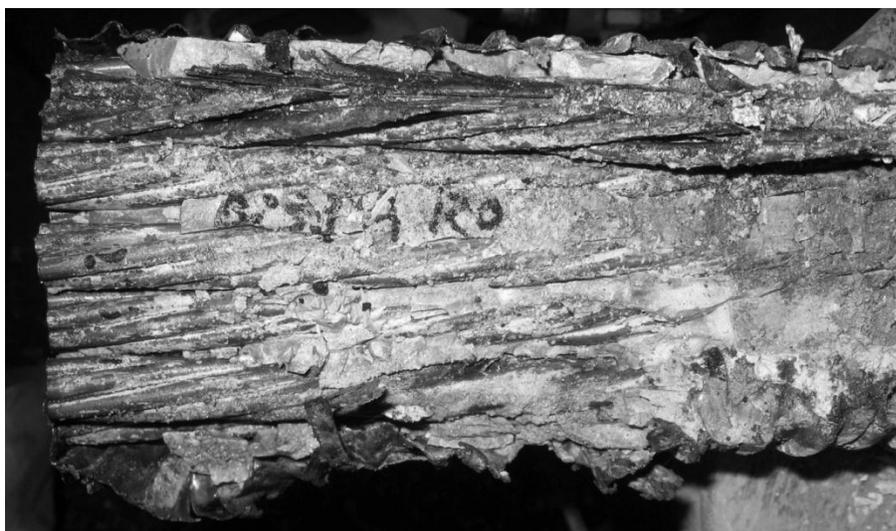


Figure 6.52- Vue de l'intérieure de la gaine B2S3A

Enfin, l'ouverture des gaines a pu confirmer les résultats obtenus par observation du coulis par endoscopie. En effet, les figures 6.53 et 6.54 montrent la différence de couleur existant entre les coulis mais aussi la présence de ressuage dans le haut des gaines.



Figure 6.53- Échantillons de coulis récupérés à l'intérieur de la gaine B4S3A entre les cotes 75 et



Figure 6.54- Echantillons de coulis de la gaine B4S4E entre les cotes 110 et 180

6.3.4.2. Ouverture des ancrages

Les têtes d'ancrages ont été désolidarisées de la section de béton afin d'observer la composition du coulis et la qualité d'enrobage des ancrages. Ce sont les segments B2S7 B2S2 et B4S1 qui ont été ainsi examinés.

Deux têtes d'ancrages ont été désolidarisées sur le segment B2S7 (figure 6.55). Il a été constaté que deux coulis avaient été injectés : les deux coulis visibles présentaient une limitation suggérant un remplissage en deux temps avec deux couleurs de coulis différentes (figures 6.56 et 6.57). L'examen de l'arrière de l'ancrage situé au bas du segment de poutre B2S7 montre que les deux coulis n'ont pas permis de remplir l'ensemble de l'ancrage; les torons au centre de la tête d'ancrage sur le niveau séparant les deux coulis a empêché la propagation du second coulis (couleur foncé) en un endroit.



Figure 6.55- Ouverture de deux des ancrages du segment de poutre B2S7



Figure 6.56- Arrière de l'ancrage situé en haut du segment de poutre B2S7



Figure 6.57- Arrière de l'ancrage situé au bas du segment de poutre B2S7

Excepté pour le vide de coulis qui aurait pu être évité avec un remplissage unique, le remplissage en deux temps des ancrages n'a pas porté préjudice à leur état. En effet, l'ensemble des torons des deux têtes d'ancrage examinées sont en bon état.

Les deux autres segments de poutre examinés (figures 6.58 et 6.59) montrent un remplissage adéquat derrière les têtes d'ancrage en une seule étape. Les fissures observées dans le coulis proviennent de l'opération de désolidarisation des têtes d'ancrage. En effet, il n'a pas été aisé d'ouvrir les ancrages en raison du béton et des barres d'acier présentes autour des têtes. Lors de l'ouverture de l'ancrage sur le segment B4S1, le coulis dans le bas de la tête d'ancrage s'est abîmé. De même, le coulis dans le haut de la tête d'ancrage du segment B2S2 montre des dégâts dus à la découpe de la tête. De plus, pour cette dernière, la plaque de la tête d'ancrage est restée solidaire du béton (ce qui n'a pas empêché l'observation du coulis et de l'intérieur de l'ancrage étudié).



Figure 6.58- Tête d'ancrage ouverte en bas du segment B4S1



Figure 6.59- Tête d'ancrage ouverte au bas du segment de poutre B2S2

Note : la variation de couleur du coulis provient de la présence d'humidité en raison de la découpe à la scie refroidie avec de l'eau.

D'un point de vue global, que ce soit pour un remplissage unique ou dans le cas d'un remplissage en deux étapes, les torons ont montré un très bon état à l'intérieur des têtes d'ancrages.

Conclusion

Ce document avait pour but de présenter deux méthodes d'investigation, l'une non destructive et l'autre semi-destructive et, de préciser la plage pratique de leur utilisation dans le cas d'ouvrages complexes, en particulier, des poutres massives en béton, précontraintes à l'aide de la post-tension.

Le mémoire débute d'abord par une revue des méthodes non destructives puis se porte sur l'investigation d'éléments en béton de géométrie relativement simple (plaques et blocs de béton) puis finalement sur des segments de poutres.

Ce chapitre clôt l'étude en mettant en évidence les résultats concrets obtenus puis identifie les avenues et perspectives de recherche. D'abord un bref retour sur les résultats obtenus au chapitre 6 est présenté aux paragraphes qui suivent.

Retour sur les mesures Impact-Echo :

Un résumé des résultats obtenus à partir de la méthode Impact Echo en laboratoire (tableau 6.62) et sur les segments de poutre (tableau 6.63) est présenté ci-après.

Les résultats sur les plaques (tableau 6.62) ont montré globalement que peu importe le type de remplissage des gaines introduites dans les plaques (PL1, PL2 ou PL3), il était possible de retrouver la fréquence (f_1^* et Δf_1) caractérisant la profondeur de la pièce. Dans ce cas cependant, le décalage de cette fréquence (Δf_1) était moins important que prévu (de l'ordre de 30 % plutôt que 40 % attendu). Le deuxième constat concerne le nombre élevé de fréquences excitées par rapport aux fréquences attendues pour la plage de fréquence comprise entre 0 – 20 kHz alors qu'il n'a pas été possible de mettre en évidence, dans le spectre de fréquences obtenues, les pics de fréquence plus élevés notamment ceux correspondants à f_{acier} et f_{vide} .

Cette situation semble provenir du fait de la géométrie des plaques qui, bien que simple, ne correspond pas aux conditions usuelles de base de la méthode Impact Echo, conditions qui s'apparentent à une plaque semi infinie dans deux directions. La géométrie proposée dans l'étude semble amener un nombre important de réflexions du signal dans la pièce ce qui

semble favoriser les fréquences plus basses (0 – 20 kHz) et masquer les fréquences plus élevées (20 – 40 kHz).

Tableau 6.62 - Retour sur les mesure IE pour les échantillons en laboratoire

| Echantillon | | Etude | Fréquences attendues | Fréquences obtenues | Nombre de pics attendus | Nombre de pics obtenus | Observations générales | Caractéristiques différentes relevés |
|-------------|----|-------------------|----------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|---|--|
| Plaques | | PL1 PL2 PL3V PL3B | 6 – 40 kHz | 3 – 20 kHz | 3 | 8 | <ul style="list-style-type: none"> - Δf_1 est observé pour toutes les plaques - f_1^* et f_2^* ont été identifiées - f_{acier} et f_{vide} n'apparaissent pas dans les résultats - les pics relevés pour un type de plaque se retrouvent pour les trois autres types de plaque - nombre de pic important en raison de la géométrie des plaques - Δf_1 est de 30% (contre 40% estimé en théorie) | <ul style="list-style-type: none"> - les deux premiers pics dus aux ondes de cisaillement diminuent en amplitude lorsque la gaine est remplie (PL1 et PL2) - les diagrammes obtenus pour PL2 diffèrent: f_2^* est décalé, l'ensemble des pics ont une amplitude plus faible (sauf f_1^*) |
| Bloc A | | AV | 3 – 9 kHz | 2 – 10 kHz | 6 | 20 | <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur 2: toutes les fréquences sont obtenues mais beaucoup d'autres sont présentes avec un pic prédominant non identifié | <ul style="list-style-type: none"> - épaisseurs: l'état de remplissage de la gaine est prédominant sur la valeur en fréquence des pics; il y a un décalage visible de certains pics - mesure AH: f_1 n'est pas observé |
| ep.2 | AH | 2 – 7 kHz | 7 | | | | | |
| | | 1,5 – 7 kHz | 5 | 15 | | | | |

Tableau 6.62 (suite et fin)- - Retour sur les mesure IE pour les échantillons en laboratoire

| Echantillon | | Etude | Fréquences attendues | Fréquences obtenues | Nombre de pics attendus | Nombre de pics obtenus | Observations générales | Caractéristiques différentes relevés |
|-------------|--|----------|----------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|--|--|
| | | | | | | | | |
| Bloc B | | BV BH BB | 3 – 9 kHz | 2 – 10 kHz | 7 | 17 | <ul style="list-style-type: none"> - les pics sont identiques entre gaine vide et gaine pleine jusqu'à 9 kHz - seules les trois premières fréquences f_1^*, f_2 et f_3 sont facilement identifiable - la géométrie de la pièce ajoutée à la présence de la gaine augmente le nombre de pics présents: éloignement d'une étude simplifiée - dédoublement du pic f_1^* | <ul style="list-style-type: none"> - influence du type de remplissage de la gaine sur la mesure de l'épaisseur du bloc |
| Bloc C | | CA | 3 – 18 kHz | 2 – 19 kHz | 2/3 | 15 | <ul style="list-style-type: none"> - gaine CA: f_2^* est de même valeur que f_{acier}, f_{vide} est présent tout le temps - gaines CC et CD: seul f_1^* est facilement identifiable; la proximité des deux gaines et les effets de bords perturbent beaucoup les signaux | <ul style="list-style-type: none"> - gaines CA et CB: il existe un décalage sur f_1^* entre les mesures faites pour gaine vide et gaine pleine - gaine CA: présence d'un pic à 5 kHz environ pour la gaine pleine jusqu'à 15% de vide (graphique 3D "mis à plat") - gaine CB: présence d'un pic à 8 kHz environ pour la gaine vide jusqu'à 80% de vide (graphique 3D "mis à plat") |
| | | CB | 3 – 13 kHz | 1,5 – 14 kHz | | 17 | | |
| | | CC | 3 – 9 kHz | | 3 | 22 | | |
| | | CD | 2 – 13 kHz | | | 21 | | |

Il n'a donc pas été possible de dégager une différence notable dans les spectres de fréquence obtenus par rapport au fait que les gaines puissent être vides ou comblées de coulis. Tout au plus, une baisse d'amplitude des pics de fréquence a été notée dans le cas de plaques avec une gaine comblée de coulis et avec barres d'acier (plaque PL2).

Les résultats obtenus sur des pièces encore plus massives, les blocs de béton au tableau 6.62, on permit d'obtenir de nouvelles observations. Malgré le nombre important de pics obtenu lors des mesures (allant jusqu'à 22 pics) en raison des effets de bord mais aussi dus à la présence de la ou des gaines dans l'échantillon, certains comportements ont observés.

En effet, lors de l'étude des blocs, il a été remarqué que les pics de fréquence relatifs à l'épaisseur des échantillons étaient influencés par la présence des gaines. Par exemple, pour le bloc B, les fréquences supérieures à 9 kHz se répercutent différemment entre les cas de mesures au-dessus de la gaine dans la zone de vide important comparé à la zone de remplissage complet de la gaine.

Toutefois, il est difficile d'obtenir toutes les fréquences relatives à l'épaisseur de la pièce pour les blocs. En effet, la complexité des échantillons amène souvent à l'identification des trois premières fréquences f_1^* , f_2 et f_3 uniquement, et ce dans les cas les plus favorables. Seule la mesure de l'« épaisseur 2 » effectuée sur le bloc A permet l'observation de toutes les fréquences relatives à l'épaisseur de la pièce. Ce cas particulier fait ressortir l'importance des effets de bord puisque la mesure de l'« épaisseur 2 » a été pratiquée sur le flan du bloc A, augmentant les proportions semi-infinies du bloc dans deux directions (la troisième direction, la plus faible dimension, étant l'épaisseur mesurée).

En ce qui concerne les différences de comportement fréquentiel de mesures relatives au type de remplissage des gaines, le traitement post-opératoire actuel des mesures n'est pas apte à différencier les gaines dont le remplissage de coulis est insuffisant des autres gaines. Cependant, comme précisé un peu plus tôt, le comportement des pics de fréquence est caractérisé par le type de remplissage des blocs (exemple du bloc B). De plus, il a été possible d'observer un comportement type pour les deux gaines les plus proches de la surface d'étude des blocs. En effet, les gaines CA et CB ont montré des résultats distinctifs en fonction du remplissage des deux gaines. La gaine CA a présenté un pic constant à 5 kHz sur les mesures effectuées au-dessus de la gaine complètement remplie de coulis.

Inversement, la gaine CB a présenté un pic contant à 8 kHz sur les mesures effectuées au-dessus de la gaine complètement vide de coulis.

Tableau 6.63- Retour sur les résultats IE des échantillons *in-situ*

| Echantillon | f fond de pièce | Fréquences attendues | Observations |
|----------------------|----------------------|----------------------------|---|
| B4S4 (point bas) | $\sim 3 \text{ kHz}$ | f_{acier} 11 – 16 kHz | - gaines B et A: il y a correspondance entre IE et endoscopies pour la position des barres et des gaines - gaine B: les barres d'acier perturbent les résultats IE (fréquence attendue pour la gaine) au niveau des barres mais aussi à proximité -gaine C: le diagramme IE est "aplati"; aucune réponse identifiée au-dessus de 5 kHz |
| B2S3 (point haut) | | f_{vide} 9 – 14 kHz | - surface d'étude difficile à ausculter en raison des irrégularités de surface présentes à cause de la suppression du goudron (différence avec un point bas); - $p_{vide} \sim 2 \times p_{barre}$ donc f_{vide} est très proche de $f_{barre} \Rightarrow$ gaine B: les résultats IE sont similaires pour les barres et la gaine; - gaines C, D et E: présence de fréquences non identifiées au-dessus de 20 kHz |
| B4S3 (point haut) | | f_{vide} 8 – 16 kHz | - gaine A: absence du pic image de la profondeur et mise en évidence du plan de fissuration; - gaine B et C: le pic image de la profondeur est présent par intermittence et le plan de fissuration est toujours identifiable sur le graphique |
| B2S4 (point bas) | | f_{acier} 10 – 13 kHz | comportement identique aux relevés IE du segment B4S4 gaines D et E: le diagramme est "aplati"; il n'apparaît que la fréquence image du fond de la pièce. |

Les résultats IE obtenus pour les segments de poutres (tableau 6.63) présentent des résultats intéressants quant au potentiel de l'étude IE pour les poutres massives précontraintes. En effet, même si les pics de fréquences obtenus n'ont pas été identifiés, il a été possible de faire différents constats sur le spectre de fréquence obtenus. Ainsi, une différence de

réponse a été observée entre les gaines situées près d'un bord libre de la poutre et celles plus au centre de la section, ainsi que des différences sur les résultats selon la qualité de la surface étudiée et la présence de fissures. En effet, pour les blocs B2S4 et B4S4 (les deux points bas), les gaines D et E pour le premier bloc et la gaine C pour le second bloc ont produit des digrammes de réponse en fréquence très « aplatis » ; en comparaison aux autres gaines des deux blocs qui étaient plus proches des bords des segments de poutre qui ont donné des diagramme de réponse en fréquence bien plus disparates. Quant au point haut B4S3, il a clairement permis d'identifier la fissure longitudinale le parcourant en un plan parallèle au plan des mesures IE effectuées sur l'échantillon.

Cela semble démontrer que la méthode d'étude Impact-Echo peut être en mesure de détecter des défauts et la présente des gaines pour les éléments massifs précontraints. Toutefois l'interprétation des mesures basée sur le spectre de fréquences ne semble pas en mesure de fournir assez d'information pour une interprétation suffisamment précise. Des méthodes plus raffinées d'interprétation du signal devront être examinées et développées pour l'étude d'éléments massifs.

Retour sur les endoscopies :

L'endoscopie a d'abord été utilisée sur un bloc fabriqué en laboratoire (bloc B) puis sur divers segments de poutre. En ce qui concerne le bloc B, la gaine a été auscultée depuis son extrémité libre de coulis. Cette étude par endoscopie a permis d'observer parfaitement l'intérieur de la gaine. Il n'y a eu aucune difficulté quant à l'interprétation des résultats.

Dans le cas des segments de poutre, c'est-à-dire dans le cas d'endoscopie de type *in-situ*, le perçage des gaines demande une attention particulière afin de percer la gaine mais ne pas abîmer son contenu (torons et coulis). Il peut être parfois difficile d'arrêter le perçage au-delà de la gaine mais avant l'atteinte par le foret des torons. À cet égard, il existe des dispositifs coupe-circuit qui interrompent le perçage au premier contact avec la gaine métallique pour palier à ce problème.

Le choix des zones de perçage doit également être fait avec minutie. De façon générale, dans le cas de mesures *in-situ*, la localisation des gaines peut demander un temps important : lecture des plans de construction de l'ouvrage ausculté et positionnement précis des gaines à l'aide d'appareils de détection, un radar par exemple.

Lors des endoscopies, certaines observations peuvent être difficiles après les perçages en raison de la présence de poussières au fonds de l'ouverture. En effet, sans des outils adaptés pour expulser les poussières dues au perçage, l'observation de l'intérieur de la gaine n'est pas possible. Ainsi, un compresseur à air est nécessaire. Il doit être accompagné d'une « rallonge » (un fin tube métallique était utilisé lors des essais) qui permet d'aller jusqu'au fond du perçage afin de dégager l'ensemble des poussières.

Le fait de dégager ainsi les poussières permet d'en extraire une grande partie par l'ouverture du perçage, mais il n'est pas exclu que certaines poussières se déplacent plus loin dans la gaine (si il y a un vide de coulis). Il faut donc porter une attention particulière à l'interprétation des clichés endoscopiques obtenus pour ne pas conclure de façon erronée sur le remplissage de la gaine.

L'utilisation de l'endoscope seul combiné à l'utilisation de l'outil d'observation à 90° est une combinaison idéale afin de garantir une bonne interprétation des résultats obtenus. En général, la fibre optique est utilisée seule afin d'observer les torons s'ils sont dégagés du coulis dans la gaine et l'outil d'observation à 90° permet de vérifier l'état du coulis sur la section de la gaine étudiée.

Finalement, il est important de préciser que les études par endoscopie sont des études très locales. Il est alors important d'établir un plan d'intervention et d'auscultation par endoscopie qui comprend un nombre de points de mesure suffisant afin d'être en mesure de porter un regard critique sur la condition de la structure. Ce plan d'auscultation pourra varier en fonction de plusieurs critères dont le type de la structure, son état de dégradation, ces conditions d'exposition aux sels déglaçants, etc.

Conclusion générale :

De toutes les méthodes non destructives existantes pour l'évaluation d'un ouvrage précontraint par post-tension, seules trois d'entre elles ont été véritablement mises en avant pour l'étude des éléments massifs : l'impact-écho, la radiographie et le monitoring. La dernière méthode citée avait été écartée en raison de l'impossibilité de l'appliquer au sujet d'étude à disposition (les segments de poutres). La radiographie demandant généralement une mise en œuvre importante et des aspects de sécurité non négligeables, l'étude s'est portée sur la méthode impact-écho. Son application à l'étude de la précontrainte par post-tension a été examinée.

Les études antérieures (voir bibliographie) portant sur l'application de la méthode impact-écho décrivaient les capacités de la méthode ainsi que ses limites. Or, dans la littérature abordant la méthode IE, les limites mises de l'avant étaient que l'écart des dimensions des échantillons étudiés, par rapport à un corps d'épreuve dont les dimensions peuvent être jugées semi infinies dans deux directions, faisait croître le nombre de fréquences excitées et donc le nombre de pic de fréquences obtenues sur les diagrammes des résultats (spectre de fréquences). Cela a été remarqué lors des essais IE au fur et à mesure de l'augmentation de la section des échantillons étudiés (passage des plaques vers les blocs puis vers les segments de poutres en béton). D'ailleurs, la complexité croissante des corps d'épreuve fabriqués en laboratoire avait été choisie afin de se rapprocher des conditions d'étude des segments de poutres.

L'augmentation du nombre de pics de fréquence lors du dépouillement des résultats IE a fait ressortir le fait qu'en plus d'obtenir un plus grand nombre de pic de fréquences, une superposition des fréquences excitées est apparue rendant impossible l'identification des pics f_{acier} et f_{vide} . De plus, certaines fréquences ayant de grandes amplitudes ont masqué les signaux des deux fréquences d'intérêt citées précédemment. Cela a aussi été remarqué pour les plus petits échantillons étudiés (les plaques Pl_i) en raison des dimensions en cause ($165mm \times 360mm \times 400mm$) ayant entraîné des effets de bords importants. En effet, tels

que mentionné, aucun des corps d'épreuve étudiés (plaque : $165\text{mm} \times 360\text{mm} \times 400\text{mm}$, bloc : $500\text{mm} \times 500\text{mm} \times 1500\text{mm}$) n'a pu être associés à un échantillon de dimensions « semi-infini », échantillon à la base de la méthode IE énoncée par Mary J. Sansalone [31].

Cependant, même si les pics théoriques n'ont pas été identifiés lors de l'analyse des essais IE, l'étude du bloc C a permis de distinguer l'état de remplissage de certaines gaines. En effet, les deux gaines (CA et CB) des échantillons du Bloc C localisés les plus près de la surface d'étude (10 et 15 cm de profondeur) ont permis de faire ressortir des pics de fréquence présents uniquement pour un vide de coulis inférieur à 20% ou supérieur à 80% de la section de la gaine *i.e* pour une gaine relativement pleine (comblée de coulis entre 100% et 80% de la section de la gaine) ou presque vide (les vides représentant entre 80 et 100% de la section de la gaine) Cela démontre qu'une réponse IE sur l'étude du remplissage de coulis d'une gaine dans un élément massif peut être possible lorsque certaines conditions sont respectées. Dans le cas du bloc C, les dimensions de ce bloc sont celles qui s'apparentent le plus à un élément de dimension semi infinie ($500\text{mm} \times 900\text{mm} \times 1600\text{mm}$) et les gaines CA et CB sont celles les plus près de la surface de mesure. Il est probable que les gaines CC et CD se soient mutuellement influencées et aient induit des effets interférences étant donné leur proximité.

Les dimensions des pièces étudiées a donc fortement influencé la difficulté d'interprétation des résultats. En effet, la difficulté de l'IE réside dans l'analyse des résultats et il est nécessaire d'approfondir le traitement des données comme l'ont confirmé E. Dondonné et P. Toussaint [48] dans un article synthétisant l'utilisation de l'IE sur cinq années.

En effet, E. Dondonné et P. Toussaint montrent que l'IE peut être interprété à l'aide des résultats obtenus sur des graphiques fréquentiels obtenus par transformée de Fourier mais que, pour des éléments complexes, il est nécessaire de développer une étude plus poussée des signaux. Ils suggèrent l'utilisation de techniques d'amortissement du signal ou des ondelettes. Par ailleurs, en ce qui concerne la seconde technique, des débuts de résultats

concluants ont été obtenus par T.-P. Le [49] en appliquant la transformée en ondelettes sur des résultats IE obtenus à partir de mesures sur des dalles béton, soit des éléments de dimensions semi infinie dans deux directions. Il semble donc encore difficile d'appliquer IE aux pièces massives dues à l'interprétation des résultats.

Par ailleurs, afin de compléter les essais abordés dans ce mémoire, il serait intéressant de modéliser les échantillons étudiés via un programme d'étude par éléments finis en trois dimensions afin d'étudier la propagation des ondes dans le béton, le coulis et l'acier qui composent les échantillons. Il serait alors possible d'obtenir un signal temporel théorique obtenu par modélisation 3D d'un effort simulant l'impact de la bille lors d'un essai IE et, de ce fait, de connaître la propagation des ondes dans l'échantillon ainsi que celles récupérées en surface par un capteur. Après avoir dissocié les types d'ondes relevées (onde-S,-P et – R), il serait aisé de transformer le signal temporel en diagramme de fréquence via la transformée de Fourier. Ainsi, les pics obtenus par la modélisation 3D pourraient être comparés aux résultats obtenus lors des essais en laboratoire de ce mémoire.

Quant à l'utilisation d'un endoscope pour constater l'état interne des gaines de précontrainte, il a été vu dans cette étude que cet outil de diagnostic était parfaitement adapté. Les images obtenues, bien que pouvant paraître compliquées au premier abord, s'analysent très clairement. Il ne tient qu'à l'utilisateur de l'appareil de prendre un minimum de précaution lors de la prise des clichés pour obtenir une image nette avec une luminosité adéquate. Aucune formation n'est nécessaire pour l'utilisation d'un endoscope. Seule, une simple prise en main de l'appareil est primordiale avant les essais.

L'endoscope est un appareil fonctionnel, mais aussi pratique, puisque l'ensemble du matériel tient dans une simple mallette. Cependant, contrairement à l'impact-écho, la mise en œuvre d'une investigation par endoscopie demande l'utilisation d'autres appareils : une perceuse pour accéder aux gaines et un compresseur à air afin de nettoyer les ouvertures. Ces appareils nécessitent généralement une génératrice afin de les faire fonctionner sur une longue période. Ainsi, il est important de prévoir un dégagement utile à l'installation de ces

appareils lors de l'étude de zones difficiles d'accès: L'obstruction des petites ouvertures est certainement un sujet d'intérêt mais qui peut être facilement abordé à l'aide de règles de bonne pratique. Quoiqu'il en soit, il s'agit d'une problématique beaucoup moins sensible que dans le cas d'ouvertures par fenêtrage.

L'ensemble des propositions de poursuite de recherche sur l'impact-écho montre que l'étude de cette méthode n'est pas terminée. En effet, ce mémoire a initié un axe de recherche sur des méthodes d'auscultation d'ouvrages massifs en béton précontraints par post-tension de nature non invasive. Ainsi, deux méthodes (endoscopie, impact-écho) ont été choisies. Les essais pratiqués sur une gamme d'échantillon de différentes catégories de dimensions ont montré que l'analyse des résultats obtenus par impact-écho présente toujours des défis à ce jour bien que des comportements caractéristiques ont pu être relevés dans certains cas.

Bibliographie

- [1] Johnson, P.M., A. Couture, and R. Nicolet, *Rapport d'enquête sur l'effondrement d'une partie du viaduc de la Concorde*. 2007, Commission d'enquête sur le viaduc de la Concorde: Montréal. p. 201.
- [2] *Plan stratégique du Ministère des Transports de Québec 2005-2008*. 2005, Ministère des Transports de Québec: Québec. p. 34.
- [3] Malhotra, V.M. and C. N.J., *Handbook on nondestructive testing of concrete*, F.C.P. Boca Raton, Editor. 2004: Florida (USA).
- [4] Fuzier, J.-P., H.-R. Ganz, and P. Matt, *Durability of post-tensioning tendons*, in *Bulletins de la Fédération Internationale du Béton*. 2005.
- [5] Mietz, J. and J. Fischer, *Evaluation of NDT methods for detection of prestressing steel damage at post-tensioned concrete structures*. *Materials and Corrosion*, 2007. **58**(10): p. 789-794.
- [6] Bastien, J., B. Bissonnette, and M. Girard, *Méthode d'auscultation des ouvrages d'art en béton - Revue de littérature*. 2009: Département de Génie Civil, Université Laval, Québec. p. 64.
- [7] Highways Agency (HA), et al., *Ponts en béton précontraint par post-tension (Post-tensioned concrete bridges)*. 1999, London: Thomas Telford Publishing. 164.
- [8] Derobert, X., C. Aubagnac, and O. Abraham, *Comparison of NDT techniques on a post-tensioned beam before its autopsy*. *NDT and E International*, 2002. **35**(8): p. 541-548.
- [9] River Valley Testing Corp. *Forensic Services - Construction Materials Distress*. [cited; Available from: <http://www.rvtcorp.com/web%20pages/Services/Forensic%20Services.htm>.
- [10] Beard, M., et al., *Développement d'une technique d'auscultation par onde guidée des boulons d'ancrage et des câbles de précontrainte noyés (Development of a wave guide inspection technique of prestressed anchor bolts and sunken cables)*. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 2003(239): p. 29-40.
- [11] Muldoon, R., et al., *Identifying voids in plastic ducts in post-tensioning prestressed concrete members by resonant frequency of impact-echo, SIBIE and tomography*. *Construction and Building Materials*, 2007. **21**(3): p. 527-537.
- [12] Clarke, G., et al., *Volume 3 - Highway structures - Inspection and maintenance*, in *Design manual for roads and bridges*, H. Agency, Editor. 2006.
- [13] Martin, J., et al., *Ultrasonic tomography of grouted duct post-tensioned reinforced concrete bridge beams*. *NDT and E International*, 2001. **34**(2): p. 107-113.
- [14] HILTI, *Analyses de fers à béton - Principaux domaines d'application - Ferroskan PS 200*, in *Brochure HILTI*.
- [15] Luco, L.F., *Comparative test - Part II - Comparative test of "Covermeters"*. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, 2005. **38**(284): p. 907-911.
- [16] Malhotra, V.M. and N.J. Carino, *Short-Pulse Radar Methods*, in *Handbook on nondestructive testing of concrete*, F.C.P. Boca Raton, Editor. 2004: Florida (USA).

- [17] Kohl, C. and D. Streicher, *Results of reconstructed and fused NDT-data measured in the laboratory and on-site at bridges*. Cement and Concrete Composites, 2006. **28**(4): p. 402-413.
- [18] Hugenschmidt, J. and R. Loser, *Detection of chlorides and moisture in concrete structures with ground penetrating radar*. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 2008. **41**(4): p. 785-792.
- [19] Scheel, H. and B. Hillemeier, *Location of prestressing steel fractures in concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003. **15**(3): p. 228-234.
- [20] Hillemeier, B. and A. Walther, *Fast Non-Destructive Localisation of Prestressing Steel Fractures in Post-Tensioned Concrete Bridges*, in *Advances in Construction Materials 2007*. 2007. p. 563-574.
- [21] Shibata, H., et al. *Bridge concrete deteriorating diagnosis by infrared thermography*. 2006. Kissimmee, FL, United States: International Society for Optical Engineering, Bellingham WA, WA 98227-0010, United States.
- [22] Shroff, A.C. and S. Jarmel, *Innovative application of non-destructive techniques in evaluating old concrete*, in *Congrès annuel de la SCGC*. 2008: Québec, Canada.
- [23] Fricker, S. and T. Vogel, *Site installation and testing of a continuous acoustic monitoring*. Construction & Building Materials, 2007. **21**(3): p. 501-510.
- [24] Malhotra, V.M. and C. N.J., *Methods to Evaluate Corrosion of Reinforcement*, in *Handbook on nondestructive testing of concrete*, F.C.P. Boca Raton, Editor. 2004: Florida (USA).
- [25] Neudam, H., *Zerstörungsfreie Prüfmethoden bei Spannbetonbrücken – Beispiel: Donaubrücke Pfaffenstein in Regensburg (BAB A 93) (Non-destructive testing of prestressed concrete bridges – Example: Danube bridge BAB A 93 in Regensburg (Germany))*, in *Department of Concrete Structures*. 2007, Technische Universität München: Munich, Allemagne.
- [26] Elsener, B., et al., *Half-cell potential measurements—Potential mapping on reinforced concrete structures*. Materials and Structures, 2003. **36**(7): p. 461-471.
- [27] Andrade, C. and C. Alonso, *Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method*. Materials and Structures, 2004. **37**(9): p. 623-643.
- [28] Broomfield, J. and S. Millard, *Current practice sheet no.128: Measuring concrete resistivity to assess corrosion rates*. Concrete (London), 2002. **36**(2): p. 37-39.
- [29] Sbartaï, Z.M., et al., *Using radar direct wave for concrete condition assessment: Correlation with electrical resistivity*. Journal of Applied Geophysics, 2007. **62**(4): p. 361-374.
- [30] Abraham, O. and P. Cote, *Méthode impact-echo basse fréquence pour la détection de vide dans les gaines de précontrainte (Low frequency impact-echo method for the detection of voids in pre-stressed ducts)*. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2003(239): p. 41-50.
- [31] Sansalone, M.J. and W.B. Streett, *Stress Waves*, in *Impact-Echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*, B. Press, Editor. 1997.

- [32] Malhotra, V.M. and N.J. Carino, *Stress Wave Propagation Methods*, in *Handbook on nondestructive testing of concrete*, F.C.P. Boca Raton, Editor. 2004: Florida (USA).
- [33] Sansalone, M.J. and W.B. Streett, *Plates Consisting of Two Layers*, in *Impact-Echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*, B. Press, Editor. 1997.
- [34] Alciatore, D.G. *MECH307: Mechatronics and Measurement Systems*. 2009 [cited; Available from: <http://www.engr.colostate.edu/~dga/mech307>].
- [35] Sansalone, M.J. and W.B. Streett, *Rectangular Cross-Sections*, in *Impact-Echo : Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*, B. Press, Editor. 1997.
- [36] Carino, N.J. *The impact-echo method: an overview*. in *Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition*. 2001. Washington, D.C.
- [37] Scott, M., et al. *A comparison of nondestructive evaluation methods for bridge deck assessment*. 2003. London, United Kingdom: Elsevier Science Ltd.
- [38] Sansalone, M.J. and W.B. Streett. *The Impact-Echo Method*. 1998 [cited; Available from: <http://www.ndt.net/article/0298/streett/streett.htm#6>].
- [39] Lin, Y., et al., *A simple device for detecting impact time in impact-echo testing of concrete*. NDT and E International, 2004. **37**(1): p. 1-8.
- [40] Raparelli, R.Q. and L.D. Olson, *Impact-Echo scanning for NDE of voids in post-tensioned ducts in a box girder bridge*, in *TBR 2003 Annual Meeting*. 2003.
- [41] Ryall, M.J., G.A.R. Parke, and J.E. Harding, *Manual of bridge engineering*, ed. T. Telford. 2000, London: Thomas Telford. 1012.
- [42] Sodeikat, C., C. Gehlen, and A. Schiebl, *Damage assessment of a RC bridge structure showing damages at the pre-stressing steel*, in *International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR)*, T.F. Group, Editor. 2005: Cape Town (South Africa). p. 665-670.
- [43] ASTM Collections, *Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method)*, ASTM C 939, Editor. 2002.
- [44] Bastien, J., J. Marchand, and G. Arsenault, *Rapport sur l'état des bretelles de l'autoroute Dufferin-Montmorency*. 2009, Université Laval: Québec.
- [45] Sansalone, M.J. and W.B. Streett. *Impact-Echo Instruments, LLC*. 1997 [cited; Available from: <http://www.impact-echo.com>].
- [46] Olympus. *IPLEX MX R*. Inspection & Maintenance Systems 2009 [cited; Available from: <http://www.olympus-ims.com/fr/rvi-products/iplex-mxr/>].
- [47] Sansalone, M.J. and W.B. Streett, *Circular and Square Cross-Sections*, in *Impact-Echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*, B. Press, Editor. 1997.
- [48] Dondonné, E. and P. Toussaint, *Synthèse sur l'utilisation de l'impact-écho par la Direction de l'expertise des structures du ministère wallon de l'Équipement et des Transports*. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2002. **239**(Juillet-Août 2002).
- [49] Le, T.-P., *Auscultation dynamique des structures à l'aide de l'analyse continue en ondelettes*, in *Structures et Matériaux*. 2003, LCPC: Paris. p. 166.

Annexes

A. Fiche produit du coulis de ciment utilisé en laboratoire

DONNÉES DE PRODUIT

3 03 62 13 Coulis

MASTERFLOW^{®/MD} 1205

Coulis non métallique sans retrait à haute performance pour l'acier sous forte contrainte

Description

Masterflow^{®/MD} 1205 est un coulis pompable à base de ciment avec des granulats spécialement calibrés. Il produit un matériau fluide à haute résistance, pompable, sans ressuage avec un temps de travail prolongé. Le granulats spécialement calibré atténue la migration des chlorures tout en permettant au produit d'être facilement pompé sur de longues distances par de petites ouvertures. Il est conforme à toutes les exigences de résistance à la compression et de retrait de la norme CRD C 621 et de la norme ASTM C 1107, classes B et C, à une consistance fluide.

Rendement

Un sac de 25 kg fournit approximativement 0,016 m³

Emballage

Sacs à parois multiples de 25 kg

Sacs en vrac de 1 134 kg également disponibles sur commande spéciale

Durée de Conservation

6 mois, lorsqu'entreposé correctement

Entreposage

Entreposez dans des contenants non ouverts dans un endroit propre et sec.

Caractéristiques

- Coulis à haute résistance
- Ne contient pas de composants nuisibles à l'acier à haute résistance
- Facile à pomper ou à verser
- Durcit sans ressuage, retrait de tassement et formation de cavités
- Peut être pompé ou recirculé pendant des périodes de temps relativement longues
- Ne forme pas d'hydrogène gazeux comme mécanisme d'expansion initial
- Peut être utilisé à des températures comprises entre 4 et 32 °C
- Durcit sans retrait de tassement dans les conduits de coulis

Avantages

- Offre un ancrage pour le tensionnement ultérieur
- Protège les armatures, les barres et les boulons contraints de la corrosion
- Facilite la mise en place
- Assure un rendement optimal à l'état durci
- Offre de la flexibilité à l'horaire de construction
- Élimine la friabilité hydrogène ou la formation de chenal à bulles
- Diminue la dépendance aux conditions météorologiques
- Assure une adhérence maximale et une protection à long terme contre l'eau, les chlorures et la rouille

Usages Recommandés

APPLICATION

- Pour le pompage autour des armatures, des câbles et des tiges postcontraints afin d'encapsuler et de protéger l'acier sous forte contrainte contre la corrosion
- Pour la mise en place autour des sections terminales de câbles et de tiges non ancrés pour tensionnement ultérieur
- Pour remplir les vides dans les espaces restreints entre les panneaux muraux, les poutres et les colonnes où le coulis sera en contact avec de l'acier sous forte contrainte
- Pour l'injection de plaques d'appui de câbles ou d'autres plaques où le coulis sera en contact avec des ancrages sous forte contrainte

Application de Masterflow^{®/MD} 1205

Préparation de la Surface

1. Débarrassez les câbles et les torons de toute oxydation, saleté, huile ou tout autre particule libre. Les conduits doivent être propres et friable de toute déféctuosité.
2. Vérifiez la méthode de mélange et de pompage proposée afin d'assurer une mise en place continue une fois le travail de pompage commencé. Ayez une source d'eau à haute pression avec raccordements pour rincer les boyaux ou les conduits à câble partiellement injectés au cas où le pompage devrait être interrompu.
3. Vérifiez la pompe et les lignes de coulis avec de l'eau ou de l'air comprimé sans huile. Assurez-vous qu'ils soient capables de résister à la pression requise et que tous les raccordements sont serrés, sans fuites. Une perte d'eau provoquée par un coulis lent ou immobile peut causer le blocage de la ligne.



Données Techniques

Composition

Masterflow^{®MD} 1205 est un coulis hydraulique pompable à base de ciment avec des granulats spécialement calibrés.

Conformité

- CRD C 621 et ASTM C 1107 : À toutes les exigences de résistance à la compression et au retrait de tassement à consistance fluide
- Aux recommandations du Post-Tensioning Institute (PTI) relatives au coulis pré-emballé pour conduit à acier postcontraint pour les armatures inclinées et horizontales

Données D'essai

| PROPRIÉTÉ | RÉSULTAT ¹ | MÉTHODE D'ESSAI |
|---|-----------------------|---|
| Débit, sec | 20 à 25 | ASTM C 939 |
| Prise finale, h | < 10 | ASTM C 953 |
| Changement en volume, % | | ASTM C 1090 |
| 1 jour | > 0,0 | |
| 28 jours | > 0,0 et < 0,2 | |
| Hauteur d'expansion de prédurcissement, % de changement, à 3 heures | < 0,2 | ASTM C 940 |
| Résistance à la compression, MPa (psi) | | ASTM C 942 |
| 1 jour | > 13,8 (2000) | |
| 3 jours | > 27,6 (4000) | |
| 7 jours | > 37,9 (5500) | |
| 28 jours | > 55,2 (8000) | |
| Perméabilité aux chlorures | < 2500 coulombs | ASTM C 1202 PTI modifié, 30 V |
| Teneur en chlorures solubles dans l'acide, % par poids de ciment | < 0,08 | ASTM C 1157 |
| Ressuage sous pression Schupack-Gelman, 10 min à 30 psi d'élévation verticale à 1,6 mètre de pression maximale | < 2 | Guide du Post-Tensioning Institute Spécification pour injection-sous tension |
| Ressuage provoqué deWick, %, à 3 heures | 0 | ASTM C 940, PTI modifié |
| Test de corrosion accélérée PTI, h | > 1600 | |

¹Les résultats sont basés sur une température de 21 °C.

Des variations raisonnables des résultats obtenus sont à prévoir. Considérez les essais en laboratoire et sur le terrain selon la consistance désirée plutôt que sur la quantité d'eau utilisée seulement.

4. Installez un bouchon, un clapet à bille ou un obturateur à l'orifice de sortie, aux extrémités d'admission des conduits des câbles verticaux et aux deux extrémités des conduits horizontaux. Utilisez également un boyau ou un tuyau de dérivation à soupape de la ligne de décharge de la pompe à sa trémie. Ceci assurera une recirculation sans interruption du coulis de la pompe à la trémie pendant les changements de raccords et autres délais de pompage. Les armatures nappées nécessitent aussi habituellement une ventilation au niveau des crêtes et des dépressions ainsi qu'un peu en amont des crêtes. Reportez-vous au « Guide Specification for Post-Tensioned Grouting » du Post-Tensioning Institute pour obtenir de plus amples renseignements.

5. Diamètre intérieur du tuyau, du boyau et des valves dans lesquels le Masterflow^{®MD} 1205 est pompé doit être d'au moins 12,5 à 51 mm de façon constante dans tout le système. Évitez les coudes autant que possible.

6. Les lignes de pompage et la ligne de coulis, si nécessaire, peuvent être rincées avec de l'eau saturée de chaux à pH élevé en vue de lubrifier et de refroidir les conduits. Le coulis arrivant déplacera et rejettera cette eau à la sortie avant d'accéder au coulis mélangé sans air. Recueillez l'eau saturée de chaux et utilisez-la comme eau de mélange, si nécessaire. Jetez le coulis de transition.

Température

1. La plage de température recommandée pour le coulis mélangé est de 4 à 32 °C. La température des conduits doit aussi se trouver dans cette même plage de température. Respectez les précautions spéciales par temps chaud ou froid. Des températures plus élevées augmentent la quantité d'eau de mélange requise pour obtenir une certaine fluidité et limitent le temps de travail. Des températures plus basses peuvent causer le ressuage, le retard de la prise et entravent le gain rapide de résistance, mais elles permettent de réduire la quantité d'eau de mélange requise pour obtenir une certaine fluidité et augmentent la résistance finale.

INJECTION DE COULIS PAR TEMPS CHAUD

Lorsque la température des conduits est supérieure à 32 °C, utilisez des techniques pour obtenir une température de coulis mélangé plus basse. Refroidissez les sacs de Masterflow[®] 1205 en les entreposant dans un endroit frais ou ombragé. Utilisez de l'eau potable froide pour atteindre la bonne température du coulis mélangé. Si vous ajoutez de la glace concassée à l'eau de mélange, assurez-vous de l'enlever au moyen d'un treillis de 3 mm sur la trémie de la pompe. Ne laissez pas la température du coulis tomber sous 4 °C. La circulation d'eau froide peut aussi refroidir les conduits. De la chaux (Ca OH₂) peut être ajoutée à l'eau de circulation pour augmenter le pH; cela aidera à passer l'acier et à réduire la possibilité d'oxydation avant l'injection du coulis.

INJECTION DE COULIS PAR TEMPS FROID

Lorsque la température des conduits se trouve à 4 °C, la température du coulis mélangé doit être augmentée en y ajoutant de l'eau chaude potable. Les conduits peuvent être chauffés en y faisant circuler de l'eau chaude. De la chaux (Ca OH₂) peut être ajoutée à l'eau de mélange pour augmenter le pH et lubrifier les conduits. Ne dépassez pas 32 °C lors du réchauffement du coulis mélangé et des conduits.

Mélange

1. Masterflow[®] 1205 est un produit prêt à l'emploi nécessitant seulement l'ajout d'eau potable. Le contenu normal d'eau est déterminé par la norme ASTM C 939 « Grout Efflux Time » de 20 à 30 secondes immédiatement après le mélange et par l'atteinte de « 0 » ressuage selon l'essai de « Wick Induced Bleeding » du Post-Tensioning Institute basé sur la norme ASTM C 940 en utilisant le malaxeur précisé pour mélanger le coulis sur le site. Consultez votre représentant BASF pour obtenir des recommandations de mélange spéciales.

2. N'utilisez pas une quantité... moins de by Utilisez une quantité d'eau et travaillez à une température telles que l'écoulement ne sera pas inférieur à 20 secondes dans le cône de débit (ASTM C 939) ou qui provoquera le ressuage ou la ségrégation du coulis mélangé. Les conditions du chantier, telles que la grandeur et la complexité de l'espace à injecter, les diamètres de la ligne de pompage, la hauteur, les méthodes de mélange et de pompage ainsi que les températures, sont tous des facteurs qui déterminent la quantité réelle d'eau requise.

3. Ayez un ou plusieurs malaxeurs sur les lieux avec la capacité permettant au mélange et au pompage de procéder simultanément et de façon continue.

4. Versez d'abord l'eau dans le malaxeur, puis ajoutez le coulis de façon constante tandis que le malaxeur est en marche. Mélangez jusqu'à l'obtention d'une consistance homogène sans grumeaux, ce qui devrait prendre approximativement 1 à 2 minutes, en vous assurant de racler le matériau sec des parois du malaxeur. Transférez le coulis mélangé dans la trémie volante de la pompe et passez à travers un treillis à ouvertures de 3 à 5 mm afin de recueillir les grumeaux; ensuite, commencez à pomper dans le conduit, après avoir vérifié le débit.

REMARQUE : Ne mélangez pas plus de coulis qu'il ne sera possible d'injecter en 30 à 45 minutes, selon la température.

Application

Injectez Masterflow[®] 1205 conformément à la section C5.6.3 « Grouting Operations » du « Guide Specification for Grouting of Post-Tension Structures » préparé par le comité PTI sur les spécifications d'injection de coulis.

Mûrissement

Procédez au mûrissement de toutes les surfaces injectées par mûrissement humide pendant 24 heures avec des chiffons propres mouillés (n'utilisez pas de jute), suivi de l'application d'un produit de mûrissement conforme à la norme ASTM C 309 ou préféablement à la norme C 1315. En temps froid, gardez la température du coulis au-dessus de 4 °C jusqu'à la prise finale. Par la suite, gardez la température au-dessus du point de congélation jusqu'à ce que le coulis ait atteint une résistance à la compression de 10 MPa.

Pour obtenir de meilleurs résultats

- N'ajoutez pas de plastifiants, d'accélérateurs, de retardeurs ou d'autres additifs à moins d'avoir reçu un avis par écrit du service technique de BASF.
- Les exigences en eau peuvent varier selon l'efficacité du mélange, la température et d'autres facteurs.
- Ayez une conférence avant de commencer les travaux avec votre représentant local pour planifier l'installation. Tenez des conférences aussi tôt que possible. Les conférences sont importantes en vue d'appliquer les recommandations de ce bulletin de produit à un projet précis et elles aident aussi à assurer une injection de la plus haute qualité au coût le plus faible.
- Les murs de l'espace à injecter doivent avoir une température comprises entre 4 et 32 °C et doivent être saturés d'eau à chaux pour obtenir de meilleurs résultats. Pour utilisation à des températures se trouvant au-delà de la plage, consultez le service technique de BASF.
- N'UTILISEZ PAS une quantité d'eau à une température qui produira un écoulement de moins de 20 secondes (CRD C 611 ou ASTM C 393) ou qui provoquera le ressuage ou la ségrégation du coulis mélangé lorsque testé selon le « Wick Induced Bleeding Test » du PTI (qui s'inspire de la norme ASTM C 940).
- BASF n'est pas responsable de la corrosion causée par les ingrédients contenus dans l'eau de rinçage, de saturation ou de mélange ou par les contaminants se trouvant dans l'espace à injecter ou tout autre matériau utilisé dans le système.
- Assurez-vous d'utiliser les versions les plus récentes du bulletin de produit et de la FS; communiquez avec le service à la clientèle (1-800-433-9517) pour vérification.
- L'utilisateur est responsable de l'application adéquate. Les visites sur le terrain du personnel de BASF n'ont pour but que d'effectuer des recommandations techniques et ne sont pas destinées à superviser ou à offrir un contrôle de la qualité sur le site.

Santé et Sécurité

MASTERFLOW[®]MD 1205

Mise en garde

Masterflow 1205 contient de la silice cristalline (quartz), du ciment Portland, de la chaux, de l'oxyde de calcium, de la silice amorphe et de l'oxyde de magnésium.

Risques

Ce produit est alcalin au contact de l'eau et peut causer des lésions de la peau et des yeux. L'ingestion ou l'inhalation de poussières peut causer de l'irritation. Contient de faibles quantités de quartz respirable libre qui est répertorié comme produit cancérigène par le NTP et le CIRC. La surexposition prolongée et répétée au quartz respirable libre peut causer la silicose ou d'autres lésions sérieuses et retardées des poumons.

Précautions

Évitez le contact avec les yeux, la peau et les vêtements. Employez uniquement dans un endroit bien ventilé. Gardez le contenant fermé en dehors de son utilisation. Lavez vous bien après manipulation. N'ingérez PAS. Évitez l'inhalation de la poussière. Portez des gants étanches et des lunettes de sécurité et, si le seuil d'exposition est dépassé ou si l'endroit est mal ventilé, un masque respiratoire approuvé par la NIOSH/MSHA conformément à la réglementation fédérale, provinciale et locale applicable.

Premiers soins

En cas de contact avec les yeux, lavez à grande eau durant au moins 15 minutes. En cas de contact avec la peau, lavez les zones affectées à l'eau et au savon. Si l'irritation persiste, FAITES UN SUIVI MÉDICAL. Enlevez et lavez les vêtements contaminés. Si l'inhalation cause un inconfort physique, déplacez la personne affectée à l'air pur. Si l'inconfort persiste ou en cas de difficultés respiratoires ou d'ingestion, FAITES UN SUIVI MÉDICAL IMMÉDIATEMENT.

Élimination des déchets

Ce produit, lorsque mis au rebut ou éliminé, ne se trouve pas sur la liste des déchets dangereux de la réglementation fédérale. Jetez dans une décharge conformément aux règlements locaux.

Pour de plus amples renseignements sur l'équipement de protection personnelle, les premiers soins et les procédures d'urgence, référez-vous à la fiche signalétique (FS) sur le site ou communiquez avec l'entreprise à l'adresse ou au numéro indiqué ci-dessous.

Proposition 65

Ce produit contient des matériaux reconnus par l'état de la Californie comme pouvant causer le cancer, des anomalies congénitales ou d'autres problèmes pour la reproduction.

Composé organique volatil

0 g/l moins l'eau et les solvants exonérés. moins l'eau et les solvants exonérés.

Pour les urgences médicales seulement, appelez ChemTrec (1-800-424-9300).

BASF Construction Chemicals, LLC – Building Systems

889 Valley Park Drive
Shakopee, MN, 55379

www.BuildingSystems.BASF.com

Service à la clientèle: 800-433-9517

Services techniques: 800-243-6739



AVIS DE GARANTIE LIMITÉE Tous les efforts raisonnables sont faits pour mettre en application les normes précises de BASF, aussi bien dans la fabrication de nos produits que dans les renseignements que nous fournissons concernant ces produits et leur utilisation. Nous garantissons que nos produits sont de bonne qualité et nous nous engageons à les remplacer ou, à notre choix, à rembourser leur prix d'achat s'ils s'avèrent défectueux. Le niveau de satisfaction des résultats dépend non seulement de la qualité des produits, mais aussi d'un bon nombre de facteurs indépendants de notre volonté. Par conséquent, sauf pour le remplacement ou le remboursement, BASF N'OFFRE AUCUNE GARANTIE, EXPRESSE OU IMPLICITE, Y COMPRIS DES GARANTIES D'ADAPTATION À UN USAGE PARTICULIER OU DE QUALITÉ MARCHANDE CONCERNANT SES PRODUITS ET BASF n'assume aucune autre responsabilité à cet égard. Toute réclamation pour produit défectueux doit être reçue par écrit dans une période d'un (1) an à compter de la date d'expédition. Aucune réclamation ne sera considérée sans cet avis écrit ou après la période précitée. Il appartient à l'utilisateur de déterminer l'adaptation des produits à l'usage prévu et ce dernier accepte tous les risques et les responsabilités qui s'y rattachent. Tout changement autorisé des recommandations imprimées relatives à l'utilisation de nos produits doit porter la signature du directeur du service technique de BASF.

Ces renseignements et tous les autres conseils techniques sont fondés sur l'expérience et les connaissances actuelles de BASF. Cependant, BASF n'assume aucune responsabilité quant à l'offre de tels renseignements ou conseils, y compris dans la mesure à laquelle ces renseignements ou conseils peuvent être reliés aux droits de propriété intellectuelle de tiers, particulièrement les droits de brevet. Plus spécifiquement, BASF ne toutes les GARANTIES, EXPRESSES OU IMPLICITES, Y COMPRIS LES GARANTIES IMPLICITES D'ADAPTATION À UN USAGE PARTICULIER OU DE VALEUR MARCHANDE. BASF NE SERA PAS RESPONSABLE DES DOMMAGES CONSÉQUENTS, INDIRECTS OU ACCESSOIRES (Y COMPRIS LA Perte DE PROFITS) DE TOUTES SORTES. BASF se réserve le droit d'apporter des changements selon le progrès technologique et les développements ultérieurs. Le client reconnaît sa responsabilité et son obligation d'inspecter et de tester soigneusement tous les matériaux reçus. Le rendement d'un produit décrit ci-dessus doit être vérifié en procédant à des essais effectués soigneusement par des experts qualifiés. Le client est entièrement responsable d'effectuer et d'organiser ces essais. Toute référence à des normes commerciales utilisées par d'autres entreprises ne représente ni une recommandation ni un endorsement d'un produit et n'implique pas que des produits similaires ne peuvent pas être utilisés.

Pour usage professionnel seulement.

Non destiné à la vente ou à l'utilisation par le public.

Formulaire n° 1026607 10/08

Imprimé sur du papier recyclé, y compris 10 % de fibres recyclées après consommation.

© 2008 BASF

B. Détermination du rapport e/c pour le coulis de ciment

Le mélange de coulis de ciment a été établi par la méthode du Flow Cone (Norme ASTM C939 -97).

Echantillons de ciment : à base de Masterflow 1205 (BASF).

Choix du 1er mélange :

- 2,0 kg de ciment ;
- 0,7 kg d'eau.

Résultat de l'essai Flow Cone pour le 1er mélange : 21 sec 54"

Le temps mis pour que le cône se vide est assez proche de 20 sec (valeur à atteindre) tout en restant au-dessus. Le mélange obtenu est donc choisi pour la conception des échantillons du laboratoire.

Un second mélange est fait afin de confirmer les résultats du premier.

Choix du 2nd mélange :

Identique au 1er mélange.

Résultat de l'essai Flow Cone pour le 2nd mélange : 21 sec 34"

Le temps mis pour le second essai confirme le résultat obtenu pour le premier.

Le rapport e/c pour le mélange de coulis est donc choisi à 0,35.

C.Gâchée de béton pour les plaques PL

| Formulation d'une gâchée | | Nom de l'opérateur | Marion Girard | Date du contact E/C (jj-mm-aa) | -- | Commentaire: | | | | | |
|--------------------------|--------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|-------------|--|
| | | No de Projet | 0863 | Heure du contact E/C (HH:mm) | : | | | | | | |
| | | No de Mélange | plaques | Type de malaxeur | Jumbo | | | | | | |
| | | Type de Mélange | BO | Séquence de malaxage | CRIB E/C > 0.35 Béton | | | | | | |
| Conception | Dosage | Description | Densité | | Quantité m3 SSS | Quantité Gâchée SSS | Quantité Gâchée corrigée | Quantité pesée au Labo | Mélange Labo m3 SSS | Dosage Labo | |
| Vol. Gâchée (L) | 250 | | | | | | | | | 264.76 | |
| E/L (kg/kg) | 0.48 | | | | | | | | | 0.383 | |
| Air occlu (%) | 6 | | | | | | | | | | |
| Volume pâte (%) | 35 | | | | | | | | | 37.78 | |
| Liant 1 (% M.L.) | 100 | L09-004:GU (T10):Lafarge | 3.17 | (kg) | 364.6 | 91.15 | 91.15 | 86.3 | 325.95 | 100 | |
| Liant 2 (% M.L.) | | | | (kg) | | | | | | | |
| Liant 3 (% M.L.) | | | | (kg) | | | | | | | |
| Liant 4 (% M.L.) | | | | (kg) | | | | | | | |
| Eau | | Eau aqueduc | | (kg) | 172.7 | 43.18 | 40.53 | 29.85 | 122.84 | | |
| | | | | Abs (%) | | | | | | | |
| Granulat 1 (% M.G.) | 51.4 | L09-301:Calcaire 5-14 mm | 2.659 | 0.64 (kg) | 887.4 | 221.85 | 220.98 | 224.5 | 851.24 | 51 | |
| Granulat 2 (% M.G.) | 48.6 | L09-201:Banc de la voirie | 2.710 | 0.56 (kg) | 855.1 | 213.78 | 217.29 | 219.8 | 816.78 | 49 | |
| Granulat 3 (% M.G.) | | | | (kg) | | | | | | | |
| Granulat 4 (% M.G.) | | | | (kg) | | | | | | | |
| | | | | MS (%) | | | | | | | |
| Adjuvant 1 (ml/kg L) | 6.5 | L08-602:SPN:Master Build | 1.2 | 40 (ml) | 2369.7 | 592.4 | 592.4 | 580 | 2190.65 | 6.72 | |
| Adjuvant 2 (ml/kg L) | 1.8 | L06-501:Micro Air:Master | 1 | 10 (ml) | 656.2 | 164.1 | 164.1 | 163 | 615.65 | 1.89 | |
| Adjuvant 3 (ml/kg L) | | | | (ml) | | | | | | | |
| Adjuvant 4 (% M.L.) | | | | (g) | | | | | | | |
| Adjuvant 5 (% M.L.) | | | | (g) | | | | | | | |
| Fibre 1 (% V.T.) | | | | (kg) | | | | | | | |
| Fibre 2 (% V.T.) | | | | (kg) | | | | | | | |
| Fibre 3 (% V.T.) | | | | (kg) | | | | | | | |
| Fibre 4 (kg/m3) | | | | (kg) | | | | | | | |
| Fibre 5 (kg/m3) | | | | (kg) | | | | | | | |
| Teneur en eau | | DonnéesPost-Laboratoire | | | | | | | | | |
| Granulat 1 (%) | 0.15 | Température (°C) | | M.V. 0 | Rhéologie: | | | | | | |
| Granulat 2 (%) | 2.21 | % d'air (%) | 15 | (kg/m3) | G | | | | | | |
| Granulat 3 (%) | 0 | Affaissement (mm) | 123 | | H | | | | | | |
| Granulat 4 (%) | 0 | Étalement (mm) | | | R2 | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |

Légende:

% M.L. = % de la masse de liants
 % M.G. = % de la masse de granulats
 % V.T. = % du volume total
 Abs = Absorption
 MS = Masse solide
 M.V. = Masse volumique

D.Fiche de la centrale à béton (béton Blocs)

```

+++++
Usine : p1226
Date/Heure : 2009-04-20 09:25 Billet : 18394
Recette : 3012001C Volume : 3.00
Camion : 239 Gachee : 1
Mélange : Reset :
Usine : 93 Annule :
Malaxeur : 0 Temps mel. (cible) : 30 secs
Temps mel. (reel) : 0 secs Affaïssement : 80 mm
Air (cible) : 6.5 Lecture malaxeur : 0.0 A
Eau agregats : 132 l Densite eau : 1.000
Masse totale : 6985 kg Volume reel : 1012.4 l
Temp. Beton (cible) : 23.0 C Temp. Beton (reel) : NA
Temp. Extérieur : NA Retour recette :
Retour volume : 0.0 m3 Retour eau : 0.0 l
E/C : 0.50 Doseur : Jean-Francois
Temps total : 0:00 min Chauffeur : BOUCHER, JEAN

```

| Balance | Tare initial | Tare final | Temps. Repl. | Temps Vid. |
|---------------------|--------------|------------|--------------|------------|
| BALANCE AGREGATS #1 | -15.0 kg | 0.0 kg | 0:18 | |
| BALANCE CIMENT | 6.0 kg | 0.0 kg | 0:31 | |
| BALANCE A EAU | 3.0 kg | 0.0 kg | 0:49 | |
| BALANCE AGREGATS #2 | 10.0 kg | 0.0 kg | 0:20 | |

| Emplacement | Description | Quantite |
|-------------|----------------|----------|
| BENNE #6 | HORS TOLERANCE | 125 kg |

| Balance | Cible | Reel | % Erreur |
|----------|-------|------|----------|
| EAU | 369 | 366 | -0.81% |
| CIMENT | 1017 | 1006 | -1.08% |
| AGREGATS | 5500 | 5610 | 2.00% |

| Emplacement | Materiau | Recette | Cible | Reel | % Erre | Densit | Temp | Humidit | Ajout | Rang |
|-------------|---------------|---------|-------|------|--------|--------|------|---------|-------|------|
| EAU #1 | Eau Municipal | 165 | 369 | 366 | -0.81% | 1.000 | 0.00 | 100.0 | 1 | |
| SILO #1 | GU Lafarge | 339 | 1017 | 1006 | -1.08% | 3.150 | 0.00 | 100.0 | 3 | |
| BENNE #1 | Granite 20 mm | 950 | 2880 | 2875 | -0.17% | 2.716 | 1.00 | 100.0 | 1 | |
| AGREGATS | SABLE | 841 | 0 | 0 | | 2.704 | 0.00 | 100.0 | 0 | |
| BENNE #5 | SABLE | 0 | 1310 | 1325 | 1.15% | 2.704 | 16.0 | 4.50 | 100.0 | 5 |
| BENNE #6 | SABLE2 | 0 | 1310 | 1410 | 7.63% | 2.700 | 16.0 | 4.50 | 100.0 | 6 |
| ADJUVANT #1 | Microair | 18 | 180 | 170 | -5.56% | 1.000 | 0.00 | 100.0 | 1 | |
| ADJUVANT #3 | Eucon WR 75 | 250 | 2560 | 2580 | 0.78% | 1.196 | 0.00 | 100.0 | 3 | |

+++++

E. Résistances en compression des bétons étudiés

a. Plaques PL

i. Résistance à 7 jours

Essai de Compression

| | |
|----------------------------|---------------|
| Nom de l'opérateur | Marion Girard |
| No de Projet | 0863 |
| No de Mélange | Plaques |
| Date de gâché (jj-mm-aa) | 04/08/2009 |
| Heure de la gâchée (HH:mm) | : |
| Date de l'essai (jj-mm-aa) | 11/08/2009 |
| Heure de l'essai (HH:mm) | : |
| Échéance (jours) | C |
| Échéance prévue | 7 jours |
| Type de mûrissement | Autre |
| Presse utilisée | Satec |
| Unités de la presse | lbs |
| Type d'éprouvette | Cylindre |

| Résultats | |
|---------------------------------|------|
| Résistance en compression (MPa) | 12.6 |
| Coefficient de variation (%) | 23.8 |
| Moyenne des modules (MPa) | 0 |

| No Éprouvette | Cylindre | | | | | Charge Max (lbs) | Précharge (lbs) | Temps de charge (mm:ss) | Taux de charge (MPa/s) | Contrainte (MPa) | Vérification (Taux de charge) | Module (MPa) | Sélection | |
|---------------|----------|---------|--------|-----|-----------------------|------------------|-----------------|-------------------------|------------------------|------------------|-------------------------------|--------------|-----------|-----|
| | D1 (mm) | D2 (mm) | H (mm) | L/D | Facteur de correction | | | | | | | | Fc | M |
| 1 | 99.69 | 100.02 | 200.69 | 2 | 1 | 28000 | 2000 | 0:50 | 0.3 | 15.9 | C | 0 | oui | non |
| 3 | 101.95 | 100.75 | 201.70 | 2 | 1 | 18100 | 2000 | 0:44 | 0.2 | 10 | C | 0 | oui | non |
| 2 | 101.95 | 101.27 | 199.17 | 2 | 1 | 21800 | 2000 | 0:54 | 0.2 | 12 | C | 0 | oui | non |

ii. Résistance à 28 jours

Essai de Compression

Nom de l'opérateur Marion Girard

No de Projet 0863
 No de Mélange Plaques
 Date de gâché (jj-mm-aa) 04/08/2009
 Heure de la gâchée (HH:mm) :
 Date de l'essai (jj-mm-aa) 01/09/2009
 Heure de l'essai (HH:mm) :
 Échéance (jours) C

Échéance prévue 28 jours
 Type de mûrissement Autre

Presse utilisée Satec
 Unités de la presse lbs
 Type d'éprouvette Cylindre

| Résultats | |
|---------------------------------|------|
| Résistance en compression (MPa) | 15.1 |
| Coefficient de variation (%) | 6.6 |
| Moyenne des modules (MPa) | 0 |

| No Éprouvette | Cylindre | | | | | Charge Max (lbs) | Précharge (lbs) | Temps de charge (mm:ss) | Taux de charge (MPa/s) | Contrainte (MPa) | Vérification (Taux de charge) | Module (MPa) | Sélection Fc M |
|------------------|------------|------------|-----------|-----|-----------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------|
| | D1 (mm) | D2 (mm) | H (mm) | L/D | Facteur de correction | | | | | | | | |
| 1 | 101.94 | 101.80 | 199.20 | 2 | 1 | 27700 | 1900 | 1:05 | 0.22 | 15.2 | C | 0 | oui non |
| 2 | 100.13 | 99.08 | 199.71 | 2 | 1 | 28100 | 2000 | 1:02 | 0.24 | 16.1 | C | 0 | oui non |
| 3 | 102.70 | 101.84 | 194.91 | 1.9 | 1 | 25900 | 2000 | 0:55 | 0.24 | 14.1 | C | 0 | oui non |

iii. Résistance à 90 jours

Essai de Compression

Nom de l'opérateur Marion Girard

No de Projet 0863
 No de Mélange Plaques
 Date de gâché (jj-mm-aa) 04/08/2009
 Heure de la gâchée (HH:mm) :
 Date de l'essai (jj-mm-aa) 04/11/2009
 Heure de l'essai (HH:mm) :
 Échéance (jours) N/C

| Résultats | |
|---------------------------------|------|
| Résistance en compression (MPa) | 15.2 |
| Coefficient de variation (%) | 10.5 |
| Moyenne des modules (MPa) | 0 |

Échéance prévue 90 jours
 Type de mûrissement Autre

Presse utilisée Satec
 Unités de la presse lbs
 Type d'éprouvette Cylindre

| No Éprouvette | Cylindre | | | | | Charge Max (lbs) | Précharge (lbs) | Temps de charge (mm:ss) | Taux de charge (MPa/s) | Contrainte (MPa) | Vérification (Taux de charge) | Module (MPa) | Sélection Fc M |
|------------------|------------|------------|-----------|-----|--------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------|
| | D1 (mm) | D2 (mm) | H (mm) | L/D | Facteur de correction | | | | | | | | |
| 1 | 101.5 | 100.3 | 201.4 | 2 | 1 | 30500 | 5000 | 0:65 | 0.22 | 17 | C | 0 | oui non |
| 2 | 99.8 | 101.7 | 194.4 | 1.9 | 1 | 25700 | 5000 | 0:57 | 0.2 | 14.4 | C | 0 | oui non |
| 3 | 101.6 | 101.9 | 198.8 | 2 | 1 | 25800 | 5000 | 0:55 | 0.21 | 14.1 | C | 0 | oui non |

b. Blocs

i. Résistance à 7 jours

Essai de Compression

Nom de l'opérateur Marion Girard

No de Projet 0863
 No de Mélange Blocs
 Date de gâché (jj-mm-aa) 20/04/2009
 Heure de la gâchée (HH:mm) :
 Date de l'essai (jj-mm-aa) 27/04/2009
 Heure de l'essai (HH:mm) :
 Échéance (jours) C

Échéance prévue 7 jours
 Type de mûrissement

Presse utilisée Satec
 Unités de la presse lbs
 Type d'éprouvette Cylindre

| Résultats | |
|---------------------------------|------|
| Résistance en compression (MPa) | 20.7 |
| Coefficient de variation (%) | 4.2 |
| Moyenne des modules (MPa) | 0 |

| No Éprouvette | Cylindre | | | | | Charge Max (lbs) | Précharge (lbs) | Temps de charge (mm:ss) | Taux de charge (MPa/s) | Contrainte (MPa) | Vérification (Taux de charge) | Module (MPa) | Sélection | |
|------------------|------------|------------|-----------|-----|-----------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------|-----|
| | D1 (mm) | D2 (mm) | H (mm) | L/D | Facteur de correction | | | | | | | | Fc | M |
| 1 | 101.78 | 101.25 | 203.06 | 2 | 1 | 37300 | 2000 | 1:30 | 0.22 | 20.5 | C | 0 | oui | non |
| 2 | 101.39 | 99.85 | 203.57 | 2 | 1 | 38700 | 2000 | 1:37 | 0.21 | 21.7 | C | 0 | oui | non |
| 3 | 98.99 | 99.3 | 202.13 | 2 | 1 | 34700 | 2000 | 1:22 | 0.23 | 20 | C | 0 | oui | non |

ii. Résistance à 28 jours

Essai de Compression

Nom de l'opérateur Marion Girard

No de Projet 0863
 No de Mélange Blocs
 Date de gâché (jj-mm-aa) 20/04/2009
 Heure de la gâchée (HH:mm) :
 Date de l'essai (jj-mm-aa) 18/05/2009
 Heure de l'essai (HH:mm) :
 Échéance (jours) C

| Résultats | |
|---------------------------------|------|
| Résistance en compression (MPa) | 29.8 |
| Coefficient de variation (%) | 2.2 |
| Moyenne des modules (MPa) | 0 |

Échéance prévue 28 jours

Type de mûrissement

Presse utilisée Satec

Unités de la presse lbs

Type d'éprouvette Cylindre

| No Éprouvette | Cylindre | | | | | Charge Max (lbs) | Précharge (lbs) | Temps de charge (mm:ss) | Taux de charge (MPa/s) | Contrainte (MPa) | Vérification (Taux de charge) | Module (MPa) | Sélection Fc M |
|------------------|------------|------------|-----------|-----|-----------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------|
| | D1 (mm) | D2 (mm) | H (mm) | L/D | Facteur de correction | | | | | | | | |
| 1 | 101.75 | 101.32 | 188.57 | 1.9 | 1 | 53000 | 2600 | 1:57 | 0.24 | 29.2 | C | 0 | oui non |
| 2 | 99.12 | 100.20 | 194.25 | 1.9 | 1 | 51700 | 2000 | 1:54 | 0.25 | 29.6 | C | 0 | oui non |
| 3 | 101.77 | 101.69 | 191.34 | 1.9 | 1 | 55600 | 2000 | 2:03 | 0.24 | 30.5 | C | 0 | oui non |

iii. Résistance à 90 jours

Essai de Compression

Nom de l'opérateur Marion Girard

No de Projet 0863
 No de Mélange Blocs
 Date de gâché (jj-mm-aa) 20/04/2009
 Heure de la gâchée (HH:mm) :
 Date de l'essai (jj-mm-aa) 21/07/2009
 Heure de l'essai (HH:mm) :
 Échéance (jours) N/C

| Résultats | |
|---------------------------------|------|
| Résistance en compression (MPa) | 30.2 |
| Coefficient de variation (%) | 0.2 |
| Moyenne des modules (MPa) | 0 |

Échéance prévue 90 jours
 Type de mûrissement

Presse utilisée Satec
 Unités de la presse lbs
 Type d'éprouvette Cylindre

| No Éprouvette | Cylindre | | | | | Charge Max (lbs) | Précharge (lbs) | Temps de charge (mm:ss) | Taux de charge (MPa/s) | Contrainte (MPa) | Vérification (Taux de charge) | Module (MPa) | Sélection Fc M |
|------------------|------------|------------|-----------|-----|-----------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------|
| | D1 (mm) | D2 (mm) | H (mm) | L/D | Facteur de correction | | | | | | | | |
| 1 | 102.68 | 102.47 | 193.37 | 1.9 | 1 | 55900 | 2000 | 1:45 | 0.28 | 30.2 | C | 0 | oui non |
| 2 | 100.15 | 101.75 | 194.77 | 1.9 | 1 | 54400 | 2000 | 2:04 | 0.24 | 30.3 | C | 0 | oui non |
| 3 | 99.06 | 99.61 | 199.66 | 2 | 1 | 52500 | 2000 | 1:51 | 0.26 | 30.2 | C | 0 | oui non |

c. Segments de poutres

i. B2S3

Essai de Compression

Nom de l'opérateur Marion Girard

No de Projet 0863
 No de Mélange B2S3
 Date de gâché (jj-mm-aa) //
 Heure de la gâchée (HH:mm) :
 Date de l'essai (jj-mm-aa) 16/10/2009
 Heure de l'essai (HH:mm) :
 Échéance (jours)

Échéance prévue -----
 Type de mûrissement Autre

Presse utilisée Satec
 Unités de la presse lbs
 Type d'éprouvette Cylindre

| Résultats | |
|---------------------------------|------|
| Résistance en compression (MPa) | 54.3 |
| Coefficient de variation (%) | 10 |
| Moyenne des modules (MPa) | 0 |

| No Éprouvette | Cylindre | | | | | Charge Max (lbs) | Précharge (lbs) | Temps de charge (mm:ss) | Taux de charge (MPa/s) | Contrainte (MPa) | Vérification (Taux de charge) | Module (MPa) | Sélection Fc M |
|---------------|----------|---------|--------|-----|-----------------------|------------------|-----------------|-------------------------|------------------------|------------------|-------------------------------|--------------|----------------|
| | D1 (mm) | D2 (mm) | H (mm) | L/D | Facteur de correction | | | | | | | | |
| 1 | 93.70 | 93.32 | 169.38 | 1.8 | 0.98 | 79000 | 2000 | 2:11 | 0.38 | 50.3 | N/C | 0 | oui non |
| 2 | 93.56 | 93.58 | 200.31 | 2.1 | 1 | 80300 | 2000 | 2:56 | 0.29 | 52.1 | C | 0 | oui non |
| 3 | 93.58 | 93.60 | 201.88 | 2.2 | 1 | 93400 | 2000 | 3:25 | 0.29 | 60.5 | C | 0 | oui non |

ii. B2S4

Essai de Compression

Nom de l'opérateur Marion Girard

No de Projet 0863
 No de Mélange B2S4
 Date de gâché (jj-mm-aa) //
 Heure de la gâchée (HH:mm) :
 Date de l'essai (jj-mm-aa) 16/10/2009
 Heure de l'essai (HH:mm) :
 Échéance (jours)

Échéance prévue -----
 Type de mûrissement Autre

Presse utilisée Satec
 Unités de la presse lbs
 Type d'éprouvette Cylindre

| Résultats | |
|---------------------------------|------|
| Résistance en compression (MPa) | 52.1 |
| Coefficient de variation (%) | 17.9 |
| Moyenne des modules (MPa) | 0 |

| No Éprouvette | Cylindre | | | | | Charge Max (lbs) | Précharge (lbs) | Temps de charge (mm:ss) | Taux de charge (MPa/s) | Contrainte (MPa) | Vérification (Taux de charge) | Module (MPa) | Sélection Fc M |
|------------------|------------|------------|-----------|-----|--------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------|
| | D1 (mm) | D2 (mm) | H (mm) | L/D | Facteur de correction | | | | | | | | |
| 1 | 93.48 | 93.41 | 198.75 | 2.1 | 1 | 91400 | 2000 | 3:23 | 0.29 | 59.4 | C | 0 | oui non |
| 2 | 93.55 | 93.59 | 202.27 | 2.2 | 1 | 64100 | 2000 | 2:22 | 0.28 | 41.6 | C | 0 | oui non |
| 3 | 93.48 | 93.52 | 203.27 | 2.2 | 1 | 85300 | 2000 | 3:13 | 0.28 | 55.4 | C | 0 | oui non |

iii. B4S3

Essai de Compression

Nom de l'opérateur Marion Girard

No de Projet 0863
 No de Mélange B4S3
 Date de gâché (jj-mm-aa) //
 Heure de la gâchée (HH:mm) :
 Date de l'essai (jj-mm-aa) 16/10/2009
 Heure de l'essai (HH:mm) :
 Échéance (jours)

Échéance prévue Autre
 Type de mûrissement Autre

Presse utilisée Satec
 Unités de la presse lbs
 Type d'éprouvette Cylindre

| Résultats | |
|---------------------------------|------|
| Résistance en compression (MPa) | 44.2 |
| Coefficient de variation (%) | 4 |
| Moyenne des modules (MPa) | 0 |

| No Éprouvette | Cylindre | | | | | Charge Max (lbs) | Précharge (lbs) | Temps de charge (mm:ss) | Taux de charge (MPa/s) | Contrainte (MPa) | Vérification (Taux de charge) | Module (MPa) | Sélection | |
|------------------|------------|------------|-----------|-----|--------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------|-----|
| | D1 (mm) | D2 (mm) | H (mm) | L/D | Facteur de correction | | | | | | | | Fc | M |
| 1 | 93.51 | 94.00 | 197.05 | 2.1 | 1 | 66900 | 2000 | 2:36 | 0.27 | 43.2 | C | 0 | oui | non |
| 2 | 93.61 | 93.62 | 202.12 | 2.2 | 1 | 66600 | 2000 | 2:31 | 0.28 | 43.1 | C | 0 | oui | non |
| 3 | 93.72 | 93.65 | 200.98 | 2.1 | 1 | 71400 | 2000 | 2:38 | 0.28 | 46.2 | C | 0 | oui | non |

iv. B4S4

Essai de Compression

Nom de l'opérateur Marion Girard

No de Projet 0863
 No de Mélange B4S4
 Date de gâché (jj-mm-aa) //
 Heure de la gâchée (HH:mm) :
 Date de l'essai (jj-mm-aa) 16/10/2009
 Heure de l'essai (HH:mm) :
 Échéance (jours)

| Résultats | |
|---------------------------------|------|
| Résistance en compression (MPa) | 45.2 |
| Coefficient de variation (%) | 8.2 |
| Moyenne des modules (MPa) | 0 |

Échéance prévue -----
 Type de mûrissement Autre

Presse utilisée Satec
 Unités de la presse lbs
 Type d'éprouvette Cylindre

| No Éprouvette | Cylindre | | | | | Charge Max (lbs) | Précharge (lbs) | Temps de charge (mm:ss) | Taux de charge (MPa/s) | Contrainte (MPa) | Vérification (Taux de charge) | Module (MPa) | Sélection Fc M |
|------------------|------------|------------|-----------|-----|--------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------|
| | D1 (mm) | D2 (mm) | H (mm) | L/D | Facteur de correction | | | | | | | | |
| 1 | 93.64 | 93.66 | 198.89 | 2.1 | 1 | 73400 | 2000 | 2:43 | 0.28 | 47.5 | C | 0 | oui non |
| 2 | 93.80 | 93.71 | 200.06 | 2.1 | 1 | 73000 | 2000 | 2:43 | 0.28 | 47.2 | C | 0 | oui non |
| 3 | 93.49 | 94.05 | 202.31 | 2.2 | 1 | 63300 | 2000 | 2:25 | 0.27 | 40.9 | C | 0 | oui non |

F. Utilisation du programme Impact-E (mesures IE)

L'utilisation décrite ci-dessous est faite pour utiliser le logiciel d'acquisition IE livré avec le matériel. Il est possible que certains réglages soient à modifier si le matériel utilisé n'est plus celui d'origine. De plus, cette annexe n'est qu'une explication simplifiée du programme afin de permettre une prise en main rapide du logiciel d'acquisition.

a. Création du fichier de sauvegarde

Après avoir lancé le programme Impact-E (figure a), l'écran principal apparaît (figure b). Il faut, en toute première chose, ouvrir un fichier de mesures existant ou en créer un nouveau. Pour cela, il faut sélectionner « Open Test Data File » (ouvrir un fichier de données). Il est proposé de créer un fichier de données au nom de la date du jour sous la forme jjmmaa (jour/mois(en lettres)/année). Il est possible de modifier directement le nom du fichier, puis de cliquer sur « OK » pour l'enregistrer. Pour ouvrir un fichier existant ou changer le dossier d'enregistrement (chemin de défaut à C:\Impact-E\TestFiles\), il est nécessaire de sélectionner « Continue ». Les fichiers de données sont enregistrés au format *.dat* (figure c).



Figure a- Icône du programme Impact-E

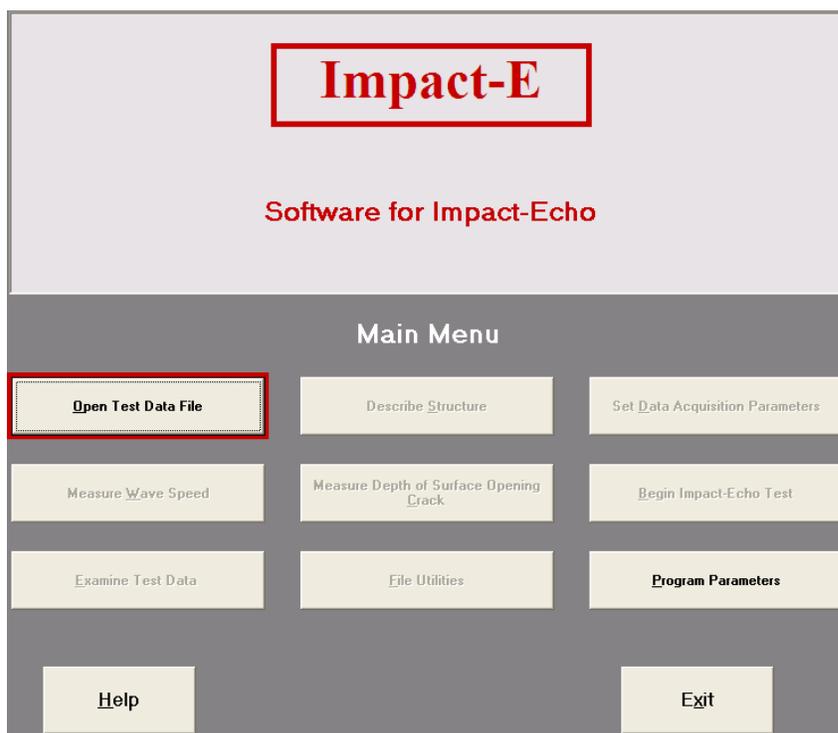


Figure b- Ecran principal du programme Impact-E

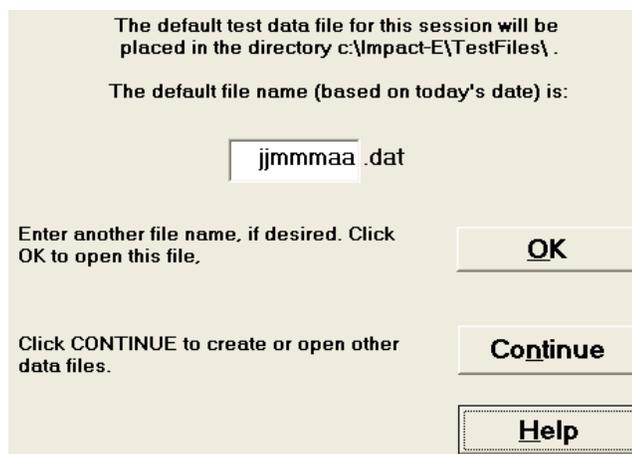


Figure c- Ecran de création ou d'ouverture d'un fichier de données

b. Réglages et données d'acquisition

Lorsque le fichier d'enregistrement est choisi, il est conseillé de régler les paramètres d'acquisition des données en premier (« Set Data Acquisition Parameters », figure d) afin

de ne pas omettre cette étape. Bien sûr, il est possible de modifier les paramètres à tout instant en revenant au menu principal du programme. Le choix des réglages a été discuté à la section 5.2.1.1.

Parameters for the Data Acquisition Card

Number of Samples, N

512 2048

1024

Time Between Samples, t

0.2 Micr-Sec 3 Micr-Sec

0.5 Micr-Sec 4 Micr-Sec

1 Micr-Sec 5 Micr-Sec

2 Micr-Sec 10 Micr-Sec

Frequency Resolution

Fr. Res = 1/Nt = 0.49 kHz

Voltage

+/- 0.1 Volts

+/- 0.2 Volts

+/- 0.4 Volts

+/- 1.0 Volts

+/- 2.0 Volts

+/- 5.0 Volts

Trigger Voltage

-0.3 Volts

Help Cancel Accept

Figure d- Ecran des paramètres d'acquisition des données

Le voltage est réglé à $\pm 2,0\text{ V}$ afin d'obtenir un signal lisible sur l'écran de mesure (à $\pm 5,0\text{ V}$ le signal sera écrasé, à $\pm 1,0\text{ V}$ le signal sortira du graphique). Le « Trigger Voltage » (déclencheur) est maintenu à $-0,3\text{ V}$ afin de récupérer la totalité du signal. Il suffit donc de choisir la période d'échantillonnage ΔT (identifiée t sur la figure d) et le nombre d'échantillons enregistrés sur une mesure.

Une fois les paramétrages enregistrés, des indications sur la pièce étudiée (menu « Describe Structure ») sont nécessaires. Effectivement, cela est une étape obligatoire dans le processus du programme, même si procéder sans ces données aurait été possible. En effet, les données enregistrées à cette étape permettent au programme d'estimer la profondeur des pics (pour un coefficient de réflexion négatif – voir 3.2.4.2) ainsi que les principales fréquences f_i . En ce qui concerne les indications demandées sur la pièce, il est nécessaire d'y inscrire la profondeur et d'autres dimensions au besoin (selon le type d'échantillon : dalle, poutre,...) ainsi que la vitesse de propagation des ondes dans l'échantillon. Si la

vitesse v_p n'est pas connue, il suffit de proposer une valeur proche de celle attendue (en général, v_p se situe autour de 4000 m/s pour le béton).

c. Mesures et acquisition

Le menu « Begin Impact Echo Test » (commencer les essais IE) permet de commencer la prise des mesures. Une fois entré dans le menu, le programme est déjà prêt. Il suffit d'enclencher le bouton presseur du capteur « droit » ou « pistolet » (figure e) et de déclencher l'impact à la surface étudiée à proximité du capteur.



Figure e- Vue sur le bouton presseur (au niveau du pouce de l'utilisateur) sur le capteur « droit ».

Les mesures se font lorsque le déclencheur est activé sur le programme (bouton « Trigger Armed X » au contour clignotant vert). Ce bouton se désactive au bout de 10 min lorsqu'aucune action n'est effectuée sur le programme. Ceci permet de préserver au maximum la piles et, ce faisant, l'utilisation du capteur et de la carte d'acquisition.

La fenêtre d'acquisition des mesures se présente comme sur la figure f : deux graphiques sur la gauche et, sur la droite, la possibilité de modifier les données de la pièce rentrées plus tôt dans le programme. Le graphique du haut représente le signal temporel, tandis que celui du bas fournit directement le digramme fréquentielle de la mesure.

Dans le cas où la vitesse de propagation n'est pas connue, il est possible de la déduire lors des essais. Par exemple, si l'on se base sur la figure f comme un premier essai sur une pièce d'une profondeur de 400 mm et que la mesure a été faite en un point de la pièce où il n'y a pas d'interface, la fréquence de $6,3 \text{ kHz}$ obtenue peut être considérée comme l'écho obtenu par le fond de la pièce, c'est-à-dire f_1 . En introduisant cette valeur directement sur la droite

de l'écran dans la case « Thickness Frequency » (fréquence de l'épaisseur), il est proposé de recalculer la profondeur de la pièce ou la vitesse de propagation v_p . En choisissant de recalculer v_p , la vitesse estimée par la mesure apparaîtra à droite dans la case « Wave Speed » (vitesse de l'onde). Cette valeur restera la même pour la suite des mesures.

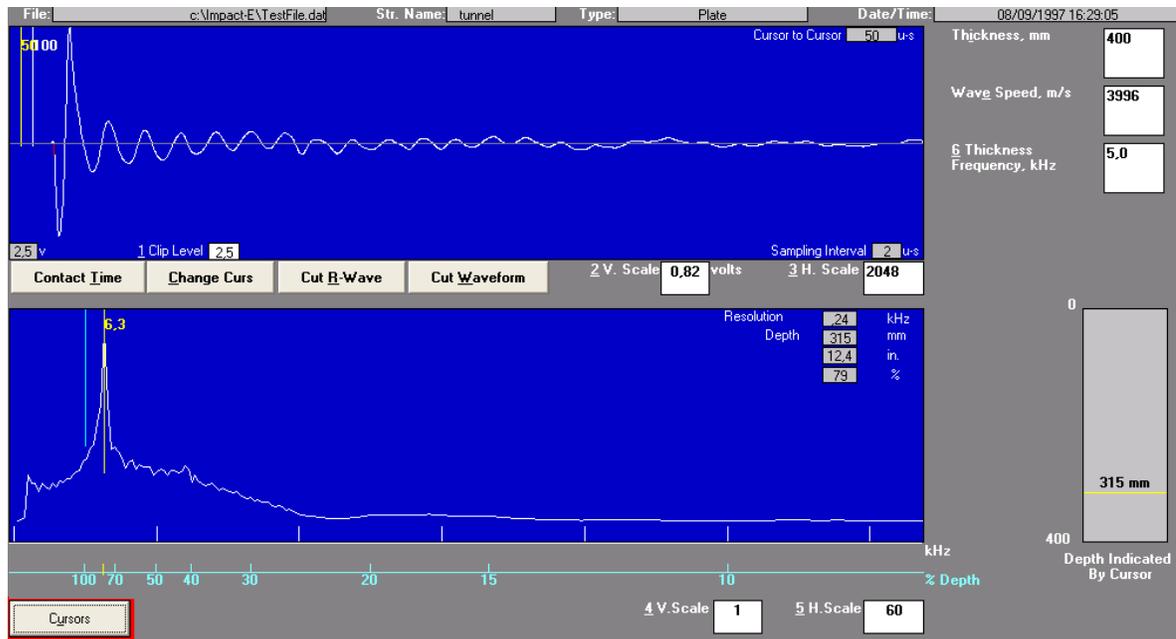


Figure f- Ecran d'acquisition des mesures

Note : Afin de s'assurer de l'obtention d'un bon signal, il est conseillé de se référer au mode d'emploi de l'instrument dans lequel des exemples de mauvais signaux (amplitude du signal trop importante, signal présentant une forme inadéquate,...) sont proposés.

Une fois le signal récupéré, il suffit de l'enregistrer. A cette fin, il suffit de cliquer sur le bouton « Save to Data File » (enregistrer dans le fichier de données). Une nouvelle fenêtre s'ouvre (figure g), permettant de choisir un nom d'enregistrement ainsi que d'ajouter un descriptif de la mesure. Pour le nom d'enregistrement, il est conseillé de choisir un nom court, par exemple PL pour l'étude de plaques, suivi d'un numéro qui incrémentera automatiquement à chaque enregistrement. Quant au descriptif, il est vivement conseillé d'écrire les données de l'essai (échantillon, point d'étude, paramétrage d'acquisition, bille, autre).

This test point will be saved in file:

c:\Impact-E\TestFile.dat

as Record Number: 46

with Record Name: NOM-NUM
(12 characters max)

with Description: Description
(40 characters max)

Cancel Save

Figure g- Ecran de sauvegarde de la mesure

Une fois le premier enregistrement effectué, la méthode la plus efficace pour procéder à l'enregistrement des mesures suivantes consiste à composer Alt+S deux fois de suite : la première manœuvre permet d'accéder à l'écran de sauvegarde tandis que la seconde permet l'enregistrement de la mesure. Lorsque la description n'est pas à modifier. Cette méthode permet de diminuer la durée des essais.

Egalement, conserver un compte rendu des essais afin de faciliter leur identification à l'aide d'une feuille d'essais (exemple à l'annexe G) s'avère utile.

d. Transfert des données sous Excel

Les mesures ne sont pas cumulables. Ainsi, afin de faire la moyenne des mesures sous MatLab (voir annexe H), il est nécessaire de traiter les données sous format *.xls*. Il est possible de le faire directement sur le programme IE. Pour cela, il suffit de sélectionner « File Utilities » (utilitaires fichiers) dans le menu principal. Ensuite, choisir l'option « Save to Excel Spreadsheet » (Enregistrer sur une feuille Excel) pour accéder au menu de sauvegarde sous le format *.xls* (figure h). Finalement, la sélection de « Save Waveforms and Spectra to Excel Spreadsheet » (figure i). Cette option permet à la fois de récupérer les données temporelles et aussi fréquentielles.

The current file is c:\Impact-E\TestFile.dat, it contains 45 records.

Save summary information for records to from current file

Change parameters for records to in current file

Copy records to from current file to destination file

Save Records to from current file as ASCII Files

Save Records from current file to Excel SpreadSheet

Figure h- Ecran principal de la sauvegarde des fichiers sous un nouveau format

Save results to Excel Spreadsheet for
records to from current file.

Information will be saved to a Microsoft Excel Spreadsheet with the path and file name shown in the text box below. To save the results to a different Excel file (new or existing), enter the path and name in the text box and press the "Enter" key.

c:\Impact-E\TestFileData.xls

Figure i- Ecran de sauvegarde des fichiers .xls

H. Fiche de traitement des mesures sous MatLab

Le programme présenté ici est succinct. D'autres programmes ont été ajoutés sur MatLab afin de tracer des graphiques permettant la comparaison de mesures. Le programme ci-dessous représente la partie du traitement des mesures réalisant la moyenne des mesures faites en un point.

L'instrument IE enregistre les données au format *.dat*, mais permet aussi de transférer les données sur des feuilles Excel (voir sous-partie F.d). Une fois le transfert effectué, il est nécessaire de partitionner la feuille Excel en différentes feuilles toutes les 50 mesures car le fichier brut contient trop de données pour rester contenu dans un seul fichier Excel. Aussi, les ',' doivent être changées en '.' afin que MatLab puisse lire les données.

Le programme a été traité sous la version 7.5.0 de MatLab.

nomfichierexcel.xls devra être changé par le nom du fichier Excel qui comporte les mesures à moyenner.

jMesureX représente la première mesure à traiter (numéro de la mesure) et **kMesureX** la dernière mesure à traiter pour effectuer la moyenne (mesures faites en continu).

cMesureX sera la matrice contenant les valeurs moyennées des mesures (colonne 1 : abscisse – fréquences ; colonne 2 : ordonnée – amplitude).

```
-----  
% Assignation de la matrice  
M=xlsread('nomfichierexcel.xls');  
  
% assignation de la mesure à étudier  
j=jMesureX;  
k=kMesureX;  
  
num_mes=j;  
nm=num_mes*5-5;  
b=M(:, nm+3:nm+4);  
% suppression des valeurs inexistantes  
if isnan(b(end,1))==1  
    b(isnan(b))=[];  
    l=length(b);  
    b=reshape(b, l/2, 2);  
end
```

```

c=zeros (size (b,1),size (b,2));

for num_mes=j:1:k;
nm=num_mes*5-5;

% matrice des données fréquentielles
b=M(:,nm+3:nm+4);

% suppression des valeurs inexistantes
if isnan (b (end,1)) ==1
    b (isnan (b)) = [];
    l=length (b);
    b=reshape (b,l/2,2);
end

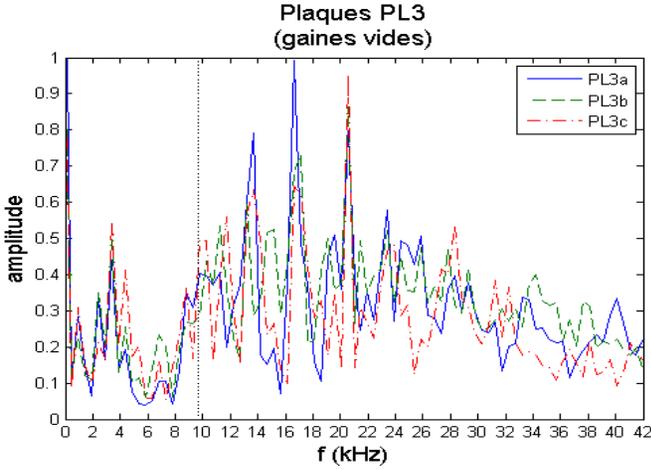
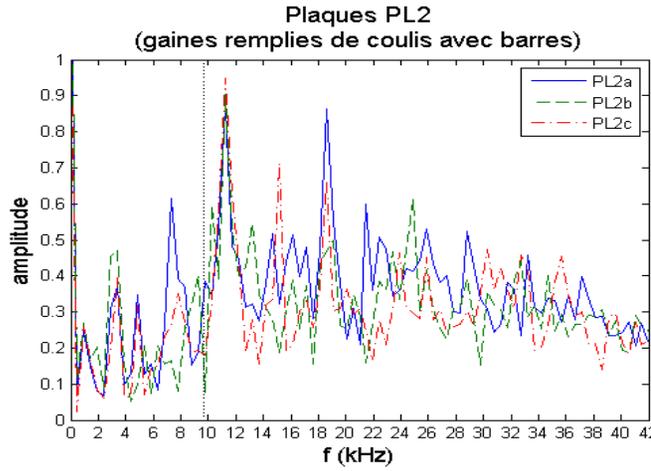
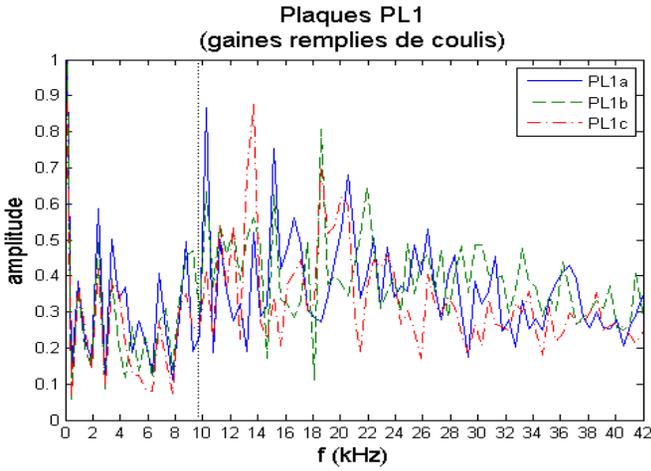
% correction des valeurs faussées
for i=1:1:length (b);
    if b (i,2) >=10000;
        b (i,2) =b (i,2) /10000;
    end
end
c=c+b;

% graphique
hold on
subplot (2,1,1), (plot (b (:,1),b (:,2)));
title ('mesures en un point');
hold off
end
c (:,1:2) =c (:,1:2) / (k-j+1);
subplot (2,1,2), (plot (c (:,1),c (:,2), 'r-'));
title ('moyenne des mesures');

%Assignment de c
cMesureX=c;
-----

```

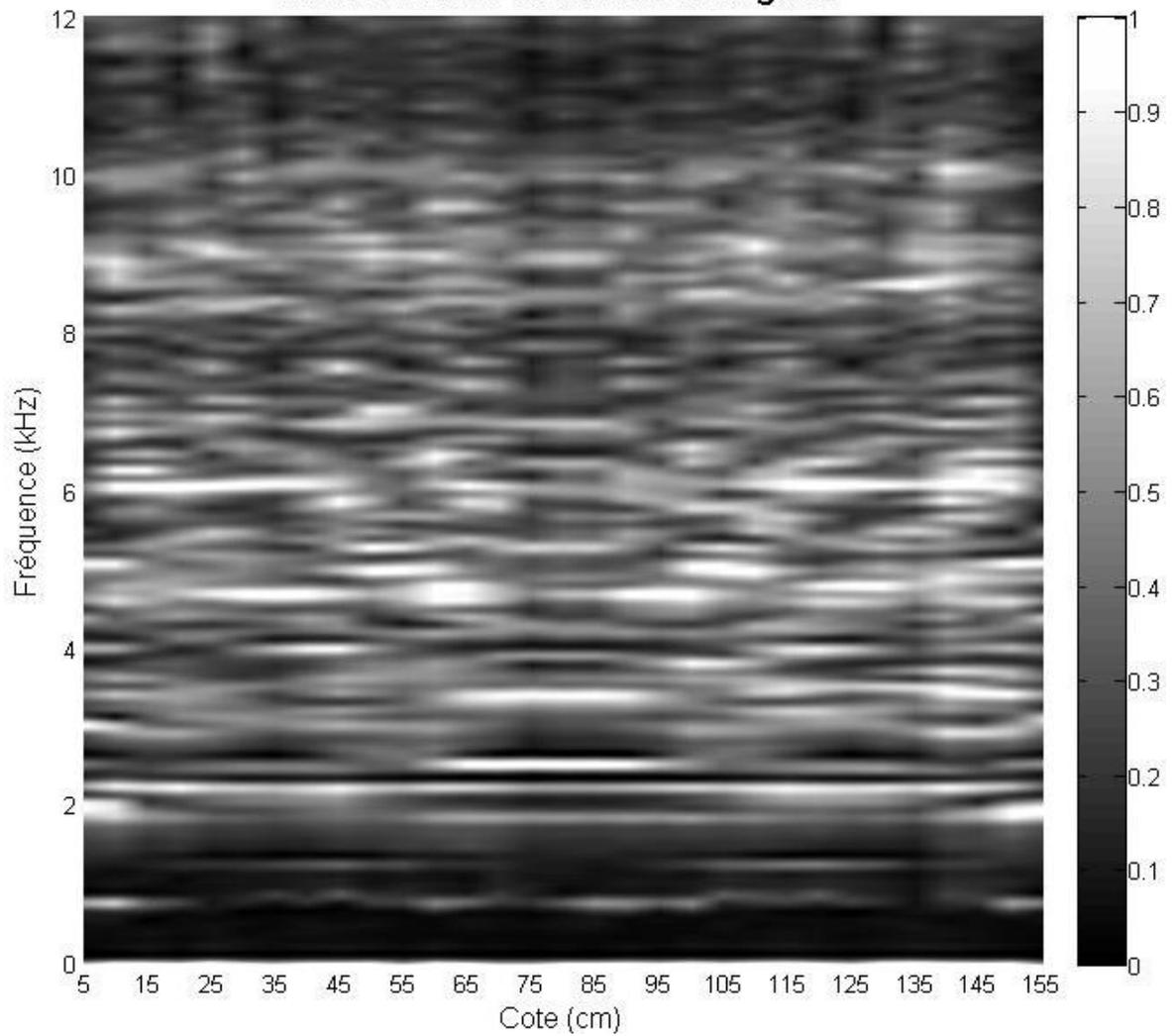
I. Mesure de l'épaisseur des plaques par le capteur du CRIB



J. Résultats de mesures le long des gaines pour les blocs

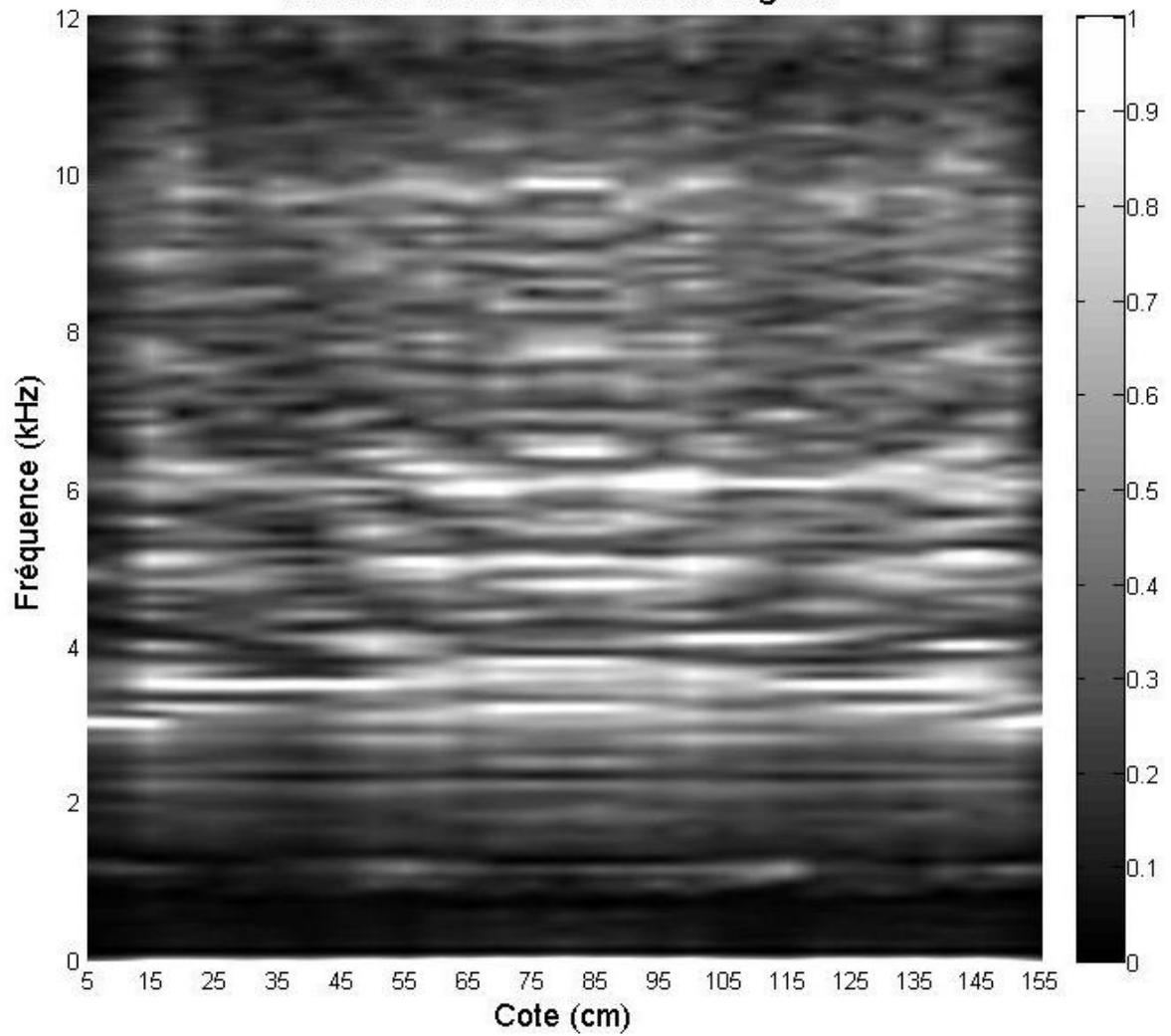
a. Mesures suivant AH

Etude des fréquences caractéristiques pour l'échantillon A,
mesures faites au dessus de la gaine



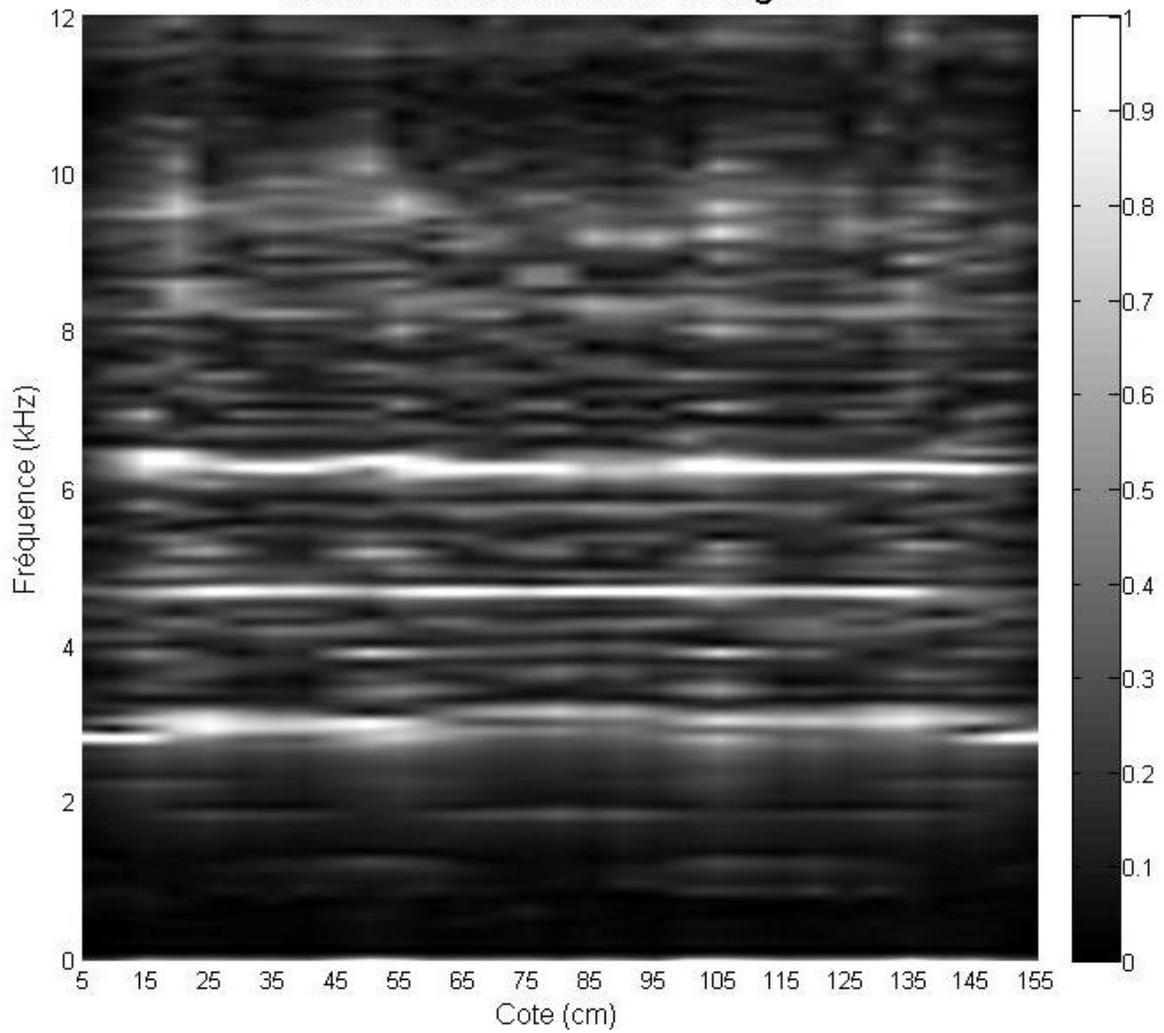
b. Mesures suivant AV

Etude des fréquences caractéristiques pour l'échantillon A,
mesures faites sur le côté de la gaine



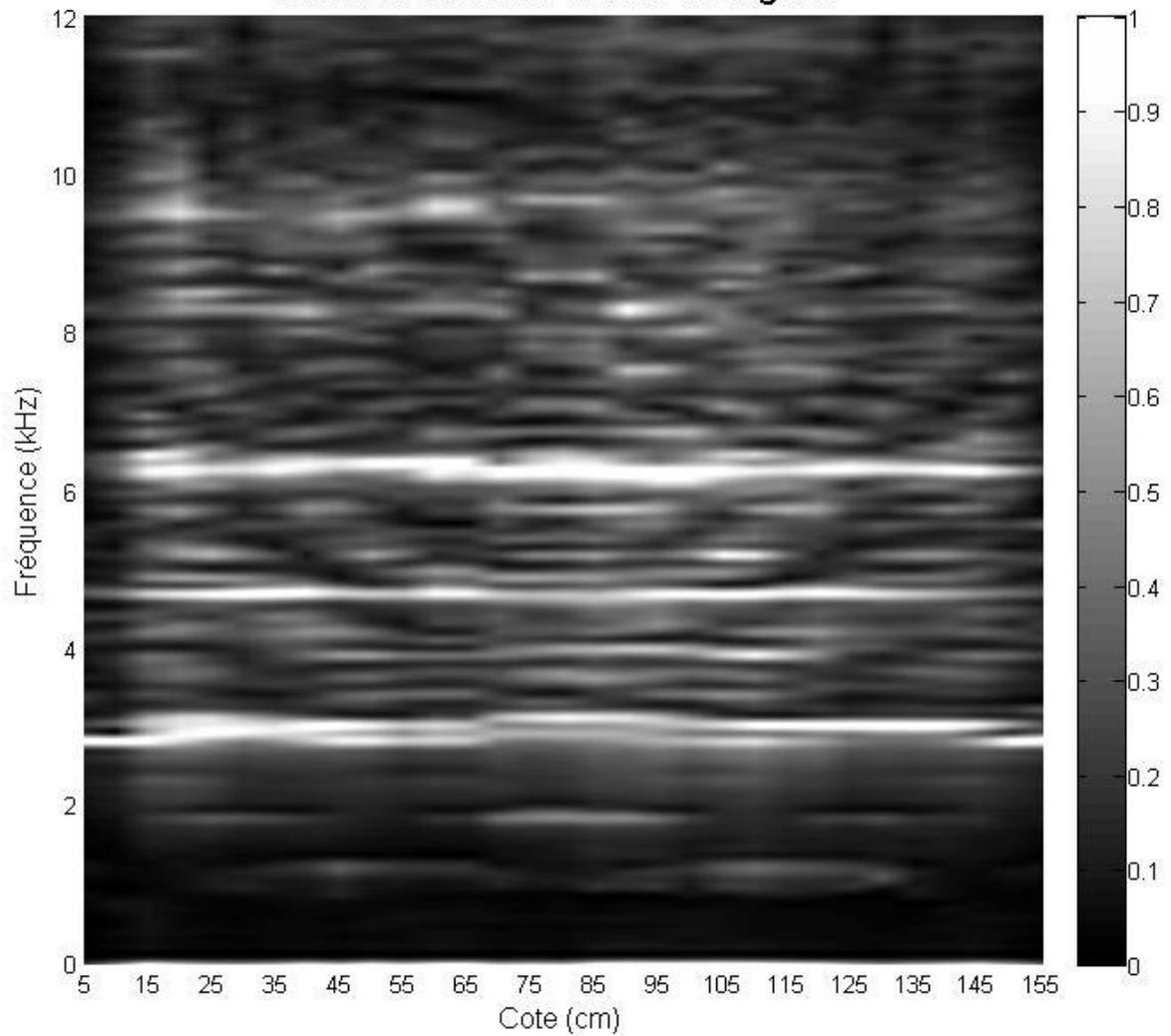
c. Mesures suivant BH

Etude des fréquences caractéristiques pour l'échantillon B,
mesures faites au dessus de la gaine



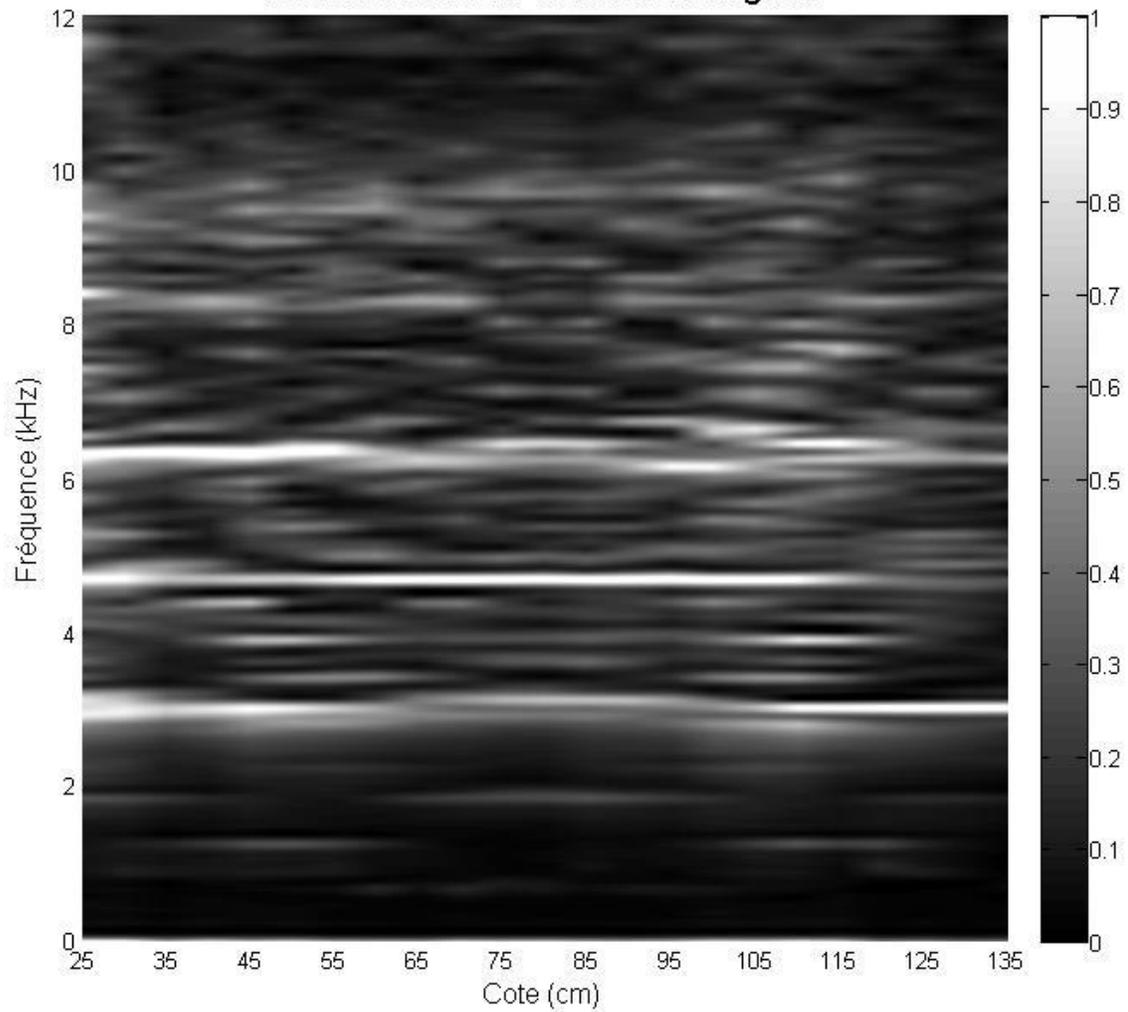
d. Mesures suivant BV

Etude des fréquences caractéristiques pour l'échantillon B,
mesures faites sur le côté de la gaine



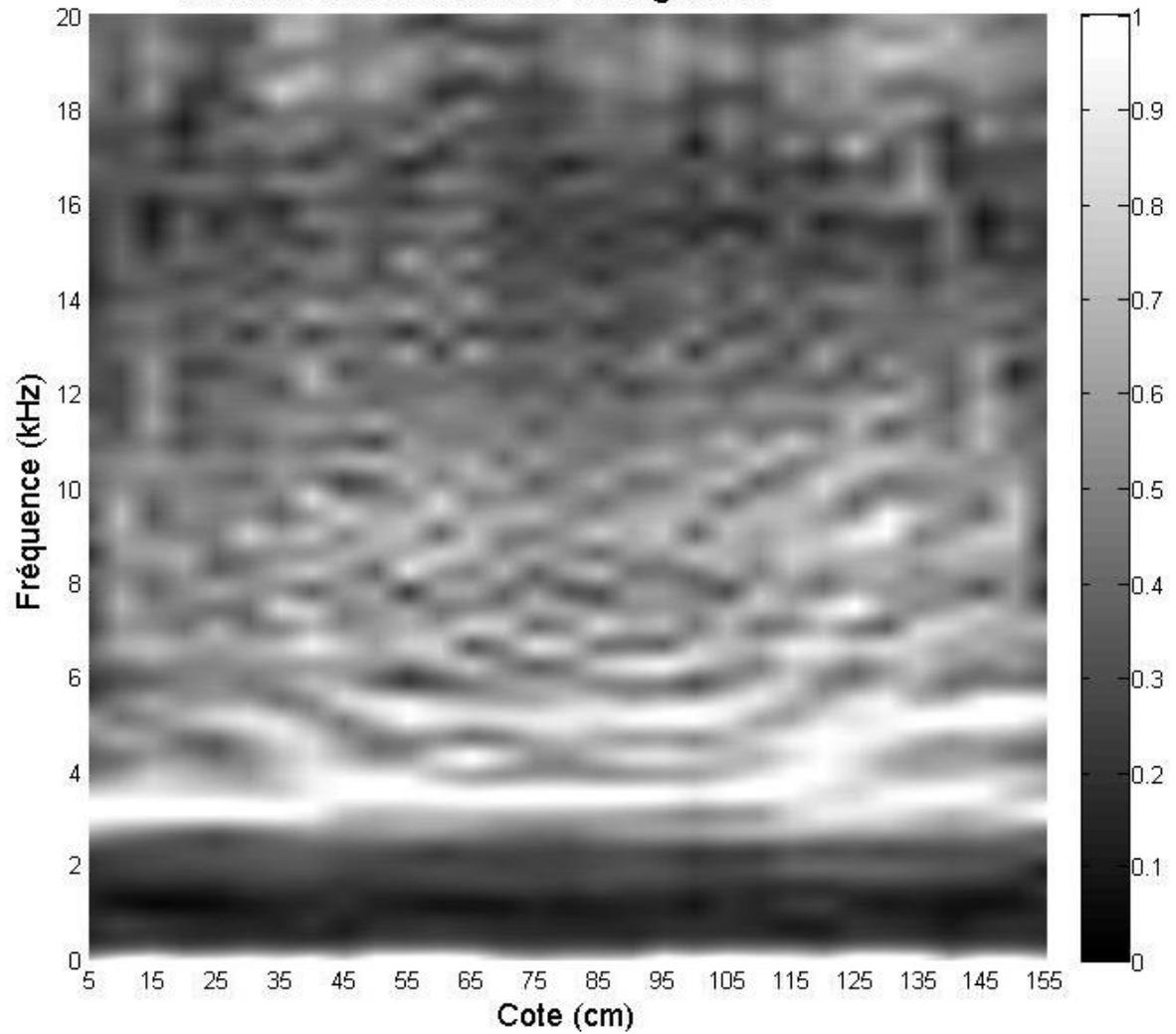
e. Mesures suivant BB

Etude des fréquences caractéristiques pour l'échantillon B,
mesures faites en dessous de la gaine



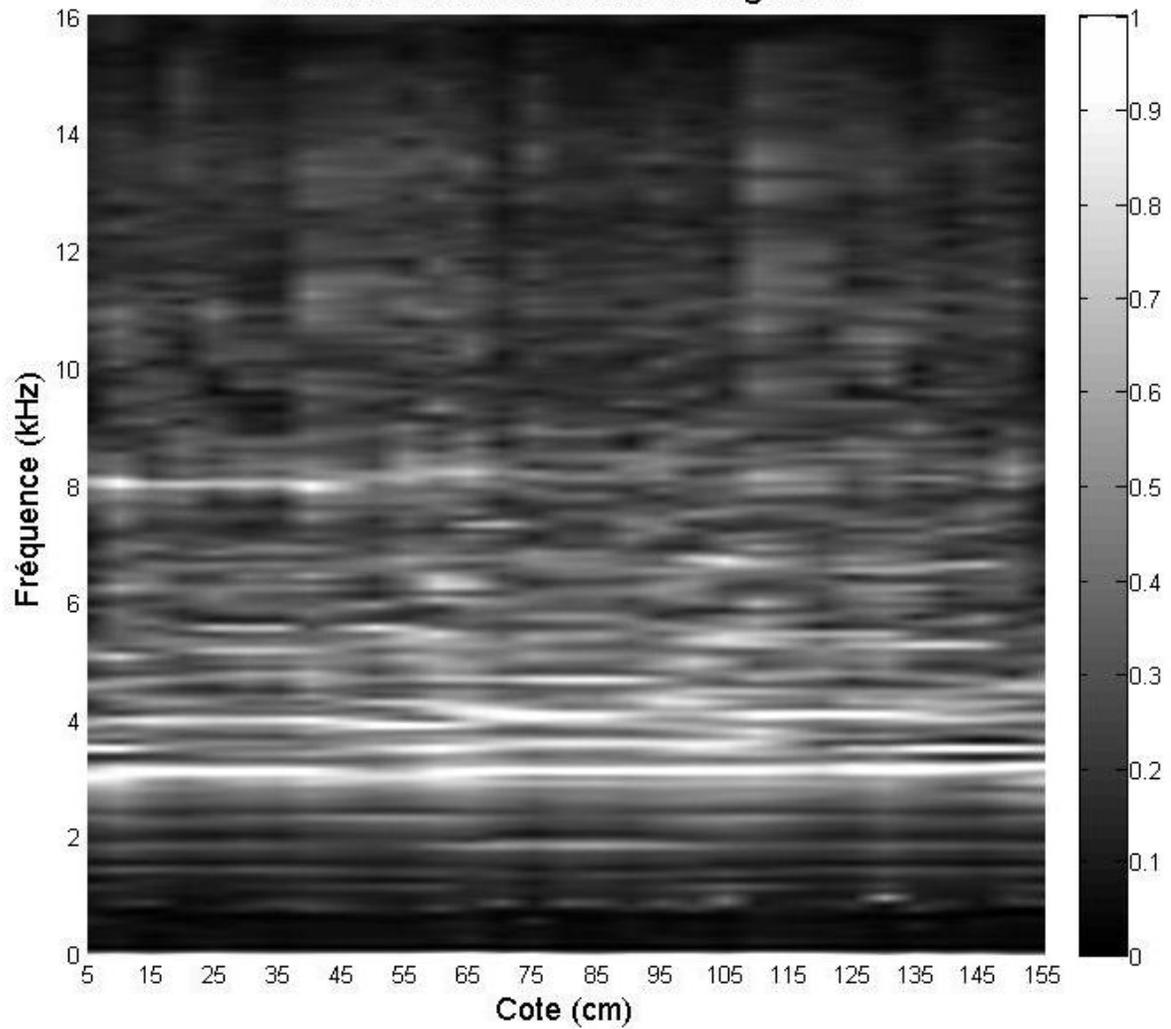
f. Mesures suivant CA

Etude des fréquences caractéristiques pour l'échantillon C,
mesures faites au dessus de la gaine A



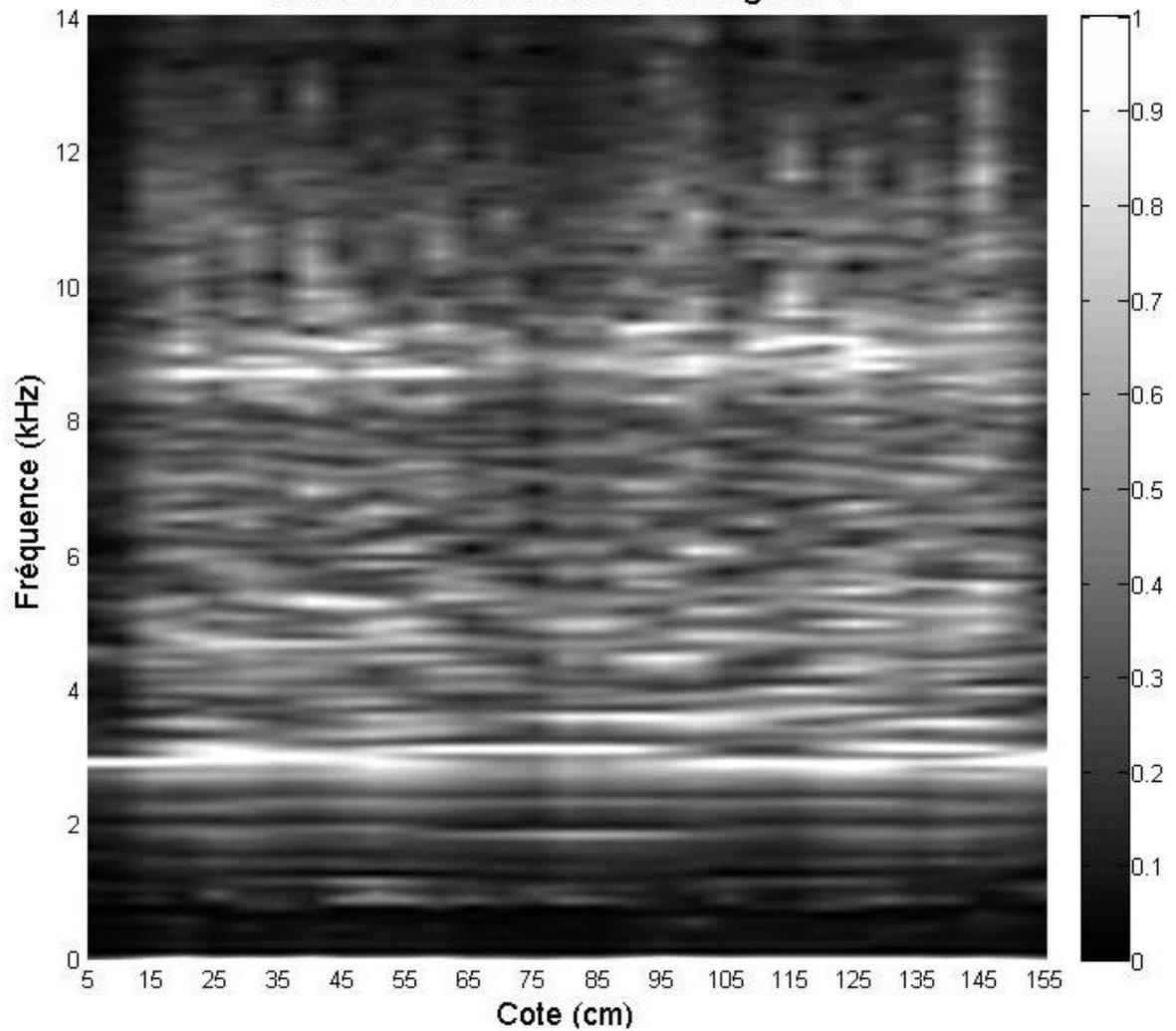
g. Mesures suivant CB

Etude des fréquences caractéristiques pour l'échantillon C,
mesures faites au dessus de la gaine B



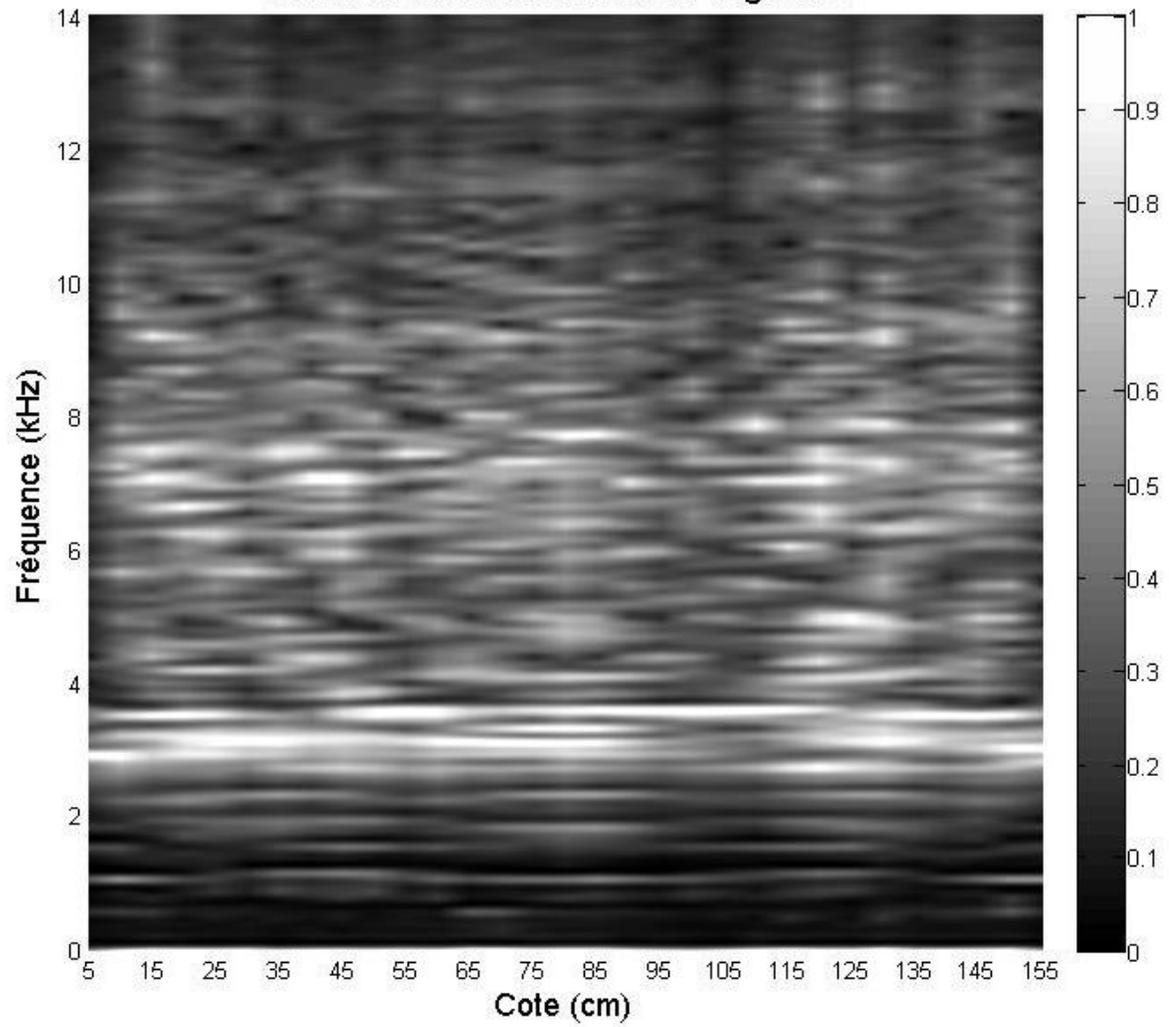
h. Mesures suivant CC

Etude des fréquences caractéristiques pour l'échantillon C,
mesures faites au dessus de la gaine C



i. Mesures suivant CD

Etude des fréquences caractéristiques pour l'échantillon C,
mesures faites au dessus de la gaine D



K. Décryptage des clichés endoscopiques

Les endoscopies permettent d'obtenir des résultats direct quant à la qualité du coulis et à l'état de torons à l'intérieur d'une gaine. Les clichés peuvent paraître compliqués à premier abord, mais une fois la première photographie décryptée, toutes les autres sont très vite interprétées.

Cette annexe permet à un novice de comprendre les résultats endoscopiques obtenus lors des essais pratiqués pour ce mémoire. L'exemple porte sur le cliché suivant (relevé durant les essais endoscopiques) :

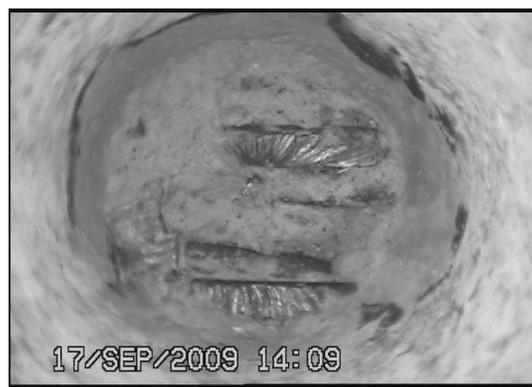


Figure - Endoscopie obtenue de l'intérieur d'une gaine durant les essais sur les segments de poutre.

La première partie de l'identification consiste à déterminer où se situe la gaine et son contenu sur le cliché. Autrement dit, il est nécessaire d'identifier le béton avant d'observer plus précisément le cliché. Le béton est présent le long du perçage et donc se trouvera sur le pourtour de la photographie. Il a été mis en évidence sur la figure suivante par la zone éclaircie. De ce fait, la zone assombrie se trouve être la gaine et son contenu.

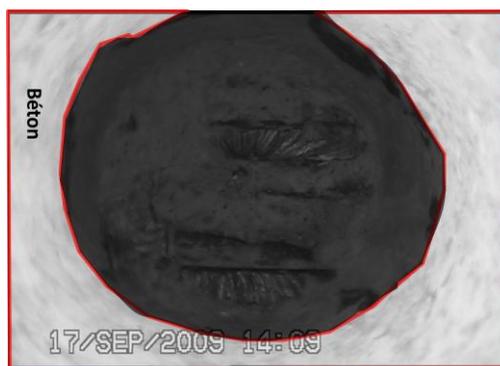


Figure - Mise en évidence du béton (en clair) et de la gaine et son contenu (en foncé)

Une fois le béton percé identifié, il est aisé de dissocier les parties métalliques du coulis. En effet, que ce soit dans le cas de la gaine métallique ou des torons en acier, la lumière propagée par l'endoscope dans le perçage étudié se reflète sur les parties métalliques qui se mettent à briller à certains endroits. Ces zones brillantes ressortent de l'image et permettent d'identifier les torons (voir figure page suivante). La gaine métallique étant percée, elle se situe sur le pourtour de l'ouverture. Elle sépare le béton et le coulis. Quant au coulis, il se différencie du béton par sa texture et sa couleur différente de ce dernier.

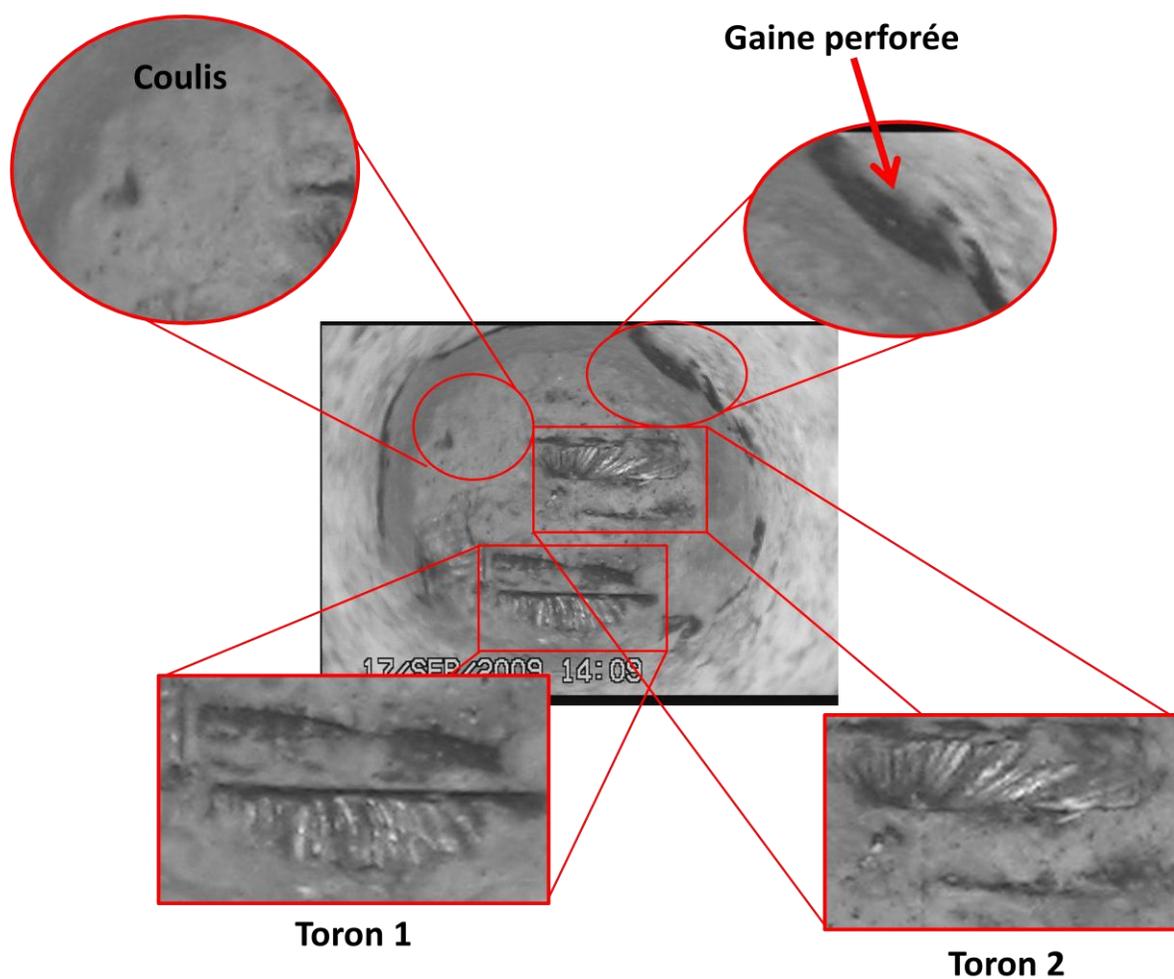


Figure - Identification des différents éléments dans la gaine.

Dans le cas d'une étude à l'aide de l'outil d'observation à 90°, le cliché donne une image beaucoup plus rapprochée de la zone étudiée (en raison du très faible recul permis par les 2 cm de diamètre du perçage). Il est alors possible d'observer sur les photographies obtenus le pourtour supérieur de la gaine perforée (qui reflète la lumière), le coulis contenu dans la gaine, le vide de coulis (s'il y a lieu) et parfois un toron à proximité de la caméra. Un exemple est donné ci-dessous.

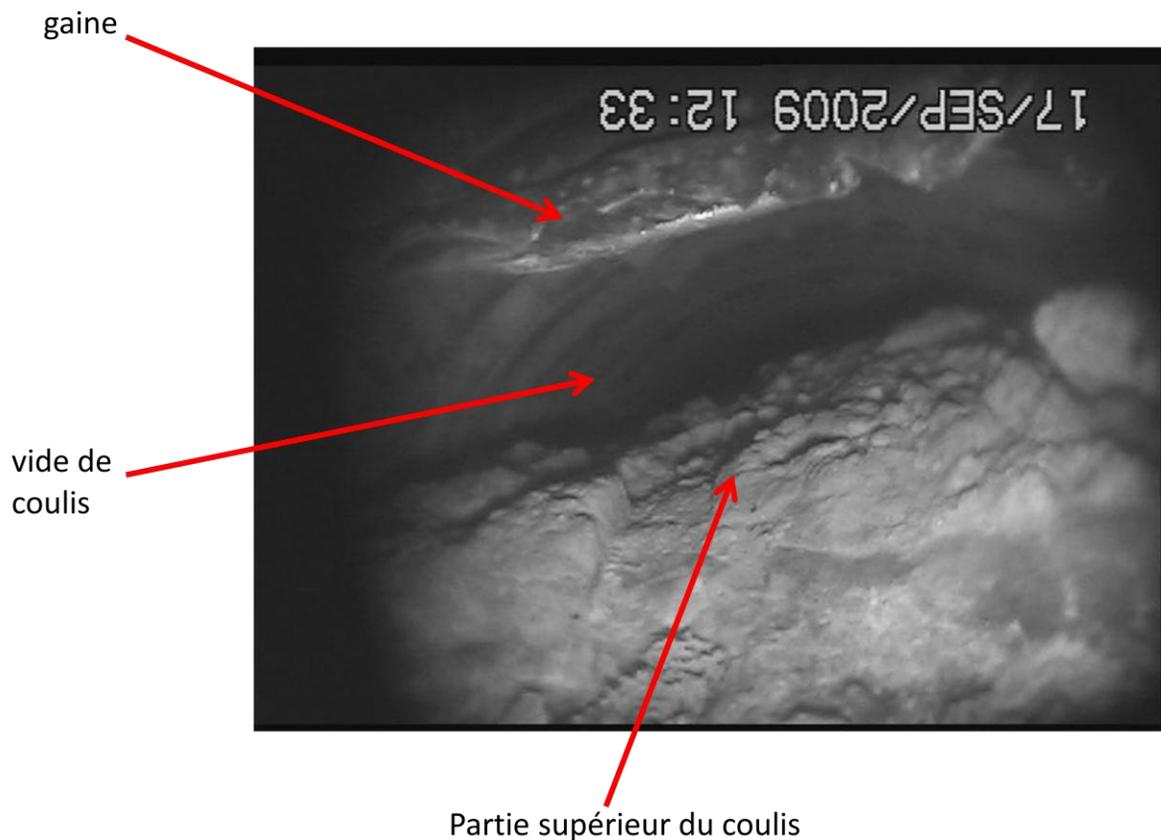


Figure – Endoscopie pratiquée avec l'endoscope muni de l'emboute d'observation à 90°.

L. Résultats complets sur les segments de poutre B4S3 et B2S4

a. Segment de poutre B4S3

Comme le segment de poutre B2S3, le segment B4S3 correspond au point haut du profil des câbles de précontrainte. La surface d'étude n'est donc pas plane et des restes de goudron y sont encore présents (figure 0.1) ce qui a rendu les essais IE difficiles. De plus, en raison du procédé de démantèlement des segments de poutre, le segment B4S3 présente un plan de fissuration sur toute sa longueur au-dessus des gaines.



Figure 0.1- Surface d'étude de la poutre B2S3

Aussi, le segment présente à son extrémité coté Nord, sur une quarantaine de centimètres, la destruction complète de la surface supérieure du tablier, et ce, jusqu'au plan des gaines (figure 0.2). De ce fait, les mesures IE ont été effectuées depuis la côte 30 jusqu'à la côte 265 *cm* dans le cas où cela à été possible (la côte 0 *cm* correspondant à la face Sud du segment).



Figure 0.2 - Segment de poutre B4S3 : extrémité du segment coté Nord

Comme pour les segments précédents, les endoscopies permettent d'atteindre deux objectifs : l'analyse de l'intérieur des gaines ainsi qu'une aide à l'interprétation des résultats obtenus par IE. Dans les paragraphes qui suivent, les résultats obtenus par endoscopie sont présentés en premier, puis les résultats IE sont interprétés à l'aide des résultats précédents.

Il est à prévoir que les résultats IE seront fortement influencés par la présence d'un plan de fissuration au-dessus des gaines sur toute la longueur du segment de poutre (voir figure 0.3).



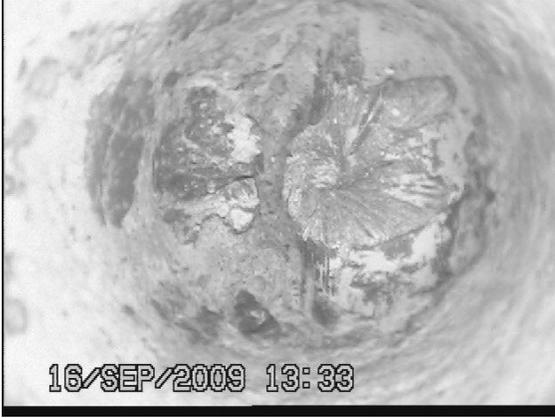
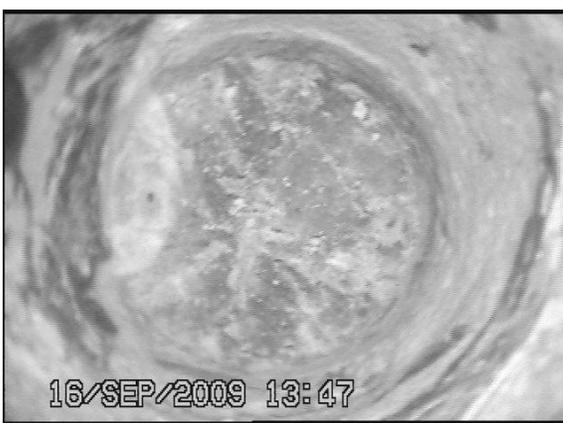
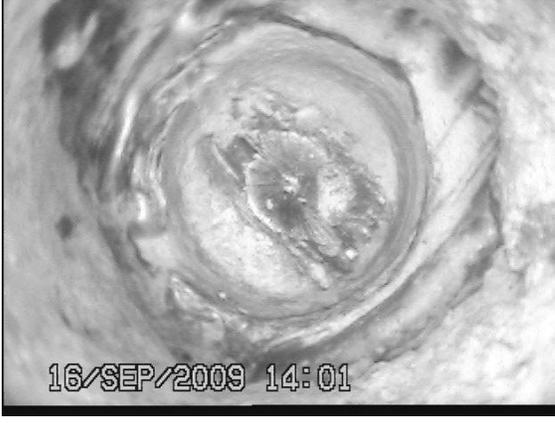
Figure 0.3- Plan de fissuration au-dessus des gaines du bloc B4S3

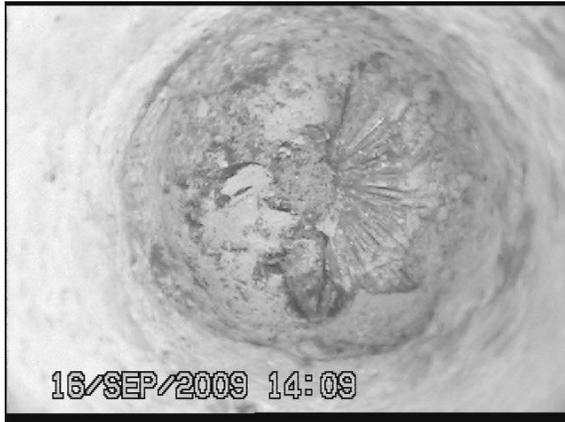
i. Observation à l'endoscope

Les résultats obtenus des endoscopies sont présentés dans l'ordre de prises de clichés. Les photos du tableau 0.1 présentent les résultats obtenus lors des prises de vues.

Contrairement au premier point haut, celui-ci a permis d'atteindre la gaine pratiquement pour un perçage sur deux malgré la quantité importante de barres d'acier dans le tablier. Ces perçages à l'intérieur de la gaine ont permis d'observer la bonne qualité d'injection du coulis (c.à.d. la présence de coulis tout autour des torons, par exemple à la cote A115) ainsi que sa qualité, son homogénéité (exemple à la cote A180) en plus de vérifier l'état des torons (exemple à la cote B160).

Tableau 0.1- Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B4S3

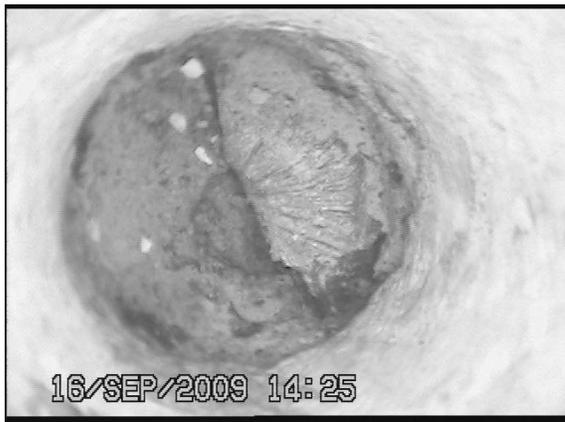
| | |
|--|--|
|  <p>16/SEP/2009 12:21</p> |  <p>16/SEP/2009 13:33</p> |
| <p>A215 : Arrêt du perçage par la présence d'une barre d'armature sur le pourtour du trou bloquant le foret ($p = 72 \text{ mm}$)</p> | <p>B180 : armature passive ($p = 65 \text{ mm}$)</p> |
|  <p>16/SEP/2009 13:47</p> |  <p>16/SEP/2009 14:01</p> |
| <p>A180 : gaine perforée avec coulis apparent ($p = 113 \text{ mm}$)</p> | <p>B160 : gaine perforée avec torons apparents ($p = 128 \text{ mm}$)</p> |



A145 : armature passive ($p = 75 \text{ mm}$)



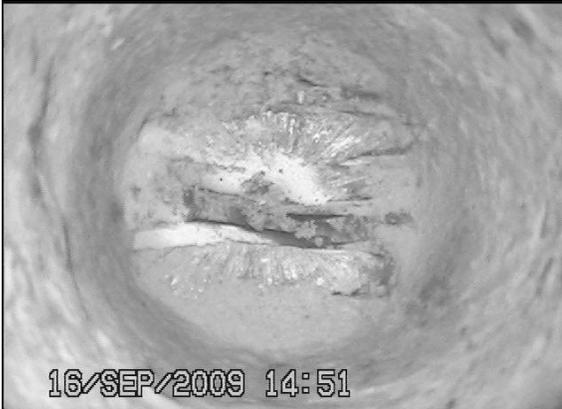
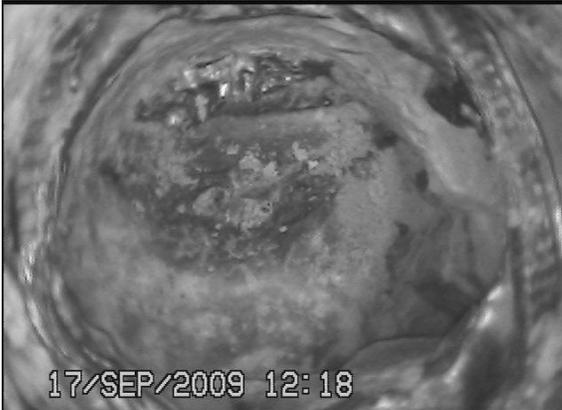
A140 : armature passive ($p = 73 \text{ mm}$)

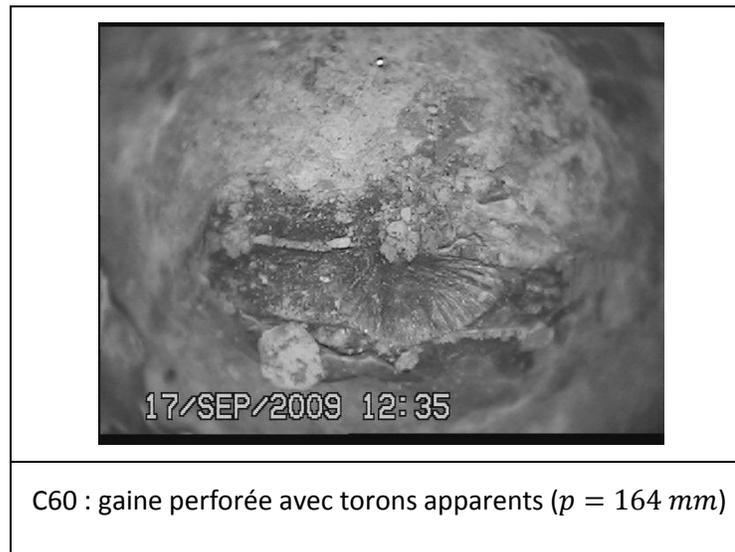


B135 : armature passive ($p = 67 \text{ mm}$)



C125 : armature passive ($p = 61 \text{ mm}$)

| | |
|---|--|
|  <p>16/SEP/2009 14:51</p> |  <p>17/SEP/2009 11:32</p> |
| <p>A115 : gaine perforée avec torons apparents ($p = 128 \text{ mm}$)</p> | <p>B95 : armature passive ($p = 55 \text{ mm}$)</p> |
|  <p>17/SEP/2009 12:18</p> |  <p>17/SEP/2009 12:22</p> |
| <p>C90 : gaine perforée à fleur des torons ($p = 150 \text{ mm}$)</p> | <p>B85 : gaine non perforée ($p = 103 \text{ mm}$)</p> |



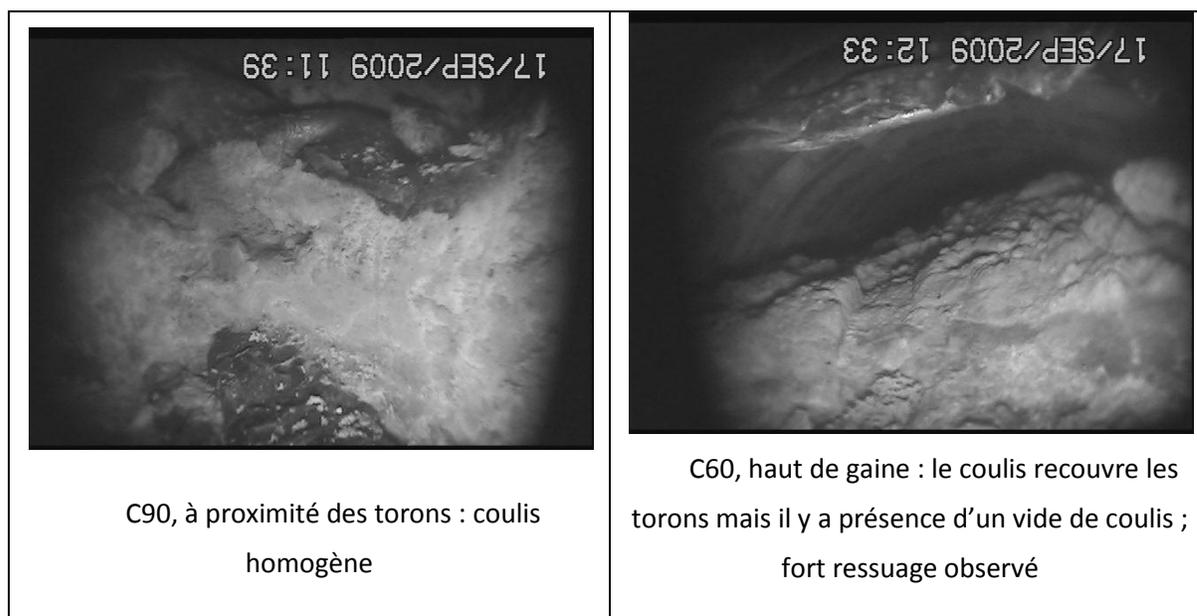
Les perçages ayant permis d'atteindre l'intérieur des gaines a donc permis d'observer la qualité du coulis et l'état des torons. Aucune différence de couleur ou d'homogénéité du coulis n'a été relevée à partir des endoscopies en vue direct, ce qui sera confirmé par les endoscopies à l'aide de l'outil d'observation à 90°. Par contre, aucun vide n'est visible dans ses premières acquisitions. Les vides de coulis ne sont détectés que par l'outil d'observation à 90° (voir la sous-section suivante).

ii. Observation à 90° du coulis et des vides

L'observation directe à l'endoscope permet d'obtenir une grande quantité d'information mais il est préférable de les confirmer via une observation de l'intérieur des perçages à 90°. Les acquisitions d'images à 90° obtenues à l'endoscope sont montrées au tableau 0.2.

Tableau 0.2- Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B4S3 (vues à 90°)

| | |
|--|---|
|  <p>16/SEP/2009 14:00</p> |  <p>17/SEP/2009 11:21</p> |
| <p>B160 : coulis homogène avec marque de ressuage sur le dessus (à gauche) ; remplissage incomplet de la gaine</p> | <p>A115 : coulis homogène sur toute sa hauteur ; les torons d'acier apparents en bas montrent que le coulis a été injecté correctement autour d'eux</p> |
|  <p>17/SEP/2009 11:22</p> |  <p>17/SEP/2009 11:38</p> |
| <p>A115, béton/haut de la gaine : le coulis s'éclairci à proximité du haut de la gaine (signe de ressuage)</p> | <p>C90, haut de la gaine : vide de coulis apparent</p> |



Les clichés permettent, cette fois-ci, d'observer le vide de coulis dans la gaine. De plus, le cliché à la cote C60 permet d'observer que ce vide n'est pas un défaut local, car il se prolonge à l'intérieur de la gaine. Du fait que la gaine contienne un vide partiel, le ressuage du coulis en est d'autant plus visible par sa surface supérieure mais aussi suivant le pourtour du perçage (cote A115). Malgré la déformation de la gaine durant le perçage (en raison du manque de coulis à l'intérieur de celle-ci), cela a moins gêné à la visibilité dans la gaine comparé aux endoscopies effectuées pour le segment de poutre B2S3.

Les endoscopies ont aussi permis d'observer la présence du plan de fissuration au-dessus des gaines. La figure 0.4 montre un exemple de la fissure observée à la cote B85.



Figure 0.4- Cliché du plan de fissuration au-dessus des gaines obtenu par endoscopie (observation à 90°) à la cote B85

iii. Résultats IE

Comme pour les deux premiers segments de poutre, les fréquences images de l'épaisseur de la pièce sont attendues à 3 *kHz* ou en dessous (voir tableau 0.3). La position des gaines par rapport à la surface d'étude variant de 100 à 190 *mm* en moyenne sur la longueur de la poutre, la fréquence caractéristique f_{vide} appartient à l'intervalle 8 – 16 *kHz*. :

Comme dans le cas du segment B2S3, les barres d'acier rencontrées lors des perçages sont à peu près à mi-profondeur entre les gaines et la surface d'étude et la présence du vide dans les gaines amène à des valeurs de fréquences théoriques similaires pour les deux cas (barres d'acier et vides). De ce fait, il est difficile, si les résultats pratiques suivent la théorie, de localiser les vides de coulis et surtout de les dissocier des barres métalliques.

Tableau 0.3- Valeurs des fréquences théoriques image de l'épaisseur de la pièce

| h (mm) | v_p (m/s) | f_1 (kHz) | f_2 (kHz) | f_3 (kHz) | f_4 (kHz) | f_5 (kHz) | f_6 (kHz) |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1550 | 3300 | 1,00 | 1,56 | 2,03 | 2,14 | 2,56 | 2,67 |

Les résultats obtenus par IE sont reportés aux figures 0.5 à 0.8. Malgré le mauvais état de surface du segment B4S3, les résultats IE ont pu être produits en un nombre important (excepté pour les mesures effectuées au-dessus de la gaine D pour lesquelles la surface présentait plus de défauts que pour les trois autres gaines). Les résultats IE obtenus pour ce segment de poutre sont très marqués par le plan de fissuration présent au-dessus des gaines.

Les résultats obtenus sont comparés aux résultats obtenus par endoscopies (les zones percées sont représentées par les tirets).

- Gaine A :

Les résultats IE obtenus pour la gaine A sont présentés à la figure 0.5 et un récapitulatif des endoscopies est présenté au tableau 0.4. Pour chaque perçage, la fréquence théorique image de la profondeur d'une barre d'acier passif ou du vide de coulis dans la gaine a été calculée dans le tableau.

Tableau 0.4- Récapitulatif des résultats obtenus pour la gaine A par endoscopie avec les fréquences théoriques calculées associée

| Cote | Profondeur atteinte p (mm) | Résultats par endoscopie (gaine ou barre rencontrée) | Fréquence attendue (kHz) |
|------|------------------------------|--|--------------------------|
| A215 | 72 | barre | 11 |
| A180 | 113 | gaine | 14 |
| A140 | 73 | barre | 11 |
| A115 | 128 | gaine | 12 |

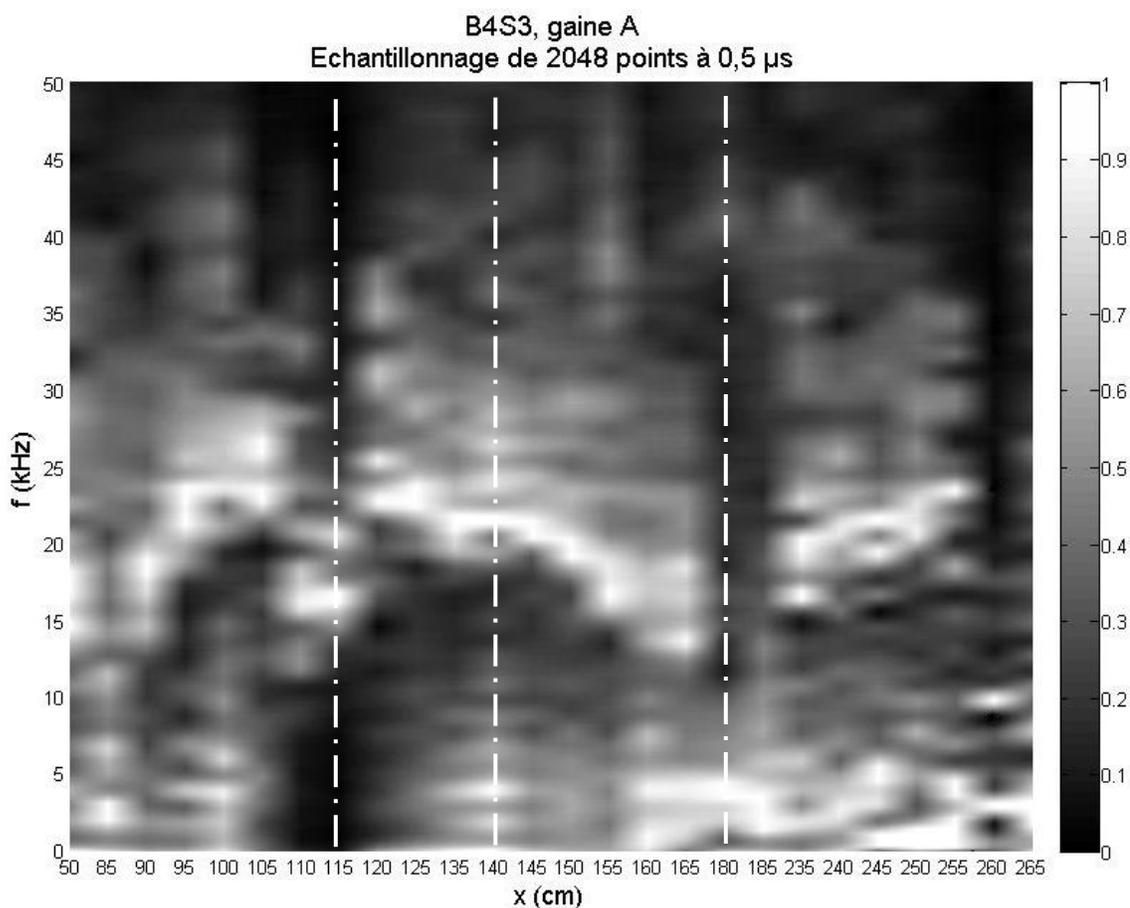


Figure 0.5- Résultats IE du segment B4S3, gaine A

D'un point de vue de comportement général des résultats IE pour les mesures faites au-dessus de la gaine A, le comportement des fréquences excitées est très différent des résultats obtenus jusqu'alors sur les deux premiers segments de poutre.

En effet, la plupart des pics de fréquence varient entre 15 et 25 kHz . Si ces pics sont image d'un vide, il se trouvent au-dessus du plan des gaines (dont les fréquences sont attendues en-dessous de 16 kHz). De plus, même si leurs valeurs varient, les pics se suivent les uns par rapport aux autres. Cela montre une continuité dans le défaut détecté même si sa profondeur varie le long du segment de poutre. Ce comportement est caractéristique de la présence d'un plan de fissuration au-dessus de la gaine A.

Il est important de noter que le pic de fréquence habituellement présent autour de 3 – 4 kHz n'apparaît pas à la figure 0.5. L'absence de ce pic qui représente la profondeur de la pièce indique que les ondes ont été bloquées plus haut. Cela peut être expliqué par le fait que les ondes ont pu être perturbées par la présence de la fissure.

Quant aux perçages effectués sur la pièce, les valeurs attendues pour les pics de fréquence image du vide dans la gaine ou d'une barre n'apparaissent pas à la figure 0.5.

- Gaine B :

Les résultats IE obtenus pour la gaine B sont présentés à la figure 0.6 et un récapitulatif des endoscopies est présenté au tableau 0.5.

Tableau 0.5- Récapitulatif des résultats obtenus pour la gaine B par endoscopie avec les fréquences théoriques calculées associée

| Cote | Profondeur atteinte p (mm) | Résultats par endoscopie (gaine ou barre rencontrée) | Fréquence attendue (kHz) |
|------|------------------------------|--|--------------------------|
| B182 | 65 | barre | 13 |
| B177 | 33 | barre | 25 |
| B160 | 128 | gaine | 12 |
| B135 | 67 | barre | 12 |
| B95 | 55 | barre | 15 |
| B85 | 103 | gaine | 15 |

Les résultats obtenus des mesures IE au-dessus de la gaine B sont similaires à ceux de la gaine A. Il y a toujours la présence d'un pic de fréquence entre 15 et 25 kHz pour la plupart des points de mesures.

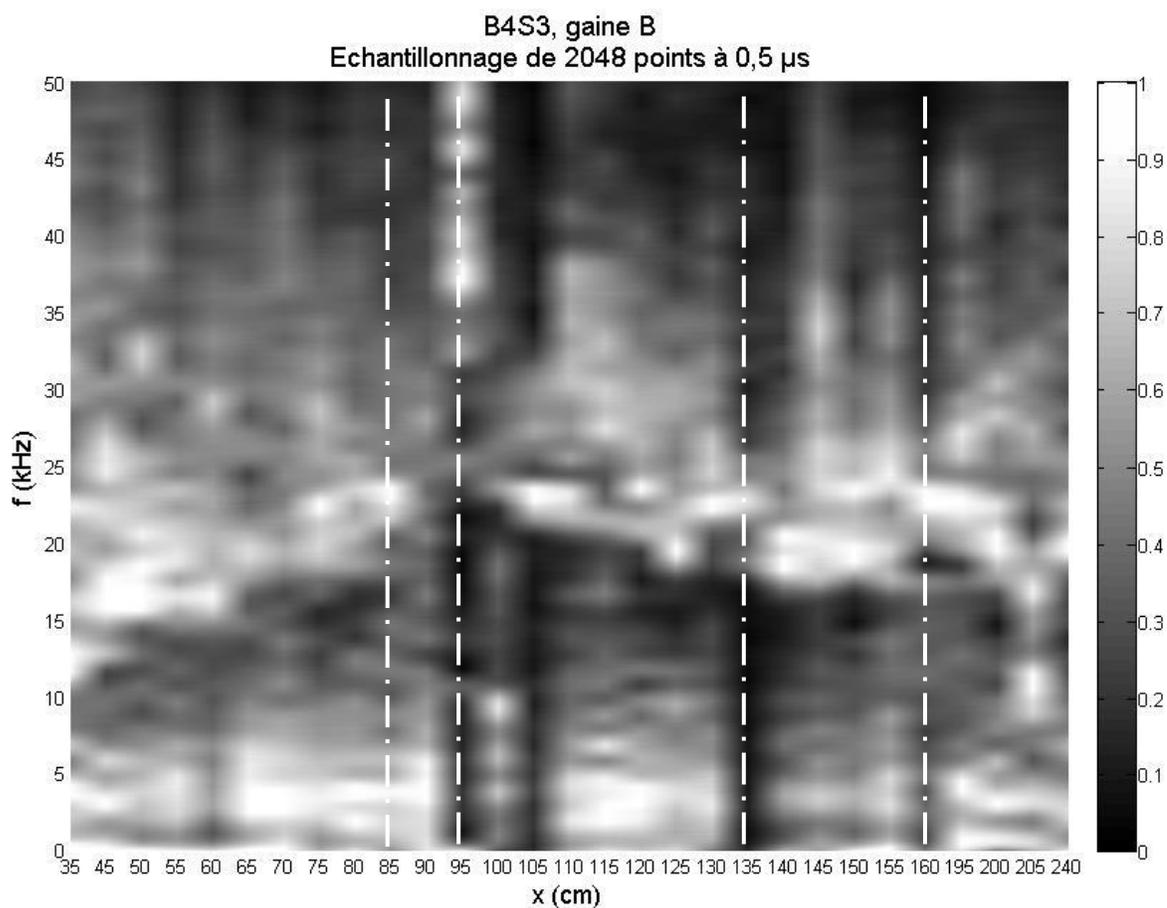


Figure 0.6- Résultats IE du segment B4S3, gaine B

Cependant, le pic de fréquence autour de 3 – 4 kHz est présent par intermittence alors qu’il était inexistant pour les résultats IE de la gaine A. Cela veut dire que les ondes ont pu se propager plus aisément jusqu’au fond de la pièce et revenir jusqu’à la surface d’étude. Cette différence notable entre les figures 0.5 et 0.6 montre que l’épaisseur de la fissure présente au-dessus des gaines varie. Cela peut expliquer qu’au niveau de la gaine A l’ouverture de la fissure est plus importante qu’au niveau de la gaine B. Une seconde hypothèse possible serait que le nombre de fissure soit localement plus important au niveau de la gaine A comparativement à la gaine B.

Le plan de fissuration provient du mode de destruction de la structure (exemple figure 5.22). Effectivement, le démantèlement des tabliers et la récupération des segments de

poutre ont été effectués en plusieurs étapes. Cela a entraîné la propagation de contraintes inégalement réparties dans le segment B4S3 entraînant l'initiation d'une ou plusieurs fissures. Cette hypothèse se confirme d'ailleurs avec les résultats IE obtenus au-dessus de la gaine C.

En ce qui concerne les fréquences théoriques obtenues pour les perçages aucun pic de fréquence n'apparaît aux valeurs attendues sur les résultats.

- Gaine C :

Les résultats IE obtenus pour la gaine C sont présentés à la Figure 0.7 et un récapitulatif des endoscopies est présenté au tableau 0.6.

Tableau 0.6- Récapitulatif des résultats obtenus pour la gaine C par endoscopie avec les fréquences théoriques calculées associée

| Cote | Profondeur atteinte p (mm) | Résultats par endoscopie (gaine ou barre rencontrée) | Fréquence attendue (kHz) |
|------|------------------------------|--|--------------------------|
| C125 | 61 | barre | 14 |
| C90 | 150 | gaine | 11 |
| C60 | 164 | gaine | 10 |

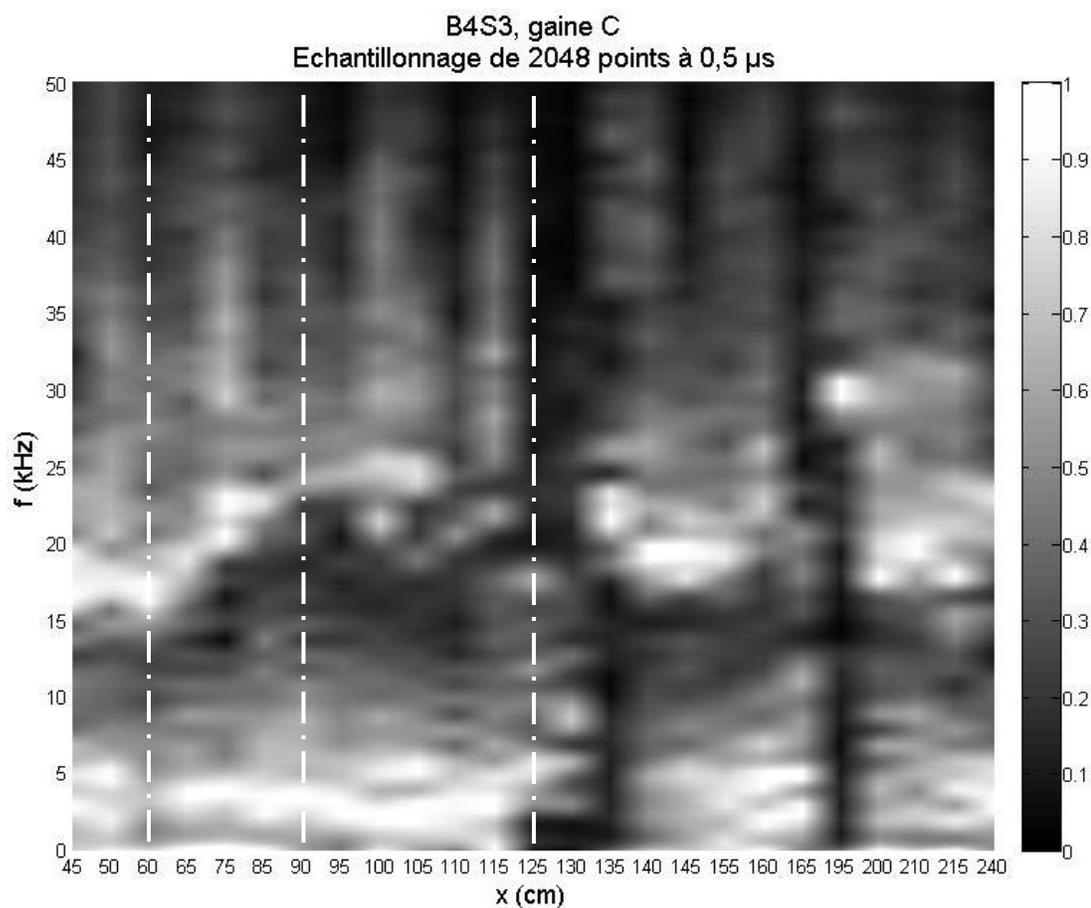


Figure 0.7- Résultats IE du segment B4S3, gaine C

Les observations sur les résultats IE obtenus sont les mêmes que dans le cas de la gaine B : la présence de pics de fréquence entre 15 et 25 kHz révèlent l'existence de la fissure mais la présence des pics autour de 3 – 4 kHz montrent que les ondes arrivent quand même à faire un aller-retour complet depuis la surface d'étude jusqu'au fond de la pièce. D'autre part, comme pour les cas précédents, les pics de fréquence attendus suivant la présence de vide de coulis ou de barre d'acier ne sont pas présents sur les résultats.

- Gaine D :

En raison du mauvais état de la surface au-dessus de la gaine D, seuls 4 point de mesures IE ont pu donner des résultats. Il est difficile de pouvoir comparer les résultats sur la longueur de la gaine. Tout de même, la fréquence autour de 3 – 4 *kHz* pour les 4 mesures.

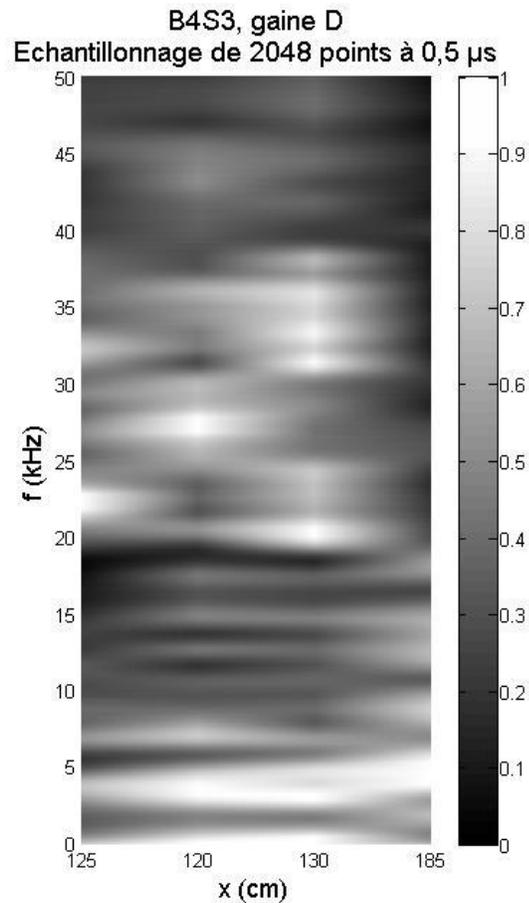


Figure 0.8- Résultats IE du segment B4S3, gaine D

Aucune auscultation par endoscopie n'a été pratiquée sur cette gaine.

b. Segment de poutre B2S4

Comme le segment de poutre B4S4, le segment B2S4 est un segment de poutre qui correspond au point bas du profil des câbles de précontrainte. Sa surface d'étude est plane

ce qui a rendu les essais IE aisés. Toutefois, la surface présente une zone de désagrégation et des fissures longitudinales à proximité de la localisation des gaines de (figure 0.9).

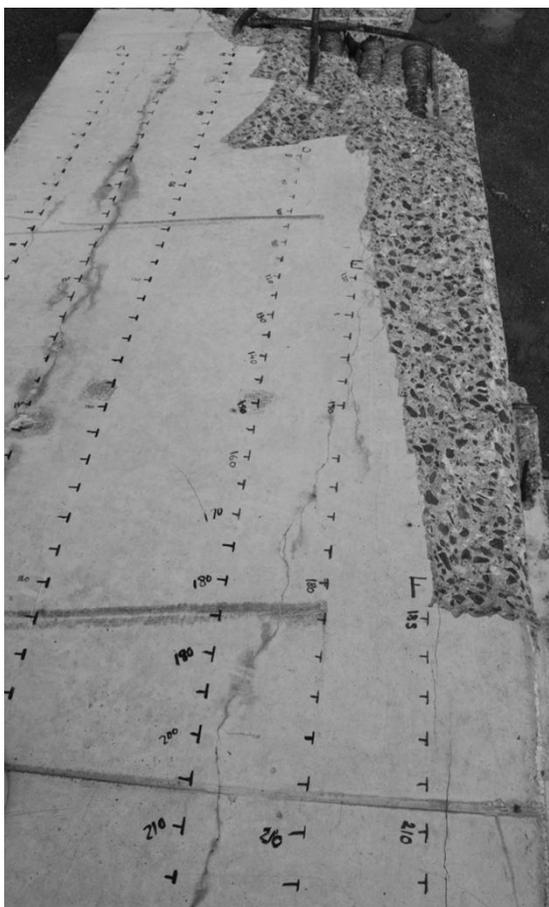


Figure 0.9- Fissures observées sur le segment de poutre B2S4
(gaine A sur la gauche; gaine F sur la droite)

La surface présente les défauts suivants :

- Une fissure depuis la cote 75 jusqu'à la fin du segment pour la gaine A ;
- Une fissure depuis le début du segment jusqu'à la cote 200 pour la gaine B ;
- Aucune fissure au-dessus de la gaine C mais une irrégularité de la surface sur la longueur à proximité de la gaine due au coffrage ;

- Une fissure depuis le début du segment à proximité du dessus de la gaine E jusqu'à la cote 170 puis qui passe à proximité de la gaine D depuis la cote 190 jusqu'à la fin.
- Une fissure sur toute la longueur de la gaine F.

Les mesures IE ont été effectuées depuis la côte 30 jusqu'à la zone abimée pour les gaine A à C et depuis la zone abimée jusqu'à la cote 270 pour les gaines D à F (la côte 0 *cm* part de la face Sud du segment).

i. Observation à l'endoscope

Les résultats obtenus des endoscopies sont présentés dans l'ordre des prises de clichés. Les photos du tableau 0.7 présentent les résultats obtenus lors des prises de vues. Seulement 5 endoscopies ont été pratiquées sur ce bloc car les gaines n'ont pas pu être perforées.

Tableau 0.7- Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B2S4

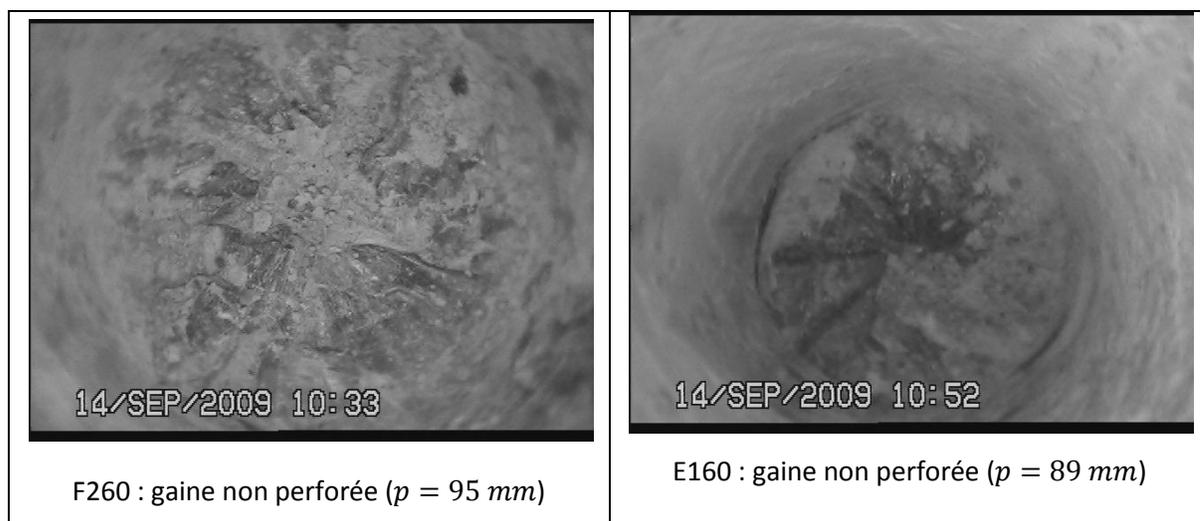
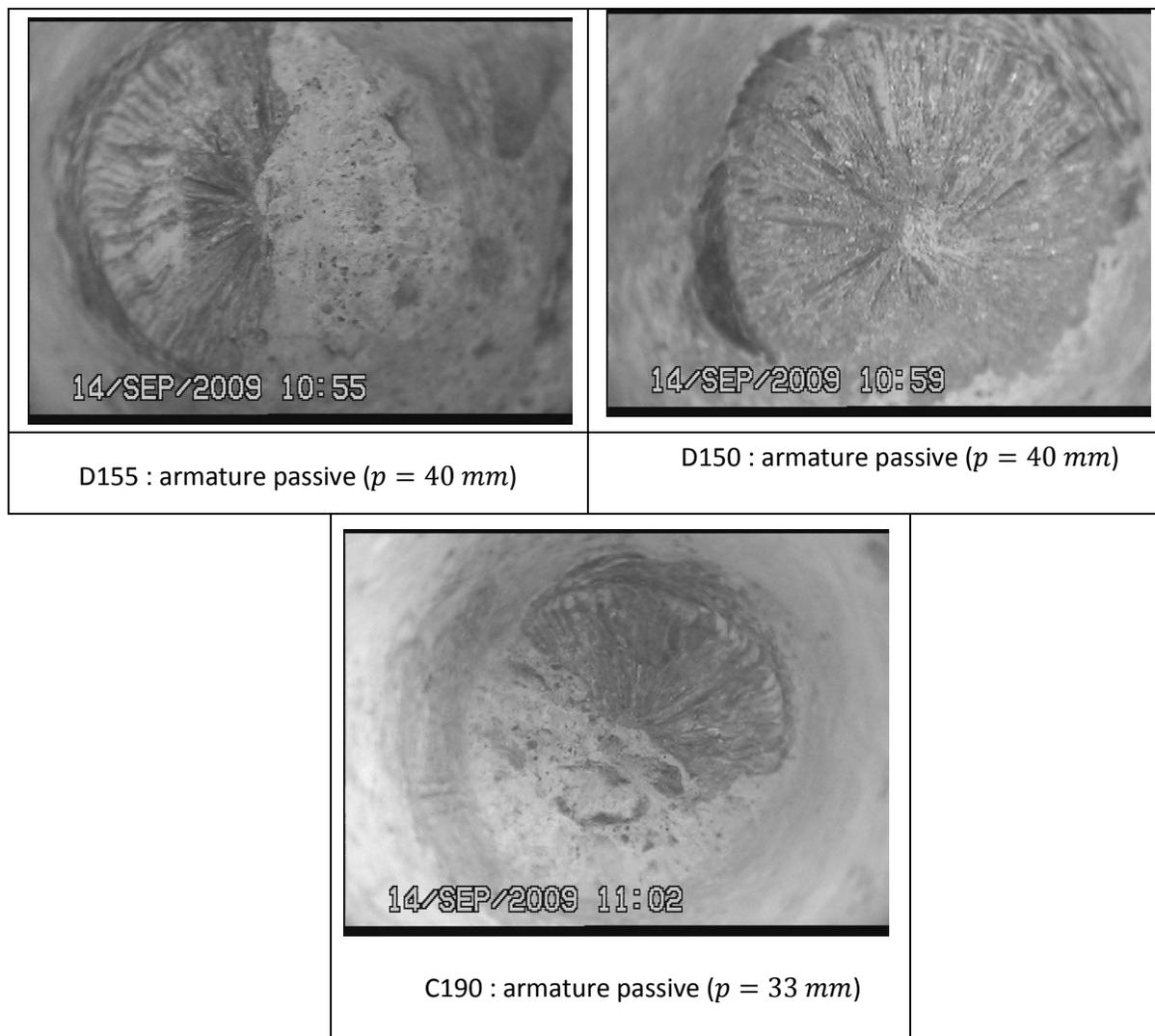


Tableau 0.7 (suite et fin) - Résultats des endoscopies obtenus pour le segment de poutre B2S4



Les endoscopies n'apportent pas d'information sur l'état de la précontrainte, celles-ci n'ayant été pratiquées qu'à l'extérieur des gaines.

ii. Résultats IE

Comme pour les autres segments de poutre, les fréquences images de l'épaisseur de la pièce sont attendu à 3 kHz ou en dessous (voir tableau 0.8). La profondeur des gaines (depuis la surface supérieure du segment) variant de 70 à 95 mm en moyenne sur la longueur de la

poutre, la fréquence caractéristique f_{acier} appartient à l'intervalle 10 – 13 kHz (pour des torons ayant un profondeur variant de 75 à 100 mm). Les résultats obtenus par IE sont reportés aux figures 0.10 à 0.15.

Tableau 0.8- Valeurs des fréquences théoriques image de l'épaisseur de la pièce

| h (mm) | v_p (m/s) | f_1 (kHz) | f_2 (kHz) | f_3 (kHz) | f_4 (kHz) | f_5 (kHz) | f_6 (kHz) |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1600 | 4000 | 1,18 | 1,83 | 2,39 | 2,51 | 3,01 | 3,14 |

Tableau 0.9- Récapitulatif des résultats obtenus par endoscopie avec les fréquences théoriques calculées associée

| Cote | Profondeur atteinte p (mm) | Résultats par endoscopie (gaine ou barre rencontrée) | Fréquence attendue (kHz) |
|------|----------------------------|--|--------------------------|
| F260 | 95 | gaine | 11 |
| E160 | 89 | gaine | 11 |
| D155 | 40 | barre | 25 |
| D150 | 40 | barre | 25 |
| C190 | 33 | barre | 30 |

Les résultats IE pour ce segment de poutre sont très similaires à ceux obtenus pour le segment B4S4. Effectivement, pour l'ensemble des résultats obtenus pour le segment B2S4, un pic de fréquence est présent autour de 3 – 4 kHz de plus ou moins forte amplitude (représentant l'écho du fond de la pièce) et une autre « ligne » de pics est présente oscillant entre 10 et 15 kHz suivant les différentes gaines.

D'autre part, il est constaté que les gaines A, B, C et F présentent beaucoup de fréquences excitées au-dessus de 20 kHz (plus précisément entre 20 et 30 kHz) tandis que les gaines D et E possèdent très peu de pics de fréquences au-dessus des pics prédominants aux environs de 10 kHz .

En faisant le parallèle avec le segment de poutre B4S4, il est intéressant de noter que les mesures IE au-dessus des gaines près des côtés des segments sont les plus influencées par

la présence de barres ou bien des fissures. Egalement, il est constaté que les gaines à l'intérieur des segments possèdent une réponse plus « aplatie » qui permet de mieux faire ressortir la réponse en fréquence des gaines.

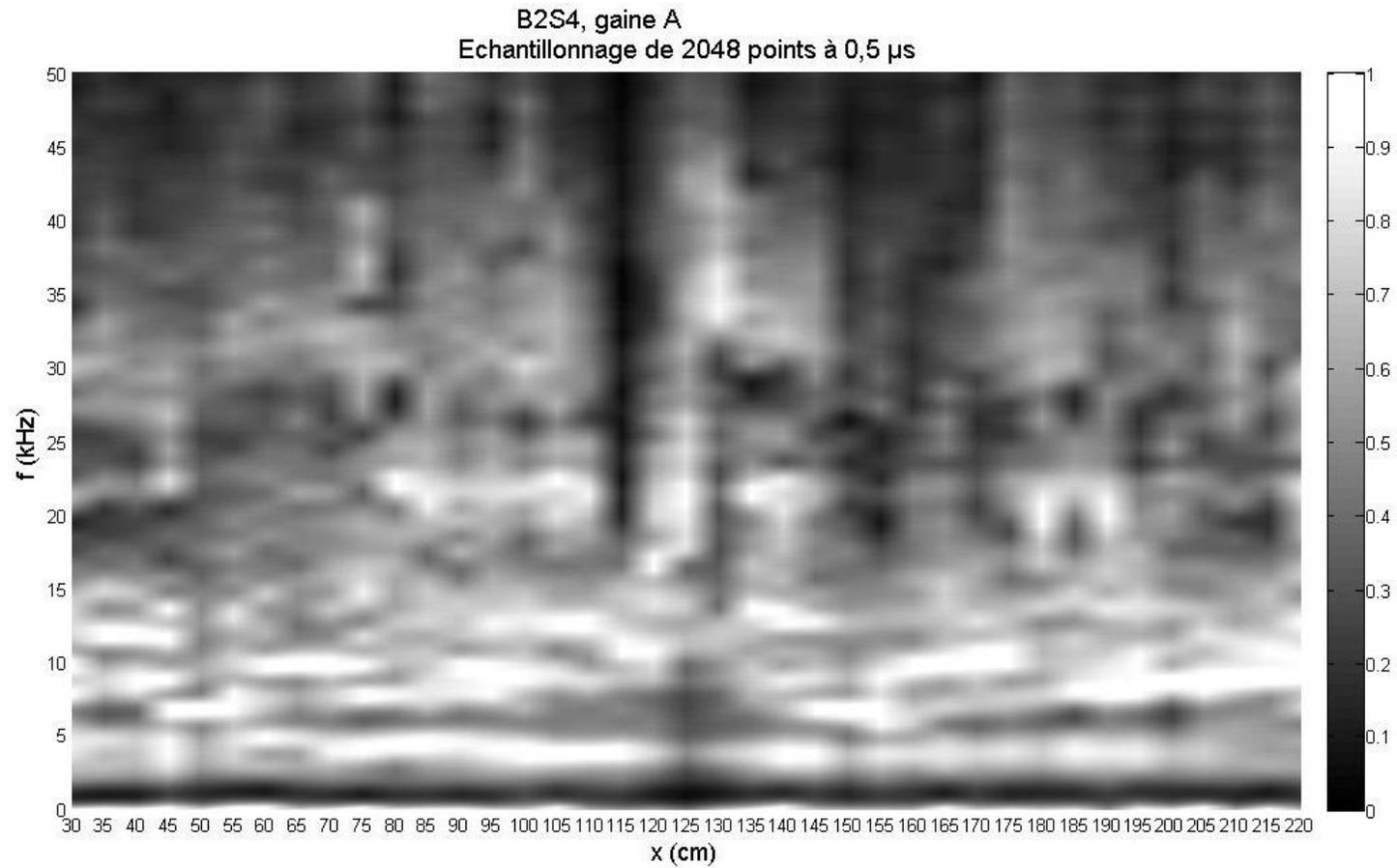


Figure 0.10- Résultats IE du segment B2S4, gaine A

B2S4, gaine B
Echantillonnage de 2048 points à 0,5 μ s

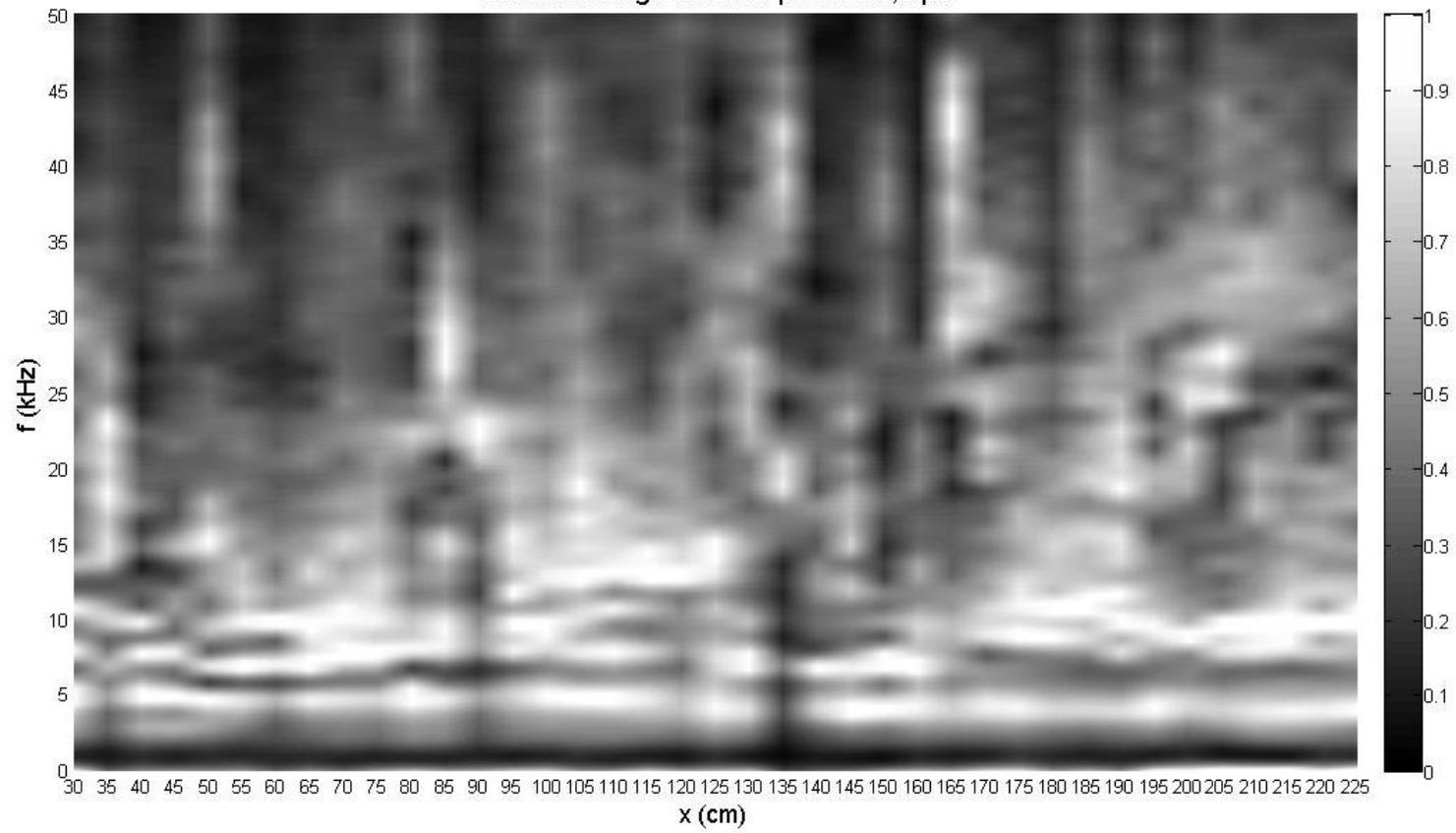


Figure 0.11- Résultats IE du segment B2S4, gaine B

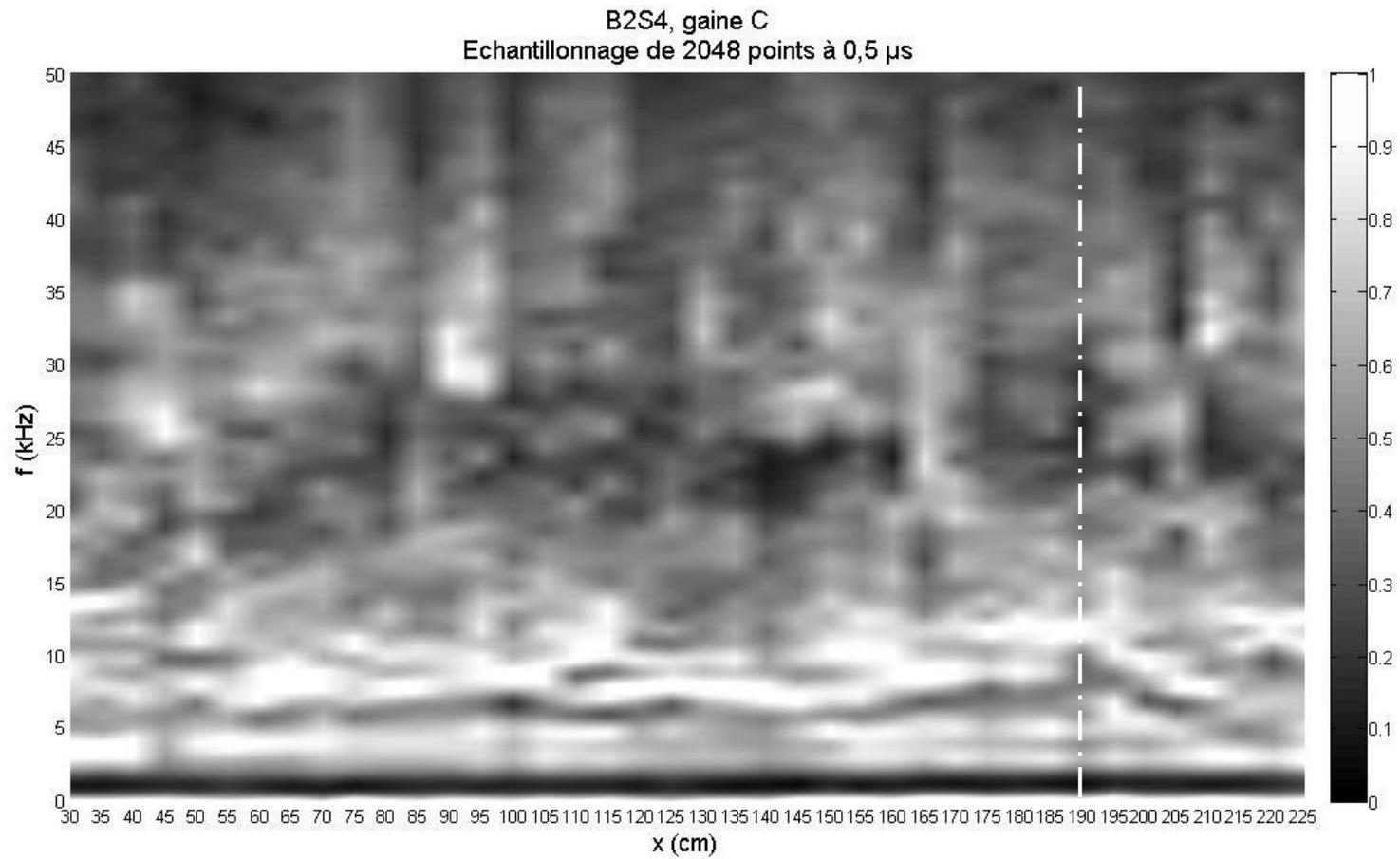


Figure 0.12- Résultats IE du segment B2S4, gaine C

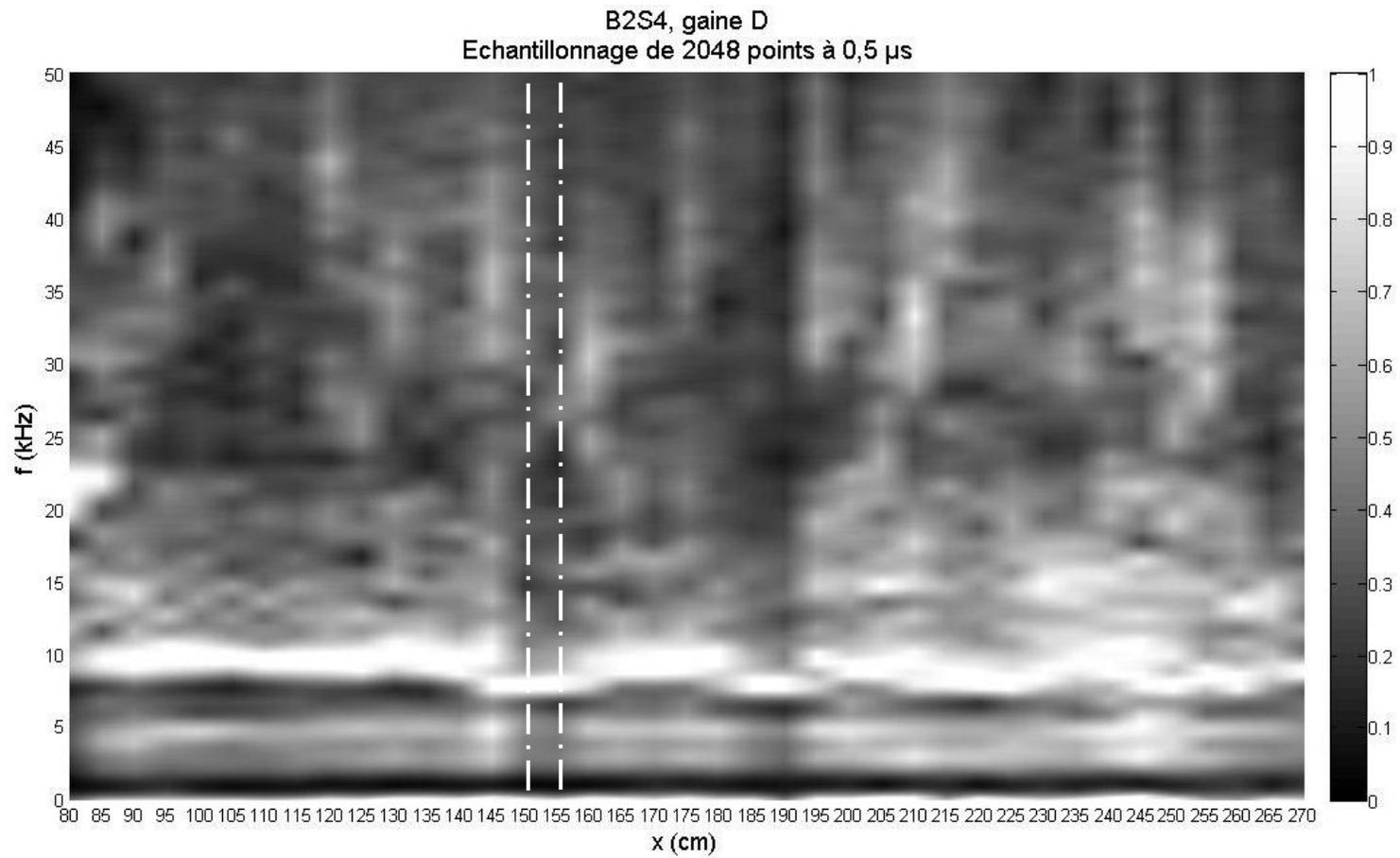


Figure 0.13- Résultats IE du segment B2S4, gaine D

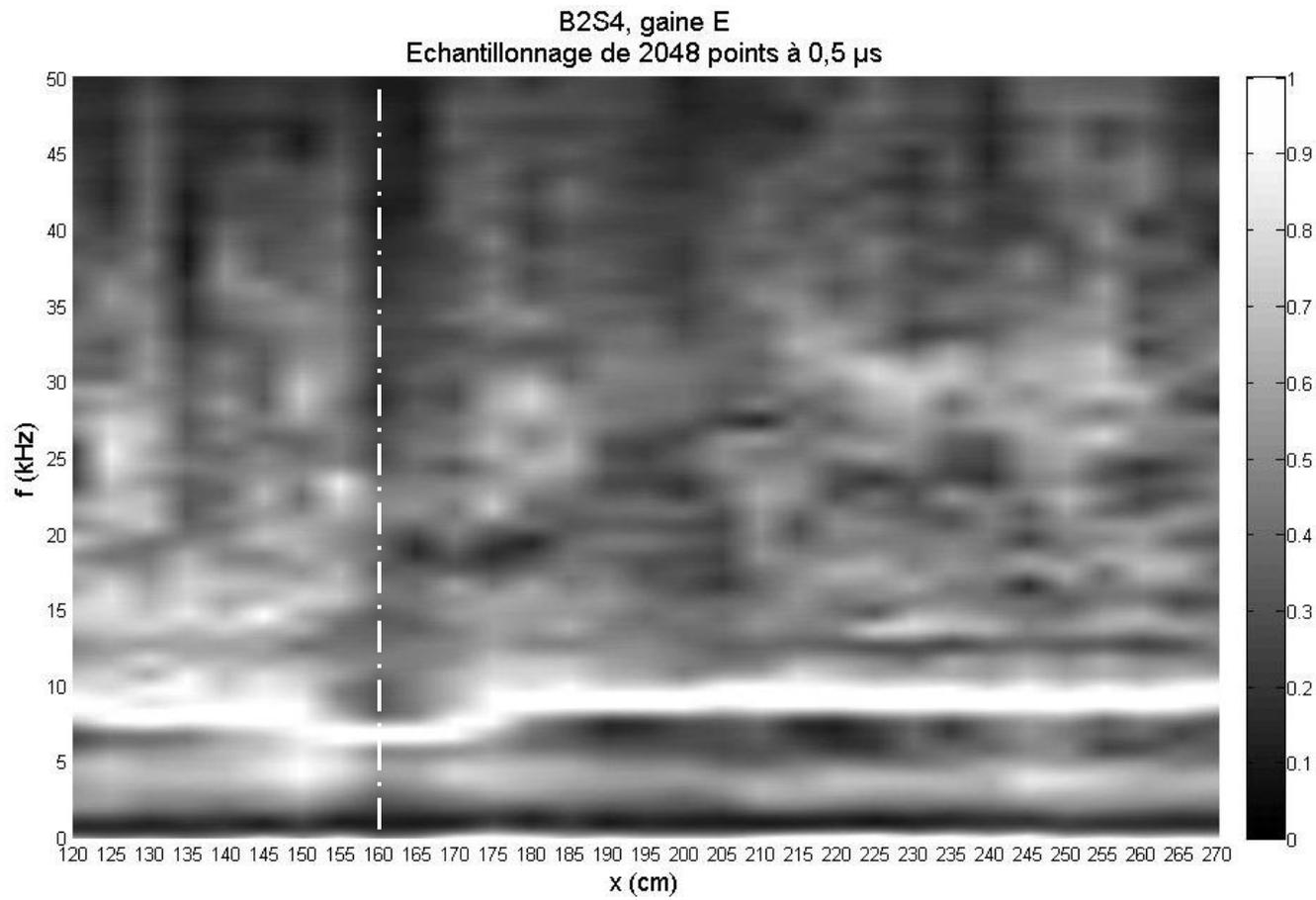


Figure 0.14- Résultats IE du segment B2S4, gaine E

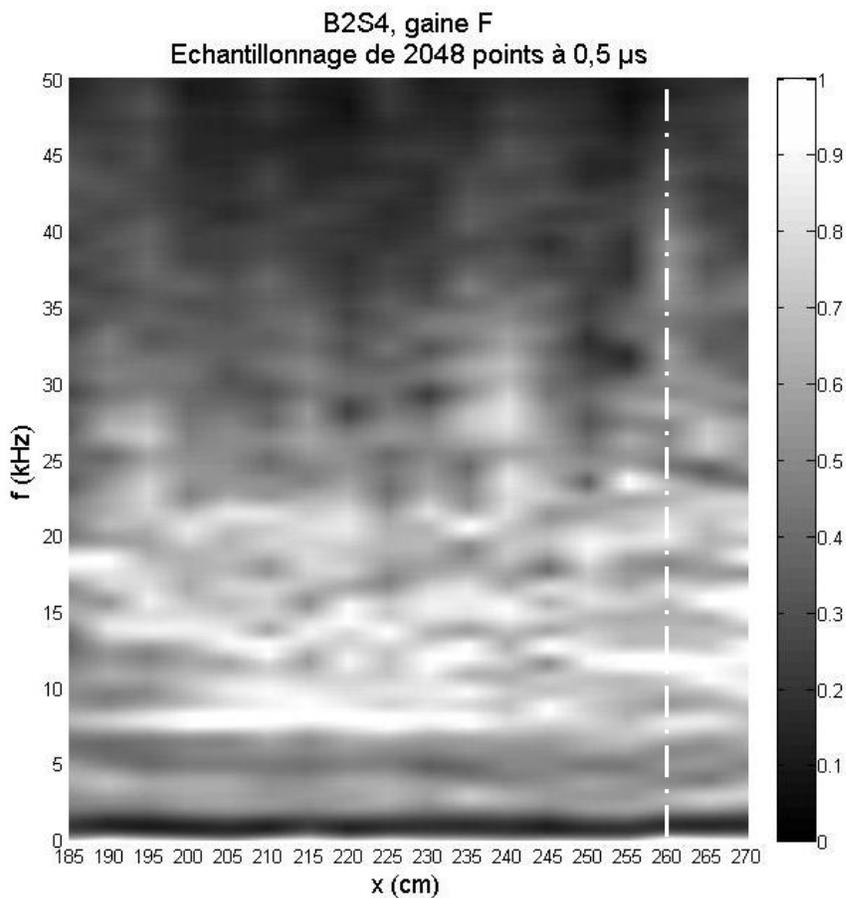


Figure 0.15- Résultats IE du segment B2S4, gaine F

Une fois de plus, les résultats IE obtenus aux zones percées ne correspondent pas aux valeurs théoriques attendues lors des percages. Les diagrammes obtenus pour les gaines D et E sont beaucoup plus « aplatis » que les autres ce qui montre que les barres d'acier présentes dans le segment de poutre ne sont pas relevées par l'IE.