

Applicabilité de la méthode Impact-Echo

Anwendbarkeit der zerstörungsfreien Prüfmethode Impact-Echo

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages (MCS)**

**V. Bujard, ing. civil dipl. EPFL/SIA
S. F. Bailey, Dr. sc. techn., ing. civil BSc/SIA
E. Brühwiler, Prof. Dr. sc. techn, ing. civil dipl. EPFZ/SIA**

Geotest AG, Zollikofen

**C. Bruneau, Géophysicien
E. Scheller, Dr. sc. nat. EPFZ/SIA**

**Mandat de recherche 85/97 sur demande du groupe
de travail Recherche en matière de ponts**

OFFICE FÉDÉRAL DES ROUTES

Mandat de recherche 85/97 sur demande du groupe de travail en matière de ponts

Applicabilité de la méthode Impact-Echo

Anwendbarkeit der zerstörungsfreien Prüfmethode Impact-Echo

Centre de recherche

**MCS – Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages
EPFL, Lausanne**

Vincent Bujard, ing. civil dipl. EPFL/SIA

Claude Bruneau, géophysicien, Geotest AG

Erwin Scheller, Dr sc. nat. EPFZ/SIA, Geotest AG

Simon F. Bailey, Dr sc. techn., ing. civil BSc/SIA

Eugen Brühwiler, Prof. Dr. sc. techn. ing., civil dipl. EPFZ/SIA

Rapport final, février 2001

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ	4
ZUSAMMENFASSUNG	6
SUMMARY	8
NOTATIONS	10
1 INTRODUCTION	11
2 PRINCIPES DE BASE	13
2.1 CONCEPT	13
2.2 L'IMPACT	14
2.3 LA PROPAGATION DES ONDES	15
2.4 RELATIONS DE BASE	16
3 DOMAINES D'UTILISATION [1]	18
3.1 MESURE D'ÉPAISSEUR	18
3.2 FISSURES ET DÉLAMINATIONS	18
3.3 NIDS DE GRAVIER	19
3.4 CONTRÔLE D'INTERFACES	19
3.5 CONTRÔLE DE L'INJECTION DE GAINES DE PRÉCONTRAINTÉ	19
3.6 MAÇONNERIE	20
4 MESURES IMPACT-ECHO	21
4.1 SPECTRE DES FREQUENCES	21
4.2 PROFONDEURS CRITIQUES [1]	23
4.2.1 <i>Profondeur minimale</i>	24
4.2.2 <i>Profondeur maximale</i>	24
4.3 DIMENSIONS CRITIQUES [1]	24
4.4 VITESSE DE PROPAGATION DES ONDES DE COMPRESSION	25
4.5 MESURE SUR DU BÉTON AU TRAVERS D'UN REVÊTEMENT	26
4.6 EFFET DES BARRES D'ARMATURE	26
5 DESCRIPTION DES ESSAIS EFFECTUÉS	27
5.1 ÉTENDUE MINIMALE DE DÉTECTION (LABORATOIRE)	27
5.1.1 <i>Paramètres étudiés</i>	27
5.1.2 <i>Description de l'élément testé</i>	27
5.1.3 <i>Déroulement de l'essai</i>	28
5.1.4 <i>Résultats</i>	29
5.1.5 <i>Conclusions</i>	30
5.2 PROFONDEURS CRITIQUES DE DÉTECTION ET CONTRÔLE D'INJECTION DE GAINES DE PRÉCONTRAINTÉ (LABORATOIRE)	31
5.2.1 <i>Paramètres étudiés</i>	31
5.2.2 <i>Description de l'élément testé</i>	31
5.2.3 <i>Déroulement de l'essai</i>	32
5.2.4 <i>Résultats</i>	33
5.2.5 <i>Conclusions</i>	34
5.3 CONTRÔLE D'INJECTION DE GAINES DE PRÉCONTRAINTÉ (LABORATOIRE)	34
5.3.1 <i>Description de l'élément testé</i>	34
5.3.2 <i>Déroulement de l'essai</i>	35
5.3.3 <i>Résultats</i>	36
5.3.4 <i>Conclusions</i>	38

5.4	CONTRÔLE D'INJECTION DE GAINES DE PRÉCONTRAINTÉ (IN SITU)	38
5.4.1	<i>But de l'essai</i>	38
5.4.2	<i>Description de l'ouvrage testé</i>	38
5.4.3	<i>Déroulement de l'essai</i>	40
5.4.4	<i>Résultats</i>	41
5.4.5	<i>Conclusion</i>	43
5.5	DÉTECTION DE NIDS DE GRAVIER DANS UN MUR EN BÉTON (IN SITU).....	43
5.5.1	<i>Paramètres étudiés</i>	43
5.5.2	<i>Description de l'élément testé</i>	43
5.5.3	<i>Déroulement de l'essai</i>	44
5.5.4	<i>Résultats</i>	45
5.5.5	<i>Conclusions</i>	46
5.6	DÉTERMINATION DE LA PROFONDEUR DE PÉNÉTRATION DE FISSURES (LABORATOIRE).....	47
5.6.1	<i>Paramètres étudiés</i>	47
5.6.2	<i>Description de l'élément testé</i>	47
5.6.3	<i>Déroulement de l'essai</i>	48
5.6.4	<i>Résultats</i>	48
5.6.5	<i>Conclusions</i>	49
6	CONCLUSIONS	50
6.1	DIMENSIONS DES DÉFAUTS DÉCELABLES	50
6.2	TYPE DE RÉPONSE	50
6.3	EFFET DE L'ARMATURE	50
6.4	DOMAINES D'UTILISATION	51
6.4.1	<i>Mesures d'épaisseur</i>	51
6.4.2	<i>Qualité d'interface</i>	51
6.4.3	<i>Nids de gravier</i>	51
6.4.4	<i>Contrôle d'injection de gaines de câbles de précontrainte</i>	51
6.4.5	<i>Profondeur de pénétration de fissures</i>	52
6.4.6	<i>Maçonnerie</i>	52
7	ÉVALUATION ET DISCUSSION	53
7.1	ADÉQUATION DE LA MÉTHODE VIS-À-VIS DES PROBLÈMES PROPOSÉS	53
7.2	CONFORT D'UTILISATION	54
7.3	INFLUENCE DES PARAMÈTRES EXTÉRIEURS	54
7.4	CONCLUSIONS PRINCIPALES D'AUTRES UTILISATEURS/CHERCHEURS	55
8	RECOMMANDATIONS	56
8.1	CHOIX DE LA MÉTHODE	56
8.2	PRÉPARATION DES MESURES	56
8.3	EXÉCUTION DES MESURES	56
8.4	DÉPOUILLEMENT DES RÉSULTATS	57
8.5	INTERPRÉTATION ET DIAGNOSTIC	57
8.6	RECHERCHES FUTURES	59
9	RÉFÉRENCES	60

RÉSUMÉ

INTRODUCTION

Le mandat OFROU 85/97 « Applicabilité de la méthode Impact-Echo », doit permettre de préciser les limitations de la méthode Impact-Echo et proposer aux futurs utilisateurs une démarche systématique d'utilisation. Les méthodes d'auscultation non-destructives des structures porteuses sont actuellement peu nombreuses. La méthode Impact-Echo se base sur l'analyse d'un spectre des fréquences de réflexion d'ondes de compression dans un solide, provoquées par une excitation mécanique (choc d'une bille à la surface de l'élément à tester). Cette méthode non-destructive est destinée principalement au contrôle de l'intégrité des structures en béton armé, mais également à la vérification de la qualité d'un joint de maçonnerie ou encore au contrôle de la bonne injection d'une gaine de câble de précontrainte.

De nombreux exemples existent déjà où la méthode a pu être utilisée avec succès et cette étude a pour but d'une part, de valoriser les résultats et d'autre part, de définir les limites de la méthode afin que les ingénieurs puissent y recourir de manière systématique. Pour ce faire, une série d'essais en laboratoire ainsi que sur des ouvrages existants ont été entrepris et pour chaque cas, la fiabilité de la méthode a été évaluée. Suite à ces expériences, une série de recommandations est proposée.

RÉSULTATS DES ESSAIS ET EVALUATION

Une fissure ou une *délamination* est susceptible d'être décelée par Impact-Echo, pour autant qu'elle soit *d'ouverture supérieure ou égale à 0.1 mm*, que sa plus petite *dimension latérale ℓ* soit supérieure de 25% à la longueur de l'onde d'impulsion λ produite par le choc de la bille. De plus le défaut recherché doit se situer à une profondeur comprise entre $\lambda/2$ (profondeur minimale) et $3 \cdot \ell$ (profondeur maximale).

Le spectre de fréquences obtenu lors de chaque mesure contient d'une part les *fréquences de réflexion* de l'onde de compression générée par l'impact et d'autre part, si l'on se trouve en présence d'une *délamination* éterdue et proche de la surface, de *fréquences flexionnelles* témoins des vibrations propres de la zone testée.

L'*armature* peut avoir une influence néfaste sur les résultats même si celle-ci est de faible diamètre. L'importance d'une reconnaissance préliminaire des zones à tester est donc primordiale.

La méthode Impact-Echo est en principe applicable à la recherche de *nids de graviers* dans une structure en béton pour autant que la surface soit de bonne qualité. Une bonne connaissance de l'épaisseur des éléments testés est toutefois impérative.

L'utilisation de la méthode Impact-Echo pour le *contrôle de l'injection de gaines de câble de précontrainte* est possible mais délicate et requiert une bonne expérience. En effet, il est souvent difficile pour l'expérimentateur de différencier un état de non-injection d'un état injecté fissuré. La fissuration de la zone testée influe ainsi considérablement sur la qualité des résultats obtenus et peut même rendre impossible toute mesure Impact-Echo. Cependant, même si une réflexion n'est pas toujours évidente à obtenir sur le vide d'une gaine non injectée, elle pourra en principe être décelée par un décalage vers les basses fréquences du pic d'épaisseur. Comme dans le cas des nids de gravier, ce type de mesure est considérablement simplifié si une épaisseur peut-être mesurée.

La *profondeur* à laquelle une fissure apparente en surface présente une *ouverture inférieure à 0.1 mm* peut également être déterminée avec précision grâce à la méthode Impact-Echo.

RECOMMANDATIONS

Lorsque la décision est prise d'entamer une *campagne de mesure sur un ouvrage existant*, et donc d'investir du temps et de l'argent, *la fiabilité des résultats* fournis par la méthode choisie doit être *absolument garantie*. C'est à cette condition seulement qu'une *interprétation correcte* et sûre pourra être effectuée par un spécialiste et qu'un *diagnostic clair* pourra être établi par l'ingénieur responsable.

En fonction du type de problème à résoudre, le recours à la méthode Impact-Echo n'est *pas toujours adéquat*. Nous sommes de l'avis qu'il est parfois difficile sur un ouvrage réel d'utiliser la méthode Impact-Echo et de fournir toujours des résultats optimaux (contrôle d'injection de gaines de câble de précontrainte par exemple). En revanche, pour tout ce qui touche au *contrôle de zones* ou de défauts de *dimensions supérieures aux dimensions limites*, selon le tableau 7.2, le recours à la méthode s'avère souvent judicieux, pour autant qu'elle soit bien mise en œuvre par des *spécialistes expérimentés*.

Quelque soit le type d'essai à effectuer par Impact-Echo, *la phase préparatoire* précède la phase de mesure proprement dite et à traiter avec le plus grand soin. Une bonne préparation permet de prédire les divers résultats possibles auxquels il faut s'attendre et de vérifier la *compatibilité de ces défauts avec les limites de la méthode*. Ceci améliore *l'efficacité* au moment des essais, lors du dépouillement ainsi que lors de l'interprétation des résultats. De plus, cette phase permet de définir clairement les *objectifs recherchés*.

Deux expérimentateurs sont en principe toujours nécessaires pour une campagne de mesures. L'expérimentateur no 1 prend en charge la mesure proprement dite, à savoir préparation de la surface testée (brossage et nettoyage), positionnement et armement de l'accéléromètre et finalement impact de la bille ; il doit faire preuve d'*agilité* et être *entraîné à la manipulation des billes et de l'accéléromètre*. L'expérimentateur no 2 a pour mission de *contrôler* visuellement sur l'écran la qualité du signal et de *valider* les résultats jugés satisfaisants.

Les *facteurs humains* (bruits, froid, etc.) ne sont pas à négliger et on veillera en particulier à ne pas entreprendre une campagne d'essai dans des conditions météorologiques défavorables.

A la condition que le signal à analyser soit de bonne qualité (courbe des déplacements), il peut être retravaillé en mode édition pour séparer les fréquences parasites des fréquences utiles, supprimer le bruit et faire ressortir les pics correspondant aux *défauts soupçonnés*. Une fois la *fréquence d'épaisseur* repérée, on recherche les pics des fréquences secondaires correspondant aux défauts probables sur la base desquels l'interprétation et le diagnostic peuvent finalement être établis.

PERSPECTIVES

Les buts à poursuivre à l'avenir sont d'une part, l'augmentation de la fiabilité de la méthode et de la convivialité des mesures et d'autre part, une amélioration de l'expérience d'utilisation de la méthode par tous les acteurs de la construction concernés par la maintenance des ouvrages (maître d'ouvrages, ingénieurs, spécialistes).

Les recherches futures devraient probablement être tournées vers les aspects pratiques de la méthode par une amélioration des appareillages de mesures (automatisation accrue du système impacteur-accéléromètre), ainsi que par le développement du programme de traitement et d'analyse des données, permettant une meilleure lisibilité des résultats.

Parallèlement, il importe d'étendre l'utilisation de la méthode Impact-Echo en Suisse afin d'accroître l'expérience des spécialistes et d'encourager son utilisation auprès des ingénieurs et des maîtres d'ouvrage. Il est nécessaire aujourd'hui de transmettre au mieux l'expérience acquise ces dernières années par ceux qui ont utilisé la méthode Impact-Echo en Suisse lors d'auscultations d'ouvrages et de travaux de maintenance sur des structures existantes.

ZUSAMMENFASSUNG

EINLEITUNG

Der ASTRA-Forschungsauftrag 85/97 „Anwendbarkeit der zerstörungsfreien Prüfmethode Impact-Echo“ soll die Anwendungsgrenzen der Impact-Echo-Methode aufzeigen und zukünftigen Anwendern ein systematisches Vorgehen für deren Einsatz vorschlagen. Dadurch soll die im Moment nur geringe Anzahl zerstörungsfreier Prüfmethoden für Tragwerke durch eine weitere ergänzt werden. Die Impact-Echo-Methode basiert auf einer Analyse des Frequenzspektrums von Kompressionswellen in einem Festkörper, die mechanisch angeregt werden (Impuls einer Kugel auf die Oberfläche des zu testenden Elements). Dieses Verfahren ist hauptsächlich dafür geeignet, Fehlstellen, Risse, Hohlräume von Stahlbetontragwerken zu bestimmen, aber auch um die Qualität von Mauerwerksfugen oder injizierten Spannkabeln zu prüfen.

Die Methode konnte schon häufig mit Erfolg angewendet werden. Die vorliegende Studie hat zum Ziel, einerseits die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu überprüfen, andererseits den Anwendungsbereich der Impact-Echo-Methode zu definieren, damit die Ingenieure systematisch auf dieses Verfahren zurückgreifen können. Dazu wurde eine Versuchsserie im Labor ebenso wie an bestehenden Bauwerken durchgeführt und für jeden Fall die Zuverlässigkeit des Verfahrens ermittelt.

VERSUCHSERGEBNISSE UND AUSWERTUNG

Risse oder Ablösungen können mit der Impact-Echo-Methode nachgewiesen werden, wenn die Öffnung mindestens 0.1 mm beträgt und wenn die Länge oder Breite grösser als 25% der Wellenlänge λ ist, die durch den Impuls der Kugel angeregt wird. Zudem muss sich die Fehlstelle in einer Tiefe zwischen $\lambda/2$ (minimale Tiefe) und 3ℓ (maximale Tiefe) befinden.

Das Frequenzspektrum, das bei einer Messung erhalten wird enthält teils Reflexionsfrequenzen der Kompressionwelle, die durch den Impuls erzeugt wurde, teils Frequenzen von Biegewellen, die auf eine Resonanz in der getesteten Zone hinweisen, sofern man auf eine grossflächige Ablösung nahe der Oberfläche stösst.

Die Bewehrung kann sich sehr nachteilig auf die Ergebnisse auswirken, auch wenn sie einen geringen Durchmesser aufweist. Eine entsprechende Vorerkundung ist wesentlich.

Die Prüfmethode Impact-Echo kann zur Entdeckung von Kiesnestern in einem Betonbauwerk angewendet werden, jedoch unter der Voraussetzung, dass die Betonoberfläche eine gute Qualität aufweist. Eine gute Kenntnis der Dicke der getesteten Bauteile muss hierbei gewährleistet werden.

Die Anwendung der Prüfmethode Impact-Echo zur Kontrolle der Injektion von Spanngliedhüllrohren ist zwar möglich, jedoch heikel und erfordert ausreichende Erfahrung. Bei der Durchführung ist es häufig schwierig, zwischen einem nicht-injizierten und einem injizierten Hüllrohr mit gerissenem Beton zu unterscheiden. Eine Rissbildung in der getesteten Zone beeinflusst die Qualität der erhaltenen Ergebnisse beträchtlich und kann sogar jegliche Interpretation von Messungen mit der Impact-Echo-Methode verunmöglichen. Obwohl eine Reflexion nicht immer erkennbar ist, können nicht-injizierte Hüllrohre nachgewiesen werden, wenn ihr Durchmesser genügend gross ist, da hier die Kompressionswellen das Hüllrohr umlaufen und eine niedrigere Frequenz im Antwortspektrum zur Folge haben. Wie im Fall von Kiesnestern sollte die Impact-Echo-Methode nur angewendet werden, wenn die Überdeckungsmächtigkeit bekannt ist.

Die Tiefe, bis zu der ein an der Oberfläche sichtbarer Riss eine Öffnung von mindestens 0.1 mm aufweist, kann präzise mit der Prüfmethode Impact-Echo bestimmt werden.

EMPFEHLUNGEN

Soll ein bestehendes Bauwerk einer Messkampagne unterzogen und folglich Geld und Zeit investiert werden, muss die gewählte Prüfmethode zuverlässig sein. Nur unter dieser Bedingung kann ein Fachmann die Messdaten korrekt interpretieren und der verantwortliche Ingenieur eine eindeutige Diagnose erstellen.

Die Anwendung der Prüfmethode Impact-Echo hängt von der Problemstellung ab. Es ist in einzelnen Fällen schwierig, mit der Impact-Echo-Methode optimale Ergebnisse zu erhalten

(z.B. für die Kontrolle der Injektionen in Spanngliedhüllrohren). Innerhalb der Grenzen der Anwendbarkeit gemäss Tabelle 7.2 können Fehlstellen jedoch zuverlässig mit dieser Prüfmethode festgestellt werden - unter der Voraussetzung, dass die Messkampagne von erfahrenen Fachleuten durchgeführt wird.

Die Messungen müssen mit der grösstmöglichen Sorgfalt vorbereitet werden. Die Fragestellung ist klar zu definieren im Hinblick auf die Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung der Prüfmethode. Damit lässt sich die Effizienz der Messungen sowie deren Auswertung und Interpretation entscheidend verbessern.

Zwei Fachleute sind im Prinzip immer nötig für die Durchführung einer Messkampagne. Eine Person ist für die eigentliche Messung verantwortlich, d. h. für die Vorbereitung der zu testenden Oberfläche (Abbürsten und Säubern), Anordnung und Anschliessen der Beschleunigungsaufnehmer und schliesslich das Auslösen des Impulses durch die Kugel, was eine gewisse Geschicklichkeit erfordert. Die zweite Person kontrolliert die Qualität der Ergebnisse auf dem Bildschirm.

Der Faktor „Umwelt“ (Lärm, Kälte, Vibrationen, etc.) ist nicht zu unterschätzen, und eine Messkampagne sollte nicht unter ungünstigen Witterungsbedingungen durchgeführt werden.

Weist das zu analysierende Signal (Frequenzspektrum) eine gute Qualität auf, kann es aufbereitet werden, um parasitäre Frequenzen zu eliminieren, Rauschen zu unterdrücken und Spitzen herauszufiltern, die zu vermuteten Fehlstellen gehören. Ist einmal die Frequenz, die zur Dicke des Bauteils gehört, gefunden, sucht man die Spitzen von sekundären Frequenzen, die vermutlich zu Fehlstellen gehören. Auf deren Basis kann schliesslich eine Diagnose des untersuchten Bauteils erstellt werden.

AUSBLICK

In Zukunft sollten zum einen die Zuverlässigkeit des Verfahrens und die Benutzerfreundlichkeit der Messeinrichtung erhöht und zum anderen die Erfahrungen von Fahrleuten (Bauherren, Ingenieure, Baufachleute) im Umgang mit dem Verfahren im Bereich der Erhaltung von Bauwerken vergrössert werden.

Es sollten praktische Probleme, wie die Verbesserung der Messeinrichtungen (vermehrte Automatisierung des Systems Impulsgeber - Beschleunigungsaufnehmer), und die Entwicklung eines Programms zur Bearbeitung und Auswertung der Daten, das eine bessere Verständlichkeit der Ergebnisse erlaubt, im Vordergrund stehen.

Parallel dazu ist es wichtig, dass die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfmethode Impact-Echo in der Schweiz verbreitet wird, um die Erfahrung von Fachleuten zu vergrössern und um Ingenieure und Bauherren zur Anwendung zu ermutigen. Es ist zudem nötig, die Erfahrungen weiterzugeben, die in den letzten Jahren mit der Impact-Echo-Methode in der Schweiz bei der Untersuchung bestehender Bauwerke erworben wurden.

SUMMARY

INTRODUCTION

The aim of Contract OFROU 85/97 "Application of the Impact-Echo Method" was to define the scope and limitations of the Impact-Echo method and to propose a systematic approach to its application for future users, with a view to augmenting the sparse inventory of non-destructive methods that are currently available for testing structures. The Impact-Echo method is based on the reflection within a solid of compression waves that are produced by mechanical excitation (impact with a small hammer on the surface of an element). This non-destructive method is intended principally for verifying the integrity of reinforced concrete structures, but can also be applied for masonry joints or the injection of prestressing cables.

The method has already been applied successfully and the goal of this study is to define the limitations of the method so that it can be used effectively for structural evaluation. This goal has been reached through a series of laboratory and field tests with an evaluation of the reliability of the results in each case. Recommendations are made on the basis of these evaluations.

TEST RESULTS AND EVALUATION

A defect (crack, delamination or void) can be detected with the Impact-Echo method if :

- the defect opening is greater than 0.1 mm and
- the smallest dimension of the defect surface is greater than 25 % of the wavelength produced by the impact
- the depth to the defect is between 50 % of the wavelength and 3 times the smallest dimension.

The frequency spectrum that is obtained for each measurement includes both reflected wave frequencies and frequencies of vibration of the tested element.

Even small diameter reinforcing bars can have an unfavourable influence on test results. A preliminary investigation of the position and amount of reinforcement is therefore recommended.

Pockets of aggregate and voids can be detected by a change in the Impact-Echo reading for the element thickness caused by the deviation of waves around the defect. However, this is only possible if the element thickness is known and if the concrete surface is of good quality.

The Impact-Echo method can be applied to checking the grouting of prestressing cable ducts but this is a delicate operation requiring significant operator experience. Indeed, it is difficult to differentiate between cracked grout and the absence of injected grout. Cracking in the zone tested has a significant influence on the test results and can make measurements impossible. However, even if it is difficult to interpret a reflected wave from an un-injected duct, they can in principle be detected by a change in the Impact-Echo reading for the element thickness caused by the deviation of waves around an un-injected duct.

In the case of a crack that can be seen at the surface, the depth at which the crack closes to less than 0.1 mm can be measured with the Impact-Echo method.

RECOMMENDATIONS

Before investing time and money in tests on an existing structure, it is essential to be sure of the reliability of results produced by the chosen test method. In this respect, Impact-Echo measurements must be carried out by a specialist in order to ensure the correct interpretation of the measurement results and a clear diagnosis by the engineer.

The Impact-Echo method is inappropriate in certain cases. It is our opinion that it is sometimes difficult to obtain reliable results with the method on real structures (for example, for checking the grout in prestressing cable ducts). On the other hand, the method is very effective for detecting zones or defects with dimensions falling within the limits given in Table 7.2.

Preparation is very important for all Impact-Echo measurements. Predicting possible defects allows a verification of their detectability and the selection of the correct hammer, for example. This will improve efficiency during the measurements, analysis and interpretation. Furthermore, such preparation will allow realistic goals to be clearly defined for the tests.

Two operators are generally needed for the tests. The first is responsible for making the measurements themselves; surface preparation, positioning and arming the accelerometer and finally initiating the impact. The second operator is responsible for visually verifying and validating the measurement output on the screen of the apparatus.

Human factors should be taken into consideration (noise, cold, etc). Impact-Echo tests should not be undertaken in bad weather (high winds, freezing conditions, rain, etc).

Once a high quality signal has been validated and stored, it can be filtered later in order to remove noise and parasitic frequencies with the aim of highlighting peaks in the frequency spectrum that correspond to suspected defects. Once the frequency corresponding to the element thickness has been identified, secondary peaks are sought that could correspond to defects. Interpretation and diagnosis are subsequently based on these secondary peaks.

OUTLOOK

Two possible directions for further work are improving the reliability and user-friendliness of the measurements and increasing practical experience of the method amongst owners, engineers and measurement specialists.

Future research should be concentrated on improving the practical aspects of the Impact-Echo method. The impactor-accelerometer system could be automated and signal-processing software should be improved in order to make results easier to read and interpret.

It is also important to disseminate information about the Impact-Echo method amongst those involved in the evaluation and maintenance of existing structures.

NOTATIONS

f_i	[kHz]	fréquence d'impulsion
t_c	[μ sec]	temps de contact entre la bille et la surface de l'élément
$\varnothing_{\text{bille}}$	[mm]	diamètre de la bille
λ_i	[mm]	longueur de l'onde d'impulsion
$v_{p, a/c}$	[m/s]	vitesse de propagation d'une onde de compression (a = asphalte, c = béton)
v_s	[m/s]	vitesse de propagation d'une onde de cisaillement
v_R	[m/s]	vitesse de propagation d'une onde de Rayleigh
E	[N/mm ²]	module d'élasticité
ν	[-]	coefficient de Poisson
ρ	[kg/m ³]	masse volumique
G	[N/mm ²]	module de glissement
Δt	[μ s]	temps de retour d'une onde de compression
$f_{s/c}$	[kHz]	fréquence de retour d'une onde de compression (s = réflexion sur acier, c = réflexion sur air)
f_e	[kHz]	fréquence d'épaisseur
β	[-]	facteur de forme
h	[mm]	épaisseur d'un élément
b	[mm]	largeur d'un élément
d_{c-a}	[mm]	profondeur d'un défaut (a = dans de l'asphalte, c = dans du béton)
$d_{\min}$	[mm]	profondeur minimale de détection
$d_{\max}$	[mm]	profondeur maximale de détection
ℓ	[mm]	dimension latérale d'un défaut
ℓ_{crit}	[mm]	dimension latérale minimale d'un défaut
Z	[kg/m ² s]	impédance
R	[-]	coefficient de réflexion
A_i	[mm]	amplitude de l'onde d'impulsion
A_{ref}	[mm]	amplitude de l'onde réfléchie
t	[mm]	enrobage des barres d'armature
$\varnothing_{\text{barre}}$	[mm]	diamètre des barres d'armature
e	[mm]	ouverture de fissure

1 INTRODUCTION

Les méthodes d'auscultation non-destructives des structures porteuses actuellement à la disposition de l'ingénieur praticien sont peu nombreuses. Que ce soit lors du contrôle de l'intégrité de la matrice d'un élément en béton armé, de la qualité d'un joint de maçonnerie ou encore lors de la vérification de la bonne injection d'une gaine de câble de précontrainte, l'ingénieur n'a bien souvent à sa disposition que l'ouverture par forage ou par brèche des couches superficielles des parties d'ouvrage qu'il entend contrôler. Ces mesures, souvent coûteuses mais surtout très localisées au vu des dimensions d'un ouvrage de génie civil, engendrent de part leur mise en œuvre des dégâts pouvant à moyen terme avoir une influence négative sur la durabilité de l'ouvrage.

C'est dans le but de pallier à ce manque qu'a été imaginée et développée, dès 1983 aux Etats Unis, la méthode Impact-Echo (fig 1.1). Basée sur l'analyse d'un spectre des fréquences de réflexion d'ondes de compression dans un solide provoquées par une excitation mécanique, cette méthode non-destructive est destinée principalement au contrôle des structures en béton. Elle permet entre autre de déceler :

- des cavités, des nids de gravier
- des fissures, des délaminations de couches, des plans de décollement
- des défauts d'injection de gaines de câbles de précontrainte
- des épaisseurs d'éléments d'ouvrage

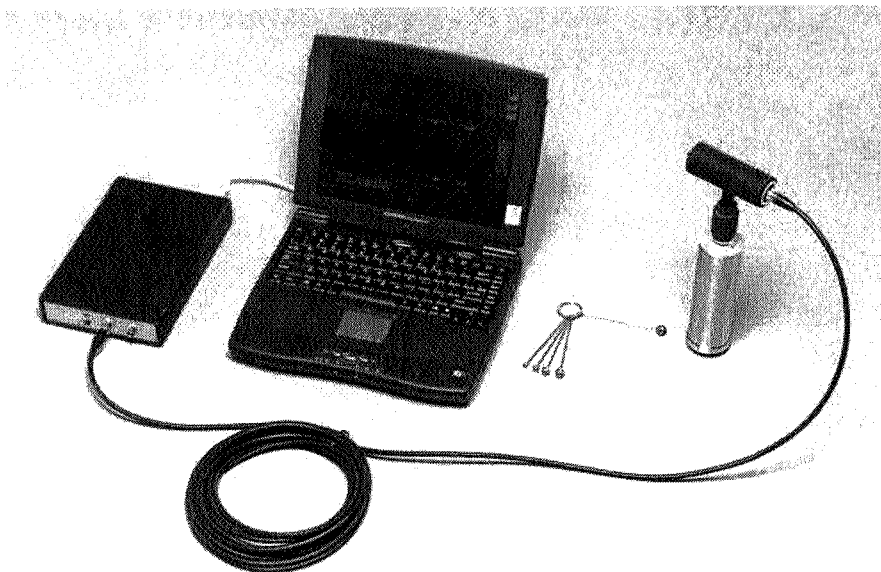


Figure 1.1 : Appareillage Impact-Echo

La première version d'un appareillage de mesure a été commercialisée en 1992.

Bien que de nombreux exemples existent déjà où la méthode a pu être utilisée avec succès aussi bien à l'étranger qu'en Suisse (grâce notamment à l'expérience acquise par la société Geotest), les maîtres d'ouvrage hésitent encore à y recourir de manière systématique. Ceci est en partie dû au fait qu'en Suisse, la fiabilité de la méthode n'a pas encore été formellement démontrée.

Le mandat OFROU 85/97 « Applicabilité de la méthode Impact-Echo » attribué au laboratoire MCS (Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages) de l'EPFL doit préciser aujourd'hui les limitations de la méthode et proposer aux futurs utilisateurs une démarche systématique permettant d'obtenir des résultats fiables et facilement interprétables. La recherche, notamment les essais in-situ et en laboratoire ont été effectués en collaboration avec l'entreprise Geotest AG de Zollikofen qui a mis à la disposition du projet son savoir acquis lors de travaux réalisés indépendamment du présent mandat de recherche ainsi que l'appareillage Impact-Echo et son personnel spécialisé (fig. 1.2). Le laboratoire MCS a dirigé l'ensemble de la recherche et réalisé une synthèse de l'ensemble des résultats à disposition au moment de la rédaction de ce rapport.

La recherche s'est articulée autour des objectifs suivants :

- valorisation des essais existants
Étude de la littérature et des recherches en cours, analyse et réinterprétation partielle des essais effectués en Suisse par Geotest AG, synthèse et définitions des paramètres à étudier.
- essais en laboratoire et in situ :
Mesure sur des éléments en béton contenant des défauts artificiels ou réels (délamination, gaines partiellement injectées, effets de taille et de dimension des défauts) ainsi que sur des éprouvettes hybrides « ancien-nouveau béton » (profondeur de fissures, délamination).
- recommandations :
Analyse critique des résultats pour juger de l'applicabilité de la méthode. Définition du domaine d'application et d'un concept d'utilisation (principe, caractéristiques recherchées, déroulement des mesures, traitement et interprétation des résultats, limites d'utilisation) de la méthode Impact-Echo.

Les recommandations formulées dans ce rapport devraient permettre une utilisation adéquate et sûre de la méthode d'auscultation non-destructive Impact-Echo lors des processus de surveillance et d'évaluation de la sécurité des ouvrages existants.



Figure 1.2 : Recherche de délaminations par Impact-Echo au laboratoire MCS de l'EPFL

2 PRINCIPES DE BASE

2.1 CONCEPT

L'Impact-Echo est une *méthode non-destructive* d'auscultation des structures en béton armé et en maçonnerie. Elle se base sur l'analyse du *spectre de réponse* d'un élément d'ouvrage soumis à une *excitation mécanique*. Suite à une impulsion générée par l'impact d'une bille d'acier en surface de l'élément à tester, une onde de compression se propage dans le matériau. La réflexion multiple de l'onde (sur la face opposée de l'élément, un défaut intrinsèque de la matrice, une barre d'armature, une interface avec un autre matériau de caractéristiques différentes) provoque une réponse cyclique amortie; ce signal de réponse enregistré à l'aide d'un capteur situé très près du point d'impact est ensuite transformé dans le *domaine des fréquences* par l'intermédiaire d'un logiciel informatique, permettant ainsi la lecture et l'interprétation des résultats (épaisseur de l'élément, présence et localisation de délamination du béton, nids de gravier, défauts d'injection, etc.). Un diagramme résumant le principe de la méthode est présenté ci-dessous (fig.2.1 et 2.4).

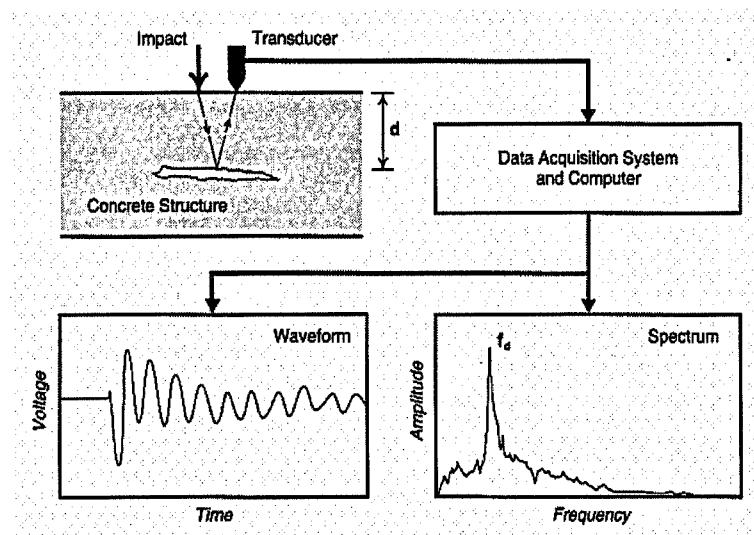


Figure 2.1 : Principe de la méthode Impact-Echo tiré de [1]

Un certain nombre de paramètres caractérisent et influencent le fonctionnement d'une mesure Impact-Echo . Citons par exemple :

- l'impact
- la qualité de surface
- les caractéristiques intrinsèques du matériau qui influencent les vitesses de propagation des ondes
- la profondeur du défaut suspecté
- la dimension du défaut

L'influence de ces paramètres est discutée dans les chapitres suivants.

2.2 L'IMPACT

L'impact est défini par deux paramètres: *la durée du choc* et *l'amplitude de l'onde générée* [1].

L'impact d'une bille métallique sur la surface de l'élément testé est utilisé pour générer des ondes de compression de basse fréquence (1 à 60 kHz). Ces ondes peuvent traverser le matériau comme s'il s'agissait d'un milieu élastique parfaitement homogène (structure interne sans influence sur leur propagation). La méthode Impact-Echo se différencie ainsi des méthodes comme les ultrasons, par exemple, qui utilisent des ondes de plus hautes fréquences.

La fréquence de l'impulsion générée par une bille est inversement proportionnelle à la durée de l'impact ($f_i \sim 1/t_c$) [1]. Pratiquement on utilise des billes d'acier de diamètre $\varnothing_{bille}$ compris entre 5 et 25 mm. La durée des impacts correspondants varie donc approximativement entre 20 et 110 μs ce qui génère des fréquences d'impulsion d'environ 50 à 9 kHz [1].

La longueur d'onde est donnée par la relation $\lambda = v_p / f_i$ [1]. En supposant une vitesse de propagation des ondes de compression de 4000 m/s dans le matériau testé, l'utilisation de billes de diamètre $\varnothing_{bille}$ compris entre 5 et 25 mm produit donc des ondes avec des longueurs d'onde comprises entre approximativement 70 et 450 mm.

La durée de l'impact détermine également *la profondeur* ainsi que *la taille critique* des défauts détectables. Ainsi, un impact très court générera une onde incidente de haute fréquence f_i (c.à.d de faible longueur d'onde λ_i), alors qu'une *durée d'impact plus longue* provoquera une onde incidente de *basse fréquence* et de *grande amplitude*.

Une grande amplitude est synonyme, pour l'onde, d'une énergie suffisante pour pouvoir traverser des éléments de grande épaisseur (dalles, murs, etc.) ou de grande longueur (câbles de précontrainte testés longitudinalement par exemple). A l'inverse, une onde de haute fréquence, si elle n'a pas une capacité de pénétration aussi importante, pourra détecter des défauts de plus petites dimensions et situés plus près de la surface.

Relations pratiques pour une vitesse de propagation des ondes de compression de 4000 m/s [1]:

- temps de contact approximatif $t_c = 0.0043 \cdot \varnothing_{bille} \quad [\mu sec] \quad (2.1)$

- fréquence d'impulsion maximale $f_{max} = 291 / \varnothing_{bille} \quad [kHz] \quad (2.2)$

- longueur d'onde d'impulsion minimale $\lambda = (v_p / f_i) = 14 \cdot \varnothing_{bille} \quad [mm] \quad (2.3)$

L'impact de la bille ayant lieu directement sur la surface de l'élément (fig. 2.2), la durée effective de l'impact peut être parfois supérieure à celle calculée selon la théorie de l'élasticité (jusqu'à 20 μsec selon la dureté de surface), ceci en raison d'une plastification superficielle de l'élément testé lors du choc de la bille. [2] (tableau 2.1)

Diamètre de la bille $\varnothing$ [mm]	Temps de contact t_c [μsec]	Fréquence f_i [kHz]	Longueur d'onde λ [mm]
5	22	57	70
8	35	35.5	112
11	48	26	154
15	65	19	210

Tableau 2.1 : Caractéristiques de l'onde d'impulsion pour une vitesse de 4000 m/s

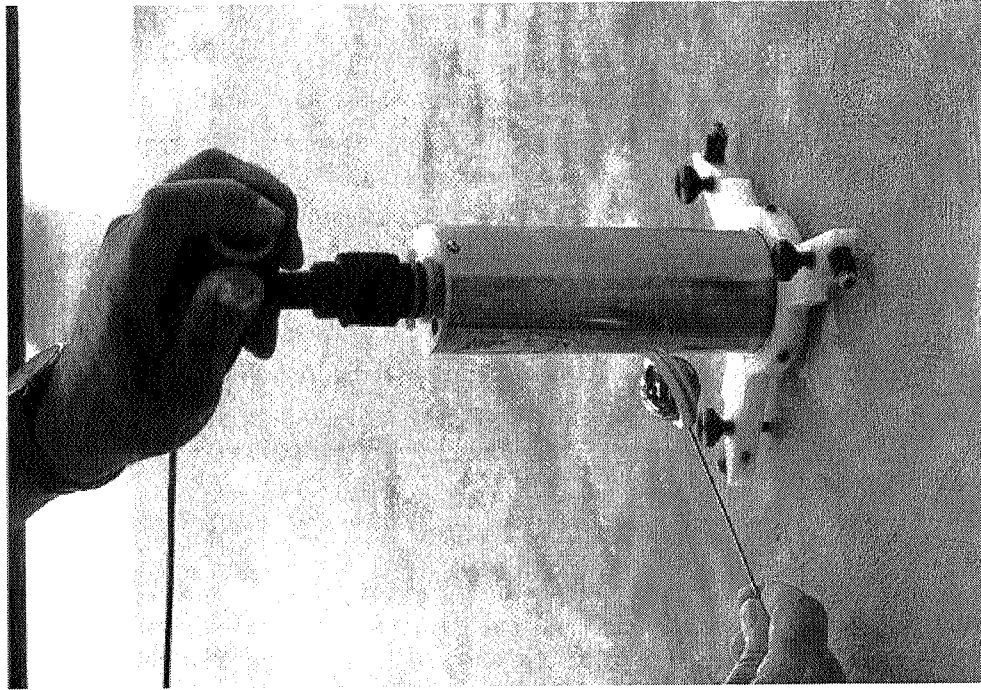


Figure 2.2 : Vue de la bille (impact) et de l'accéléromètre (mesure de l'écho)

2.3 LA PROPAGATION DES ONDES

Les ondes générées par le choc d'une bille à la surface d'un élément sont de 3 types [1] à savoir les ondes de compression, de cisaillement et de Rayleigh (fig. 2.3). Leurs vitesses de propagation sont fonction du module de Young, de la masse spécifique et du coefficient de Poisson du matériau dont est constitué l'élément.

- les ondes de compression (P-waves) à front sphérique
$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad [\text{m/s}] \quad (2.4)$$

- les ondes de cisaillement (S-waves) à front sphérique
$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad [\text{m/s}] \quad (2.5)$$

- les ondes de «Rayleigh» (R-waves) se propageant en surface selon une trajectoire circulaire

$$v_R = \frac{0.87 + 1.2\nu}{1 + \nu} v_s \quad [\text{m/s}] \quad (2.6)$$

Le récepteur se trouvant à proximité immédiate du point d'impact (env 15 cm), ce sont les *ondes de compression (P-waves)* qui, en arrivant les premières, vont produire le *signal de réponse dominant* servant soit à déterminer l'épaisseur de l'élément, soit à localiser des vides, comme des délaminations ou des fissures éventuelles.

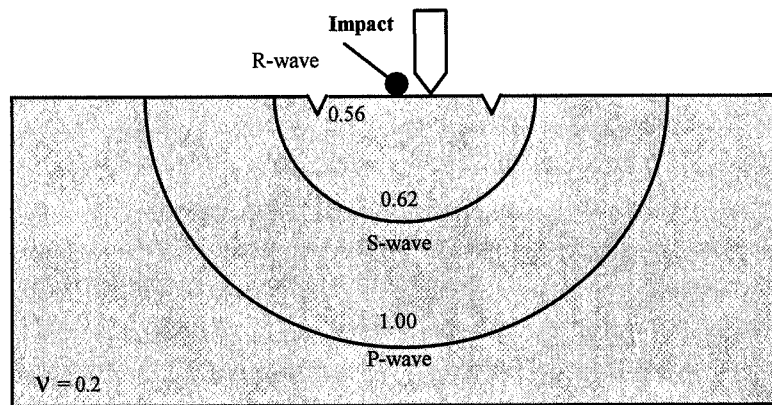


Figure 2.3 : Schéma de propagation des 3 types d'ondes avec leurs vitesses relatives (tiré de [1])

Le retour des ondes de compression après réflexion, provoque un abaissement cyclique de la surface supérieure de l'élément qui est mesuré par l'accéléromètre et transmis à l'ordinateur qui effectue la transformation mathématique. L'expérience a montré qu'une vitesse d'enregistrement de 500 kHz avec 1024 points relevés sur le spectre des amplitudes, fournissait une précision d'analyse suffisante avec une résolution d'environ 0.5 kHz ($500/1024=0.488$) [1].

2.4 RELATIONS DE BASE

La propagation d'une onde mécanique dans un matériau élastique peut être simplement décrite à l'aide des relations suivantes:

- temps de retour théorique de l'onde de compression $\Delta t = \frac{2d}{v_p}$ [μs] (2.7)
- fréquence de retour $f = \frac{1}{\Delta t}$ [1/s] (2.8)
- épaisseur de l'objet / profondeur du défaut (effectif) $d = \frac{\beta \cdot v_p}{2f}$ [m] (2.9)

Le facteur β dépend de la géométrie de l'élément testé. Il permet de tenir compte de ses modes propres de vibration. Il est défini en fonction du rapport h/b , h étant l'épaisseur de l'élément et b sa plus petite dimension latérale.

Lorsque l'élément testé présente un rapport h/d égal ou inférieur à 0.2, on se trouve dans les conditions théoriques de plaque (dimensions latérales égales à au moins 5 fois l'épaisseur). Le facteur β est alors égal à 0.96.

Dans le cas d'un élément de section rectangulaire avec un rapport h/b compris entre 0.6 et 2, le facteur β varie de 0.84 à 0.96. Pour une section carrée, le facteur β est égal à 0.87. Pour un élément cylindrique il est de 0.92.

Il est à noter que le programme informatique utilisé pour la gestion et l'analyse des résultats des mesures Impact-Echo intègre automatiquement ce paramètre dans ses calculs.

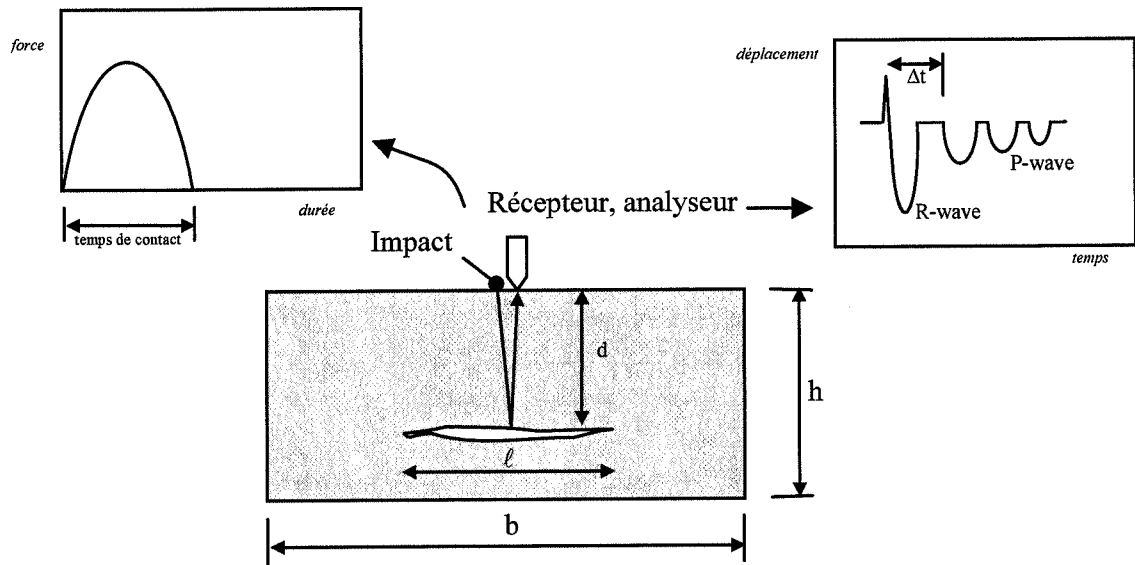


Figure 2.4 : Principe schématique de réflexion d'une onde mécanique sur un défaut interne

Lorsque l'élément testé est composé de 2 matériaux (asphalte-béton, béton-acier par exemple), il importe de considérer l'impédance de chacun d'eux et de calculer le coefficient de réflexion de ces 2 matériaux afin de prévoir si l'interface sera décelable par Impact-Echo. L'impédance Z et le coefficient de réflexion R sont définis par les relations suivantes [1]:

- impédance

$$Z = \rho \cdot v_p \quad [s] \quad (2.10)$$

- coefficient de réflexion

$$R = \frac{A_{ref}}{A_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad [-] \quad (2.11)$$

Lorsque l'impédance acoustique du matériau sous-jacent Z_2 est inférieure à celle du matériau de surface Z_1 (béton / air par exemple) l'onde de compression subit un déphasage avant de revenir à la surface et son amplitude est proche de celle de l'onde incidente. Lorsque l'impédance acoustique du matériau sous-jacent Z_2 est supérieure à celle du matériau de surface Z_1 (béton / acier par exemple) l'onde de compression ne subit pas de déphasage avant de revenir à la surface et son amplitude est égale à celle de l'onde incidente (fig. 2.5).

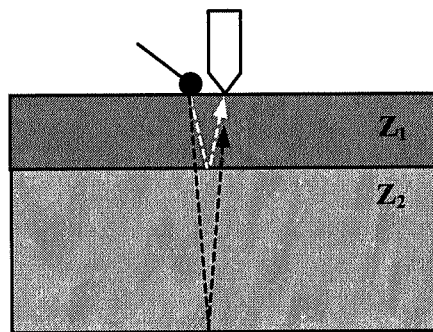


Figure 2.5 : Élément constitué de deux matériaux

3 DOMAINES D'UTILISATION [1]

3.1 MESURE D'ÉPAISSEUR

Grâce au principe même de fonctionnement de la méthode Impact-Echo (réflexion multiple d'une onde de compression entre l'intrados et l'extrados d'un élément continu), une des premières applications de la méthode est le contrôle d'épaisseur d'éléments en béton. C'est également l'application la plus aisée pour l'utilisateur car d'une part, le seul paramètre à déterminer au préalable est la vitesse de propagation des ondes de compression dans le matériau, et d'autre part, l'amplitude du signal de réponse est pratiquement toujours dominante par rapport à celle des signaux secondaires (fig. 3.1). Par la suite, on parlera de pic de fréquence d'épaisseur dominant f_e .

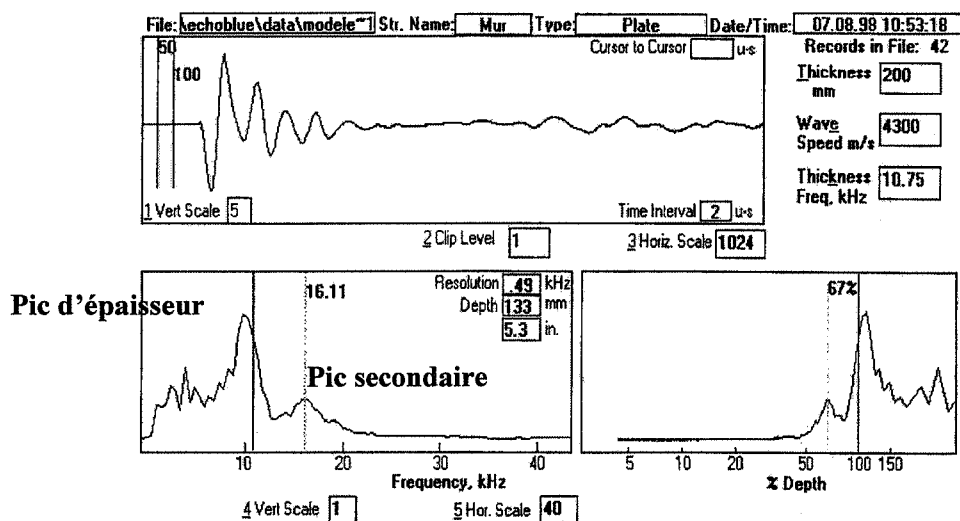


Figure 3.1 : Exemple de spectre de fréquences avec le pic principal (épaisseur) et un pic secondaire

3.2 FISSURES ET DÉLAMINATIONS

La seconde utilisation de la méthode Impact-Echo qui découle en fait de l'application décrite sous 3.1, est la recherche de délaminations et de fissures et d'en définir les caractéristiques spatiales et dimensionnelles (profondeur, étendue, etc.). Sous la condition que la délamination recherchée (fissure horizontale) soit de dimensions compatibles avec l'impacteur utilisé (voir chap. 4.2 et 4.3), l'utilisateur sera à même de la repérer, de mesurer sa position par rapport à la surface (profondeur), ainsi que de définir son étendue grâce à une succession de tests judicieusement répartis.

Dans le cas où cette fissure fait un angle supérieur à 45 degrés avec la surface de l'élément, on ne parle plus de délamination et la fissure a de grandes chances d'être visible en surface. Dans ce cas, la méthode peut être utilisée pour mesurer la profondeur de pénétration selon le procédé décrit au chap. 5.6. Soulignons que dans ce cas, la fissure doit impérativement être ouverte en surface et que par conséquent, la méthode ne s'applique pas au contrôle d'une fissure injectée.

3.3 NIDS DE GRAVIER

Un nid de gravier étant une discontinuité plus ou moins locale et diffuse au sein du matériau, ce type de défaut est également décelable par Impact-Echo, mais l'interprétation du spectre de réponse est souvent assez complexe.

La présence de zones de vides de petites dimensions entraîne en réalité une entrave au déplacement de l'onde de compression. Il s'en suit un remplacement du pic de fréquence d'épaisseur f_e par plusieurs autres pics ou par un pic unique décalés vers les basses fréquences ainsi que l'apparition de petits pics souvent difficiles à identifier qui correspondent à de multiples réflexions de l'onde sur les vides du nid de gravier.

3.4 CONTRÔLE D'INTERFACES

On entend par interface toute surface séparant 2 matériaux différents (asphalte-béton p.ex.) ou 2 matériaux identiques mais ayant été mis en place de manière différée dans le temps (nouveau-ancien béton p. ex.). Deux cas de figure peuvent se présenter :

1. La liaison entre les deux couches est bonne, auquel cas l'interface ne sera visible que si le coefficient de réflexion R (voir chap. 2.4) est suffisamment élevé [1]:

$0 \leq R \leq 0.24$ l'interface n'est pas visible par Impact-Echo

$0.25 \leq R$ l'interface est détectée par Impact-Echo

Les interfaces suivantes présentent souvent un intérêt majeur pour les ingénieurs:

béton – asphalte $R \cong 0.20$ *béton – roche* $R \cong 0.20 - 0.50$ *béton – béton* $R \cong 0$

2. La couche supérieure est partiellement ou totalement désolidarisée de la couche inférieure. Dans ce cas, la détection de l'interface sera fonction du taux de décollement U . Le taux de décollement U est défini comme le pourcentage de surface délaminée par mètre carré [1].

$0 \leq U \leq 50 \%$ l'interface n'est pas visible par Impact-Echo

$50\% \leq U \leq 100 \%$ l'interface est détectée par Impact-Echo

Connaissant la vitesse de propagation des ondes de compression dans chaque couche, le contrôle des épaisseurs est chose aisée car elle se déduit directement des pics de fréquence observés. (voir chap. 4.5)

3.5 CONTRÔLE DE L'INJECTION DE GAINES DE PRÉCONTRAINTÉ

Les essais réalisés par Sansalone et Carino [8] ont montré que l'application de la méthode Impact-Echo au contrôle de l'injection des gaines de câbles de précontrainte donnait des résultats plutôt pessimistes au regard de la réalité. Les tronçons non-injectés ont tendance d'une part à apparaître trop étendus et de plus, ils risquent d'apparaître en surnombre. Ceci est dû principalement au fait que de par leur trajectoire sphérique, les ondes de compression sont parfois réfléchies par des défauts qui ne sont pas toujours situés à la verticale du récepteur. C'est d'une part un avantage, car il est ainsi possible de détecter des défauts sans devoir se positionner très exactement par rapport à eux (couverture entre 2 points de mesure par exemple) ; mais c'est d'autre part également un inconvénient car il devient de ce fait quasiment impossible de déterminer avec précision l'étendue d'un tronçon non-injecté.

Par ailleurs il peut arriver que sous l'apparence d'une mauvaise injection du câble, se cache en réalité un fin décollement du coulis d'avec la gaine par suite du retrait, ou encore une hétérogénéité dans la dureté de la matrice aux abords immédiats de la gaine due à une mise en œuvre imparfaite lors du bétonnage [8].

D'autres études [2] proposent d'utiliser la méthode Impact-Echo en envoyant un signal le long du câble par l'une de ses extrémités. L'atténuation importante du signal due à la longueur du chemin à parcourir fait qu'il est en règle générale difficile de détecter plus de 2 défauts d'injection. Il semble que cette méthode soit à l'heure actuelle difficilement applicable en pratique, en dehors peut-être du contrôle de la qualité en usine d'éléments préfabriqués. Il n'existe aujourd'hui en Suisse aucune expérience référencée de ce type.

3.6 MAÇONNERIE

Les murs en maçonnerie se comportent vis-à-vis des mesures Impact-Echo généralement comme une plaque faite d'un matériau continu. En effet les différents constituants d'un tel mur (briques, joints, mortier) présentent des caractéristiques acoustiques sensiblement identiques [1]. La conséquence de la présence de vides dans les briques est un décalage du pic d'épaisseur totale vers les basses fréquences sans pour autant perturber le signal. Seuls des vides satisfaisant aux critères de dimensions minimales peuvent provoquer des réflexions (absence d'injection, mauvais contact entre des éléments de mur etc.). Les mesures Impact-Echo peuvent ainsi être entreprises pour :

- mesurer des épaisseurs de mur
- contrôler le remplissage des vides internes aux briques
- contrôler la qualité de l'injection entre deux éléments de mur en maçonnerie

4 MESURES IMPACT-ECHO

4.1 SPECTRE DES FREQUENCES

Lors de chaque mesure Impact-Echo, l'ordinateur génère sur l'interface graphique trois courbes qu'il s'agit d'interpréter soigneusement :

- la courbe supérieure (fig. 4.1) représente l'amplitude des déplacements mesurés par l'accéléromètre à la surface de l'élément en fonction du temps
- la courbe inférieure gauche représente le spectre des fréquences proprement dit. C'est l'analyse critique et judicieuse des différents pics de fréquence qui permet de mesurer l'épaisseur de l'élément ainsi que de déceler la présence éventuelle de défauts internes.
- la courbe inférieure droite contient la même information mais présentée avec une échelle horizontale différente (pourcentage de l'épaisseur de l'élément)

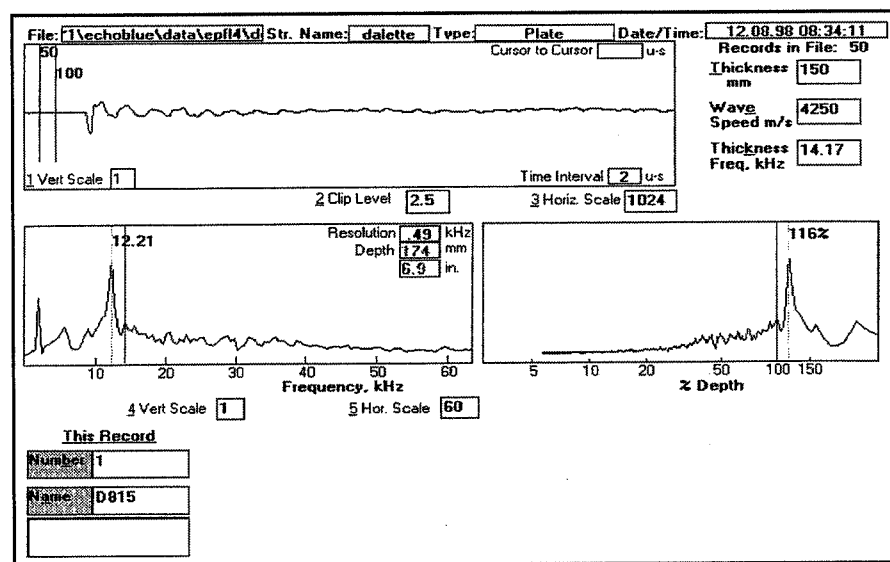


Figure 4.1 : Sortie graphique d'une mesure Impact-Echo

L'analyse du spectre des fréquences issu de la transformation de la courbe des déplacements en fonction du temps n'est pas chose aisée. En effet, les pics de fréquence observés peuvent provenir d'origines diverses qu'il s'agit de détecter et de différencier avec soin afin d'éviter toute interprétation erronée. L'exemple fictif donné ci-dessous montre un élément de dalle de béton précontraint. Onze causes possibles de résonance sont présentées et expliquées :

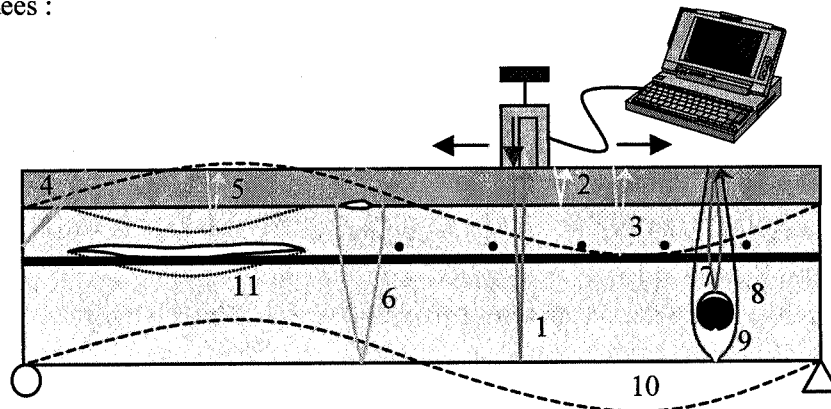


Figure 4.2 : Causes possibles de résonance dans un élément en béton précontraint

1. La liaison entre le revêtement et le béton est bonne. De plus, l'impédance des deux matériaux est proche (produit de la densité de la matrice par la vitesse de propagation de l'onde de compression). L'onde traverse les deux matériaux et est réfléchi par la face inférieure de l'élément ; la réponse sera du type grande amplitude, basse fréquence. [1]
2. La liaison entre le revêtement et le béton est mauvaise ou l'impédance des deux matériaux est trop éloignée. Une réflexion caractérisée par une fréquence élevée se produit à l'interface. En général les réponses 1 et 2 interviennent simultanément lors d'essais effectués au travers d'un revêtement bitumineux, l'impédance de l'asphalte étant d'environ 1.5 fois plus élevée que celle du béton (selon les lois de la réflexion [6], environ 20% du signal est réfléchi à l'interface alors que le reste est transmis dans le béton). Dans ce cas, le premier pic observable est du type grande amplitude basse fréquence (face inférieure / défaut) tandis que le second apparaît avec une amplitude plus faible mais avec une fréquence supérieure (interface revêtement-béton).
3. Si une armature se trouve à une profondeur supérieure à la profondeur critique de détection et si le diamètre des barres ϕ_{barre} est important vis-à-vis de l'enrobage t ($\phi_{\text{barre}}/t > 0.3$ [1]), une réflexion sur ces dernières provoquera le même pic de fréquence qu'une délamination virtuelle située à une profondeur 2 fois plus grande [1] (impédance de l'acier $\approx 5 \times$ impédance du béton, $f_{\text{béton-arm}} = \frac{1}{2} f_{\text{béton-air}}$, profondeur d'armature mesurée $d_{\text{arm}} = v_p/4f$) [1]. Il faut être dès lors particulièrement attentif à ne pas confondre ce type de réponse avec celui d'un défaut (délamination, fissure, etc.) situé une profondeur égale à 2 fois celle du lit d'armature et qui en réalité n'existerait pas.
4. La proximité des zones de bord de l'élément testé induit des fréquences parasites venant charger inutilement le spectre de réponse. La lecture devient alors difficile et le jugement de l'opérateur peut être induit en erreur. Ainsi il est important que l'élément que l'on teste soit bien défini géométriquement afin de pouvoir en faire une analyse conforme à la réalité.
5. Un défaut du type délamination est susceptible de réfléchir l'onde mécanique incidente pour autant qu'il satisfasse à trois conditions:
 - être situé entre les deux épaisseurs critiques de détection d_{min} et d_{max} . Si ces conditions sont satisfaites, la réponse sera du type haute fréquence. La pointe de fréquence diminuera de valeur lorsque la profondeur de la délamination augmentera
 - avoir une étendue au minimum égale à $\ell > \ell_{\text{crit}}$
 - être d'ouverture supérieure à l'ouverture de fissure minimale $e \approx 0.1 \text{ mm}$
6. Si l'étendue du défaut est faible, les ondes peuvent le contourner et se réfléchir sur la face inférieure de l'élément. La réponse est semblable à celle d'un élément sain mais avec une légère diminution de la fréquence d'épaisseur (augmentation du trajet parcouru par l'onde de compression [3]. Les réponses 5 et 6 peuvent se manifester simultanément sur le même spectre de fréquence.
7. Les défauts d'injection des câbles de précontrainte peuvent être détectés par la méthode Impact-Echo indépendamment du matériau de la gaine (acier, plastique, etc.) [1], mais il semble que l'on atteigne ici certaines limites. En effet, de par le fait que la surface de réflexion ne soit pas plane mais cylindrique, le signal de réponse n'est jamais aussi évident à détecter que lors d'une délamination horizontale [2]. De plus, lorsqu'il s'agit d'ausculter des âmes de poutres ou de fins sommiers, le diamètre des gaines est souvent grand au regard de l'épaisseur du recouvrement en béton. Il en résulte que la réflexion sur le vide et le phénomène de contournement de la gaine ne peuvent pas toujours être observés, ce qui rend l'interprétation difficile. Cependant, un phénomène de flexion devrait apparaître (voir points 10 et 11). Un palliatif à l'absence de pointe de fréquence causée par du vide consiste à rechercher les réflexions sur les brins d'acier du câble. Celles-ci ne seront visibles que si la gaine est injectée.
8. Voir point 6.
9. Lorsque des câbles présentent des défauts d'injection du côté opposé à la surface testée, il se peut que l'on perçoive un signal de réponse par diffraction autour de la gaine, provenant de multiples réflexions entre la face opposée de l'élément et le vide situé entre le câble et la gaine [1].

10. Nous avons jusqu'ici passé en revue les différents phénomènes de réflexion de l'onde d'impulsion initiale au travers du matériau sans nous soucier de la fréquence vibratoire propre de l'élément. A la fréquence de réflexion, on oppose ici une fréquence de vibration produite par la résonance excitée par l'impact de la bille. Cette fréquence de vibration correspond à l'un des premiers modes propres vibratoires de l'élément (fig. 4.3). Différents modes propres vibratoires ont été calculés pour plusieurs types de section en fonction de leurs caractéristiques géométriques (rectangulaire, circulaire, etc...).

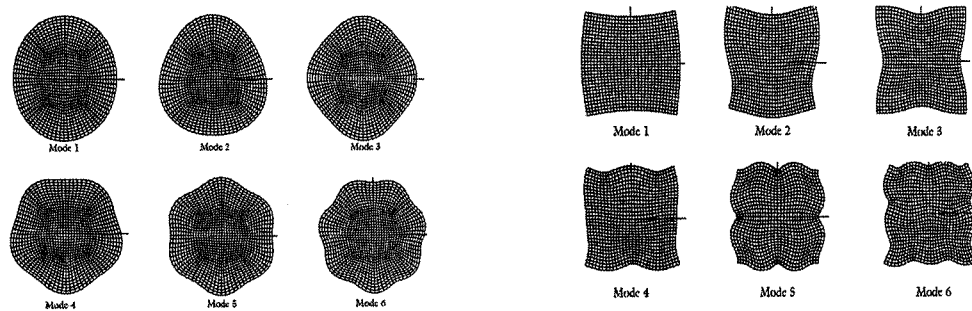


Figure 4.3 : Modes propres de vibration pour des sections carrées et circulaires, tiré de [1]

11. Dans le cas d'une délamination superficielle, la fréquence vibratoire peut devenir prédominante à tel point que son amplitude dépasse celle de la fréquence de réflexion (son "creux" lors d'un impact en surface). La valeur de la fréquence flexionnelle est par ailleurs toujours inférieure à la fréquence de réflexion [1].

4.2 PROFONDEURS CRITIQUES [1]

Une des conditions pour obtenir une réflexion sur un défaut interne est que celui-ci se trouve entre deux profondeurs que l'on appelle profondeurs critiques (fig. 4.4).

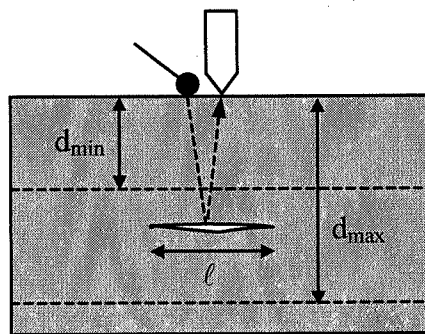


Figure 4.4 : Profondeurs critiques

Ces profondeurs critiques sont définies en fonction des caractéristiques de l'onde induite par le choc de la bille (profondeur minimale) et par la dimension du défaut susceptible de réfléchir cette onde (profondeur maximale). Les relations entre la longueur d'onde de l'impulsion, la dimension du défaut et sa profondeur sont expliquées ci-après.

4.2.1 Profondeur minimale

L'onde de compression générée par l'impact de la bille doit contenir une longueur d'onde égale ou inférieure à 2 fois la profondeur du défaut recherché :

$$d_{\min} = \frac{\beta \cdot v_p}{2 f_i} = \frac{\lambda}{2} \quad [\text{mm}] \quad (4.1)$$

Ceci permet d'assurer que les caractéristiques de l'onde de compression générée par l'impact (longueur d'onde, période) correspondent bien à la période des réflexions multiples qu'elle engendre dans l'élément testé. Si le défaut se trouve trop près de la surface, les caractéristiques de l'onde ne s'accordent pas avec le retour en surface des périodes de l'onde et le spectre des fréquences ne contient pas de pic correspondant à la profondeur du défaut recherché. C'est pourquoi il faut choisir un diamètre de bille d'autant plus petit (faible longueur d'onde, haute fréquence) que le défaut se situe près de la surface (tableau 4.1).

Diamètre de l'impacteur $\varnothing$ [mm]	Temps de contact t_c [μsec]	Longueur d'onde λ [mm]	Profondeur minimale [mm]
5	22	70	35
8	35	112	56
11	48	154	77
15	65	210	105

Tableau 4.1 : Profondeurs minimales en fonction du diamètre des billes

4.2.2 Profondeur maximale

Une profondeur égale ou inférieure à 3 fois la dimension latérale minimale du défaut permet une réflexion claire de l'onde de compression. Ainsi, plus le défaut est situé loin de la surface testée, plus ce dernier doit être large pour permettre une réflexion exploitable.

- limite raisonnable $d_{\max} = 3 \cdot \ell$ [mm] (4.2)

- limite théorique absolue $d_{\max} = 4 \cdot \ell$ [mm] (4.3)

4.3 DIMENSIONS CRITIQUES [1]

Un vide ne peut être décelée par réflexion, que si ses dimensions sont compatibles avec les caractéristiques de l'onde de compression. Si l'on utilise une bille de grand diamètre (basse fréquence, grande longueur d'onde) on limite les possibilités de détection de défauts de petite dimension. La largeur critique de détection est définie comme suit :

$$\ell_{\text{crit}} = \lambda_i \quad [\text{mm}] \quad (4.4)$$

Par largeur critique de détection d'un défaut, il faut comprendre sa plus petite dimension latérale $\ell_{\text{crit}} = \text{MIN}[\ell_x; \ell_y]$. Ainsi, pour une gaine de câble de précontrainte avec un défaut d'injection, il s'agit du diamètre de la gaine et non de la longueur du tronçon non injecté.

L'ouverture minimale de la fissuration permettant une détection par Impact-Echo vaut

$$e_{\min} = 0.08 \quad [\text{mm}] \quad (4.5)$$

Les ondes de compression traverseront sans la moindre réflexion toute microfissure d'ouverture inférieure à cette limite.

4.4 VITESSE DE PROPAGATION DES ONDES DE COMPRESSION

La vitesse de propagation des ondes de compression dans le béton (P-wave) est une donnée essentielle lors de toute utilisation de la méthode Impact-Echo. C'est elle qui permet la localisation en profondeur d'éventuels défauts ou la mesure d'épaisseur d'éléments structurels accessibles d'un seul côté (rappel: $d = \beta v_p / 2f$).

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer cette vitesse avant d'entamer les mesures proprement dites :

- l'ouvrage à tester présente une partie d'épaisseur connue et facilement accessible

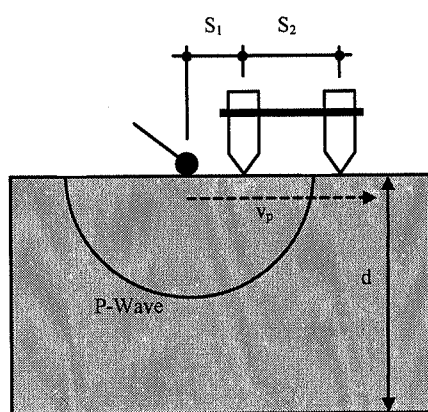
Dans ce cas, on effectue une première mesure Impact-Echo à cet endroit avec une vitesse admise à 4000 m/s par exemple. Connaissant préalablement l'épaisseur de l'élément et en fonction du résultat obtenu, on corrige la vitesse de propagation dans le programme de calcul. En principe, une seule itération suffit [3].

- les conditions sont identiques à celles décrites ci-dessus mais l'on dispose d'un émetteur et d'un capteur d'ultrasons

Les essais effectués selon cette méthode ont fourni des résultats relativement constants (erreur relative de 3% pour 600 points de mesures sur un échantillon armé et non-armé) [7]. Cependant on est toujours dépendant des conditions internes de l'élément (influence de l'armature, défauts éventuels, etc.). De plus, rares sont les cas dans la réalité où 2 faces opposées sont accessibles sans difficulté pour ce type de mesure.

- afin de s'affranchir des réserves émises ci-dessus on mesure avec l'Impact-Echo la vitesse de déplacement d'un front d'onde provoqué par l'impact d'une bille à la surface de l'élément à étudier

Le système de mesure consiste à placer deux récepteurs à une distance minimale de 25 cm et à appliquer un impact avec une bille sur la ligne des récepteurs, à l'extérieur de ceux-ci. La durée de déplacement du front d'onde est mesurée entre les deux récepteurs et sa vitesse de propagation est ensuite calculée [7].



$$S_1 = 15 \text{ cm} \quad S_2 = 25 \text{ cm}$$

$$d = \frac{1}{2} S_2 f_e (t_2 - t_1) \quad (4.6)$$

Figure 4.5 : Mesure de la vitesse de surface d'un front d'onde de compression, et application à un calcul d'épaisseur (tiré de [7])

La vitesse ainsi calculée est d'environ 10% inférieure à celle d'une onde ultrason, vraisemblablement en raison de la ségrégation des granulats en surface lors de la mise en place du béton (effet de peau). Cependant, l'expérience montre que cette vitesse est tout à fait adéquate pour les procédés de calculs par résonance, et qu'elle est en particulier bien applicable à la méthode Impact-Echo.

4.5 MESURE SUR DU BÉTON AU TRAVERS D'UN REVÊTEMENT

Les mesures faites au travers d'un revêtement sont possibles pour autant que sa liaison avec le béton soit bonne et que l'onde générée soit de suffisamment haute fréquence (afin d'augmenter $d_{\min}$) [4]. Comme il en a déjà été fait mention précédemment, il faut s'attendre à déceler deux pics principaux; un premier de grande amplitude et de basse fréquence correspondant à une réflexion sur une interface béton-air, et un deuxième, d'amplitude inférieure et de plus haute fréquence, provenant de la réflexion sur l'interface asphalte-béton (fig. 4.6). Les relations entre les fréquences et les profondeurs deviennent dans ce cas [4]:

fréquence de réflexion interface béton-air :

$$f_d = \frac{1}{t_c + t_a} = \frac{1}{\left(\frac{2d_c}{\beta \cdot v_{pc}} + \frac{2d_a}{\beta \cdot v_{pa}}\right)} \text{ [kHz]} \quad (4.7)$$

épaisseur du revêtement :

$$d_a = \frac{\beta \cdot v_{pa}}{2f_a} \text{ [mm]} \quad (4.8)$$

profondeur de l'interface béton-air (délamination) par rapport à la face supérieure de la dalle :

$$d_c = \frac{\beta \cdot v_{pc}}{2} \left[\frac{1}{f_d + f_a} \right] \text{ [mm]} \quad (4.9)$$

profondeur de cette interface par rapport à la surface du revêtement :

$$d_d = d_a + d_c = \frac{1}{2} \left(\frac{\beta \cdot v_{pc}}{f_d} + \frac{\beta \cdot v_{pa} + \beta \cdot v_{pc}}{f_a} \right) \text{ [mm]} \quad (4.10)$$

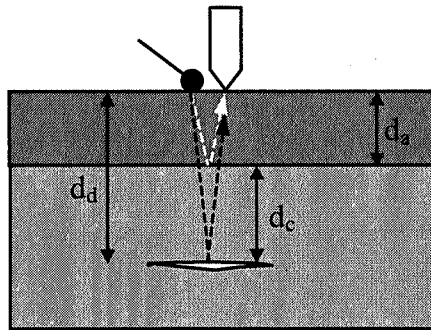


Figure 4.6 : Mesure au travers d'un revêtement

4.6 EFFET DES BARRES D'ARMATURE

La fréquence de réflexion sur une barre d'armature f_s peut être l'objet d'une mauvaise interprétation (voir chap. 4.1). Si l'armature se trouve à une profondeur comprise entre les profondeurs critiques de détection et si le diamètre des barres $\varnothing_{barre}$ est important vis-à-vis du recouvrement t ($\varnothing_{barre}/t > 0.3$ [2]), une réflexion sur ces dernières provoquera le même pic de fréquence qu'une délamination virtuelle située à une profondeur 2 fois plus grande [6]. Il paraît donc vital dans un premier temps d'effectuer une localisation précise de l'armature (à l'aide d'un profomètre par exemple) afin d'éviter tout risque de confusion, lorsque l'on se trouve en présence d'un élément fortement armé. La fréquence de réflexion d'une onde de compression sur une interface béton - barre métallique se calcule comme suit :

$$f_s = \zeta \cdot v_p / 4 \cdot t \quad \text{avec } \zeta = -0.6 \cdot \varnothing / t + 1.5 \quad \text{et} \quad 0.3 \leq \varnothing / t \leq 0.83 \quad (4.11)$$

5 DESCRIPTION DES ESSAIS EFFECTUÉS

5.1 ÉTENDUE MINIMALE DE DÉTECTION (LABORATOIRE)

5.1.1 Paramètres étudiés

Les *dimensions minimales* des défauts décelables à l'aide de la méthode Impact-Echo dans un élément en béton armé sont recherchées. La littérature et l'expérience nous livrent à ce sujet des indications *incertaines ou contradictoires* qu'il s'agit de vérifier par des essais. Il nous paraît en effet essentiel de connaître ces dimensions avec précision, pour pouvoir choisir dans chaque cas de figure un impacteur adéquat, en fonction des caractéristiques géométriques de l'élément testé et du type de défaut attendu. Les buts de l'essai sont de :

- déterminer par des mesures la relation qui existe entre la longueur de l'onde d'impulsion et la largeur minimale d'un défaut (ici délamination) pour être décelable par Impact-Echo
- tester si l'orientation de l'axe reliant l'impacteur au récepteur a une influence sur les résultats des mesures
- mesurer et comparer les fréquences produites par les différentes billes de l'impacteur

5.1.2 Description de l'élément testé

Il s'agit de trois dalles de $1.8 \times 1.0 \times 0.15$ m légèrement armées avec 2 treillis de $\varnothing 6$, 150/150 mm. Chaque dalle a été spécialement préparée pour des essais avec des billes de 5, respectivement 8 et 11 mm de diamètre. Elles ont été bétonnées en 2 étapes à 2 semaines d'intervalle. Des délaminations artificielles ont été insérées dans le joint des étapes de bétonnage à 7.5 cm de profondeur. Il s'agit de bandes de plastique en double épaisseur préalablement découpées à des largeurs correspondant à λ , $\lambda/1.8$ et $\lambda/2.5$, (λ correspond aux longueurs d'onde de compression produites par les billes de 5, 8 et 11 mm) (fig. 5.1 et 5.2).

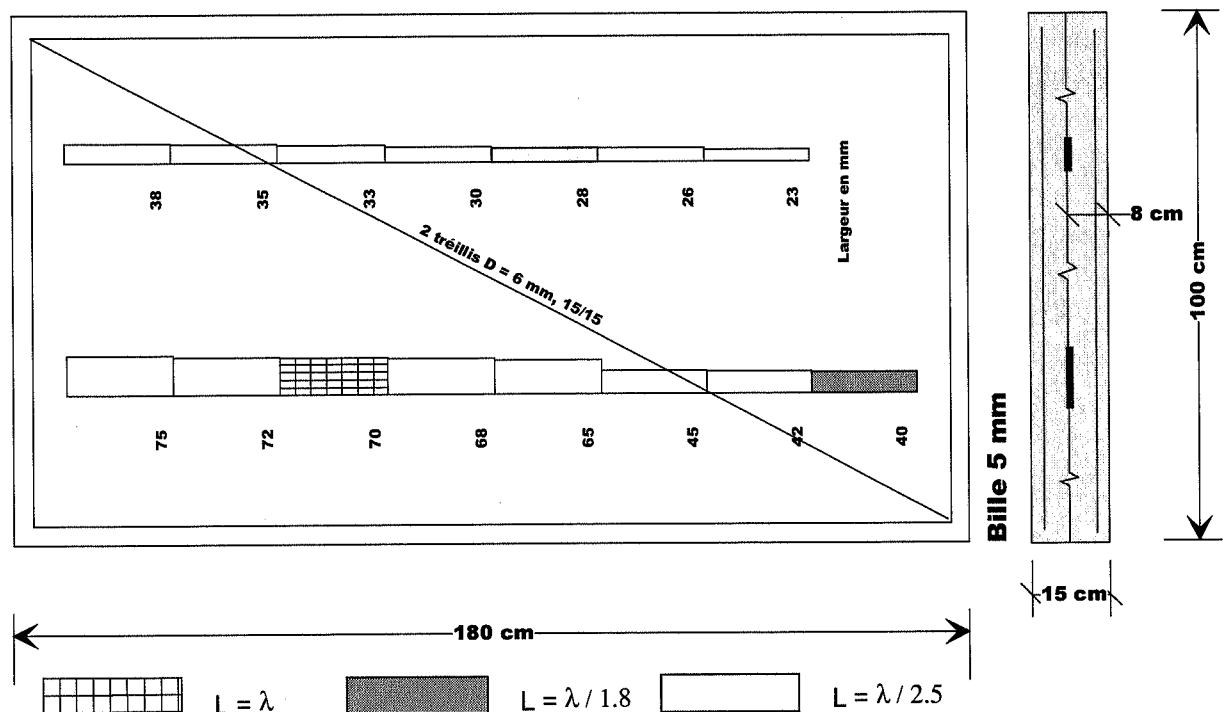


Figure 5.1 : Plan de coffrage et d'armature d'une dalle avec délaminations prévues pour une bille $\varnothing 5$ mm

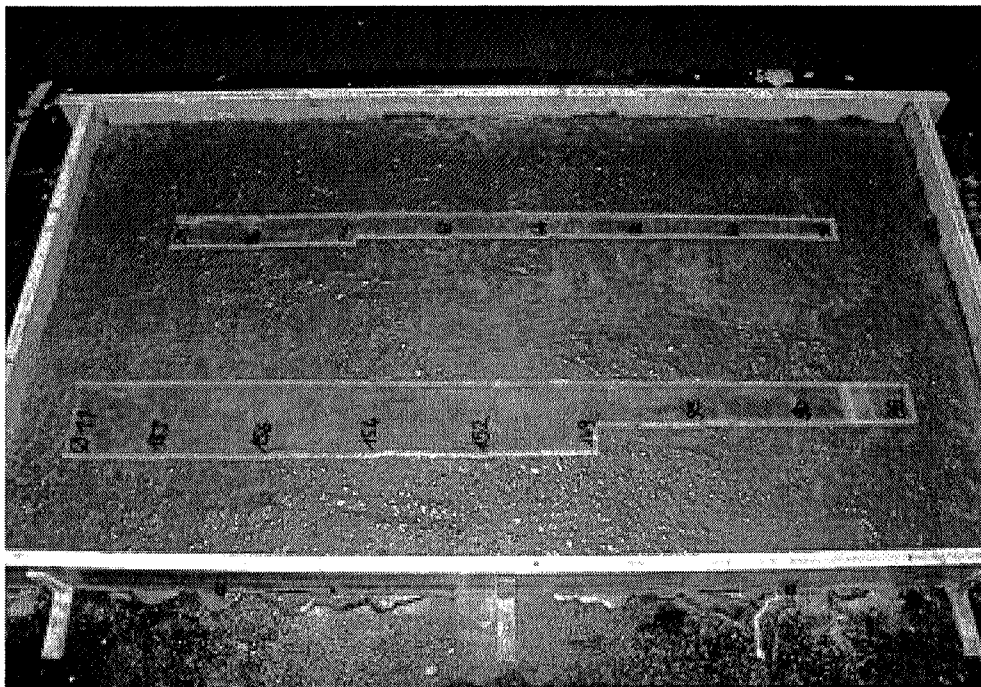


Figure 5.2 : Pose des délamination artificielles après la première phase de bétonnage

5.1.3 Déroulement de l'essai

La localisation proprement dite des défauts n'est pas l'objet de ce test. C'est pourquoi les points de mesures ont été soigneusement marqués sur la face supérieure de chaque dalle (fig. 5.3) afin de s'affranchir de toute perte de temps et de toute erreur de positionnement des appareils pendant les essais. Les mesures ont été systématiquement effectuées avec l'axe reliant l'impacteur au récepteur parallèle puis perpendiculaire à l'axe des délamination.

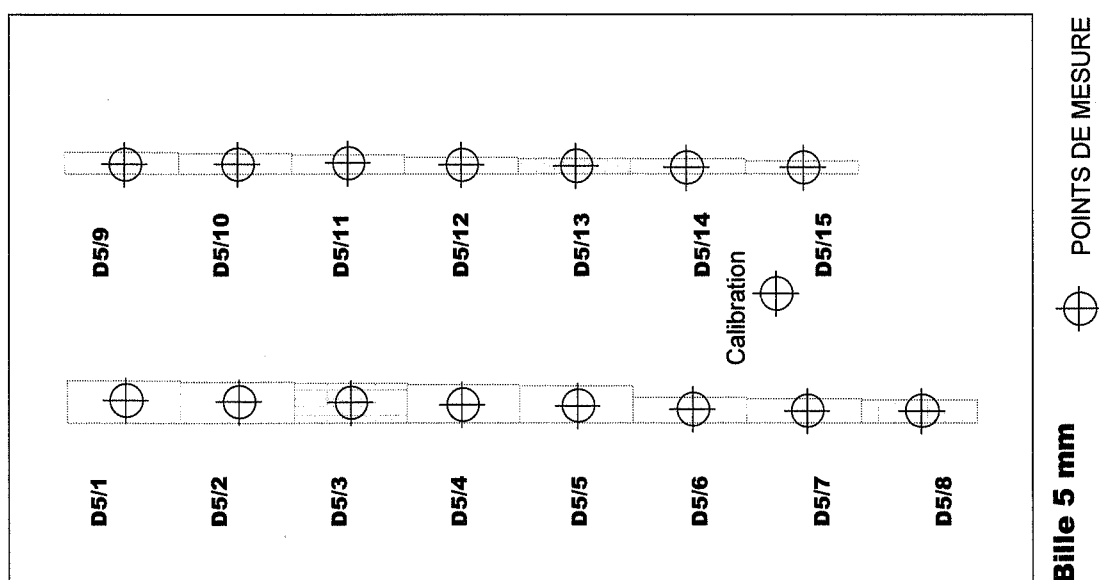


Figure 5.3 : Points de mesure sur la dalle prévue pour une bille de $\varnothing 5\text{ mm}$

5.1.4 Résultats

Trois types de résultats ont clairement été mis en évidence dans cet essai:

1. L'onde de compression contourne la délamination et provoque un déplacement vers les basses fréquences du pic de fréquence d'épaisseur aussi longtemps que la largeur de la délamination est inférieure à 45 mm, ceci indépendamment du diamètre de la bille utilisée (fig. 5.4).

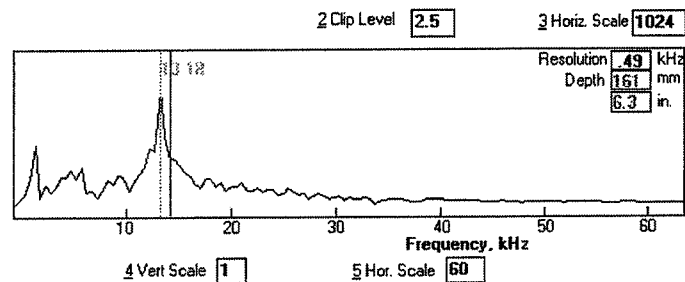


Figure 5.4 : Décalage du pic d'épaisseur vers les basses fréquences

2. Au-delà de cette largeur, les ondes ne contournent plus la délamination et la réponse se complique. Des fréquences de modes flexionnels apparaissent tandis que la fréquence d'épaisseur disparaît (fig. 5.5). Les pics de fréquence flexionnelle se dédoublent en bordure des délaminations mais aucune réflexion n'est encore discernable.

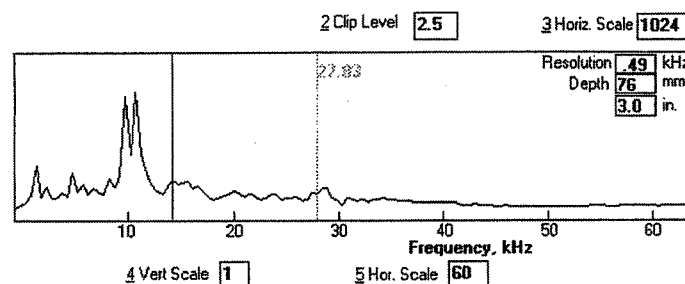


Figure 5.5 : Apparition des modes de fréquence flexionnels

3. La valeur de la largeur minimale critique d'un défaut $l_{crit} = \lambda$ s'impose comme étant une valeur absolument minimale. En effet, sur la dalle prévue pour la bille de 5 mm, le seul pic de fréquence d'épaisseur pouvant correspondre à la profondeur de la délamination n'est apparu qu'à partir d'une largeur égale à 75 mm, soit env. 1.1λ . En testant la dalle prévue pour la bille de 11 mm avec la bille de 5 mm, une réflexion claire s'est également produite au droit d'une délamination large de 88 mm (fig. 5.6 et 5.7). Enfin, avec la dalle prévue pour la bille de 8 mm et en la testant avec cette bille, une réflexion n'est apparue qu'au-dessus d'une délamination de 137 mm, soit environ 1.2λ .

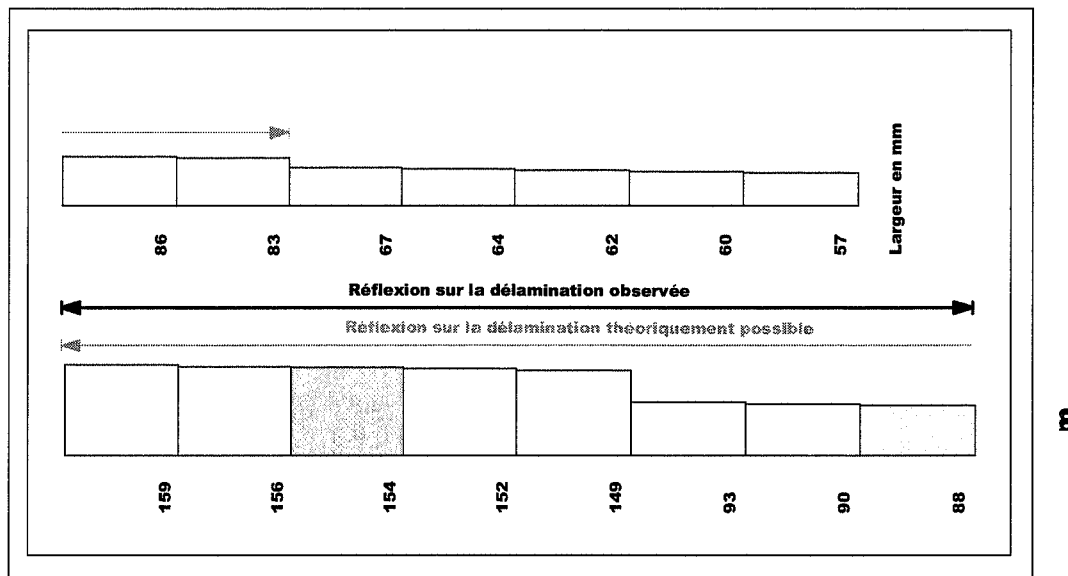


Figure 5.6 : Vue en plan des délaminations artificielles dans la dalle prévue pour la bille de 11 mm

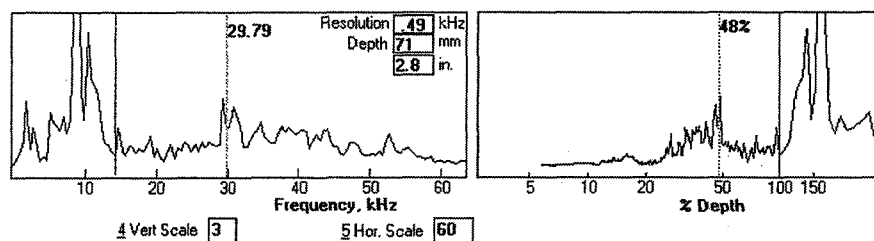


Figure 5.7 : Réflexion sur une délamination à 71 mm

5.1.5 Conclusions

La largeur critique de détection est la valeur minimale des deux dimensions en plan d'un défaut ($l_{crit} = \text{MIN}[l_x; l_y] > 1.25 \cdot \lambda$) à partir de laquelle il peut être identifié par une réflexion.

La réflexion des ondes de compression sur un vide à l'intérieur d'un élément en béton ne peut se faire que si la plus petite dimension du vide est supérieure d'environ 25 % à la longueur de l'onde de compression générée par l'impact de la bille.

Si le rapport entre la largeur l et la profondeur d'une délamination est tel que $l/d < 0.6$, celle-ci sera essentiellement détectable grâce à une diminution de la fréquence d'épaisseur (contournement de la zone par les ondes), mais aucune réflexion sur la délamination ne sera perceptible.

Si le rapport est tel que $l/d > 0.6$, un phénomène de flexion se produit. Il se manifeste par un ou plusieurs pics de fréquences inférieures et d'amplitudes supérieures à ceux des réflexions d'épaisseur.

Pour cette raison, même si les dimensions d'un vide sont suffisantes, il est souvent difficile d'observer simultanément un pic d'épaisseur et les pics flexionnels correspondants parce que les courbes sont calibrées selon le pic d'amplitude maximum.

Les pics de fréquence flexionnelle se dédoublent lorsque la zone délaminée entre en vibration selon des modes vibratoires multiples (voir fig. 4.2 / 11). Ce phénomène se produit principalement en bordure des zones délaminées [1].

La position de l'axe impacteur - récepteur n'a pas d'influence fondamentale sur le résultat d'une mesure. Cependant, dans le cas d'une gaine de câble de précontrainte, on choisira de préférence un axe impacteur - récepteur parallèle à l'axe du câble.

5.2 PROFONDEURS CRITIQUES DE DÉTECTION ET CONTROLE D'INJECTION DE GAINES DE PRECONTRAINTE (LABORATOIRE)

5.2.1 Paramètres étudiés

Les *profondeurs* entre lesquelles un défaut peut être détecté grâce à une réflexion sont recherchées. Comme pour l'essai concernant l'étendue minimale, il s'agit ici de définir clairement, en fonction des caractéristiques géométriques de l'élément testé et des défauts internes suspectés, la faisabilité des mesures et le cas échéant le type d'impacteur à utiliser. Les défauts consistent en des gaines de câble de précontrainte non-injectées. Les buts de cet essai sont donc les suivants :

- confirmer les données de la littérature concernant la profondeur minimale de détection ainsi que la profondeur à partir de laquelle un défaut de dimension donnée ne peut plus être décelé
- comparer les réponses des gaines injectées, partiellement injectées et non injectées

5.2.2 Description de l'élément testé

Il s'agit d'une dalle de 1.8 x 1.0 x 0.24 m légèrement armées avec 2 treillis de Ø6, 150/150 mm comportant 6 gaines de câble de précontrainte de 39/45 mm à 4 torons par gaine (0.5") (fig. 5.8 et 5.9). Chacune des 6 gaines se trouve à une profondeur différente allant de 2 cm (point haut de la gaine par rapport à la surface supérieure de la dalle) à 18 cm. À l'exception d'une gaine qui n'est que partiellement injectée, toutes les autres le sont sur une demi longueur. Ceci devrait permettre d'apprécier la différence entre le signal de réponse d'une gaine complètement injectée, partiellement injectée et non injectée. Les mesures sont effectuées à l'aide du boîtier impacteur muni d'une bille de 5 mm de diamètre.

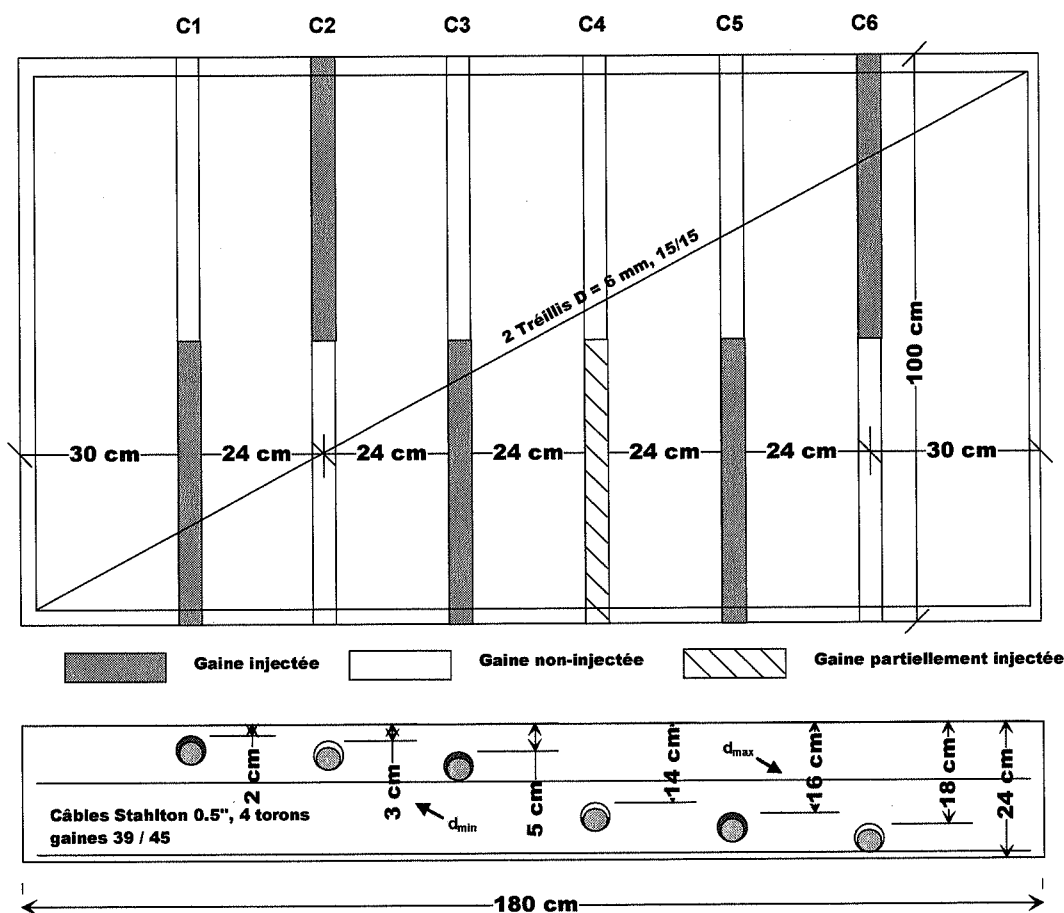


Figure 5.8 : Vue en plan et coupe de la dalle et des câbles de précontrainte

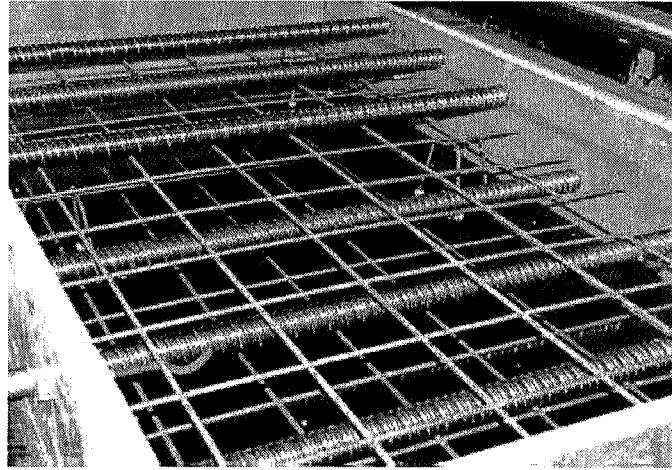


Figure 5.9 : Vue des gaines avant le bétonnage

Selon les caractéristiques de l'onde d'impulsion données au chap. 2.2 et les formules énoncées au chap. 4.2, les profondeurs critiques devraient être les suivantes:

$$d_{\min} = \beta v_p / 2f_{\text{imp}} = 0.96 \cdot 4000 / (2 \cdot 57000) = 34 \text{ mm} \quad \text{avec } v_p = 4000 \text{ m/s}$$

$$d_{\max} = 4 \cdot \ell = 4 \cdot 39 \text{ mm} = 156 \text{ mm}$$

5.2.3 Déroulement de l'essai

Seule la position en plan des gaines est connue de l'expérimentateur; leur profondeur ainsi que leur état d'injection ne lui sont pas communiqués (fig. 5.10).

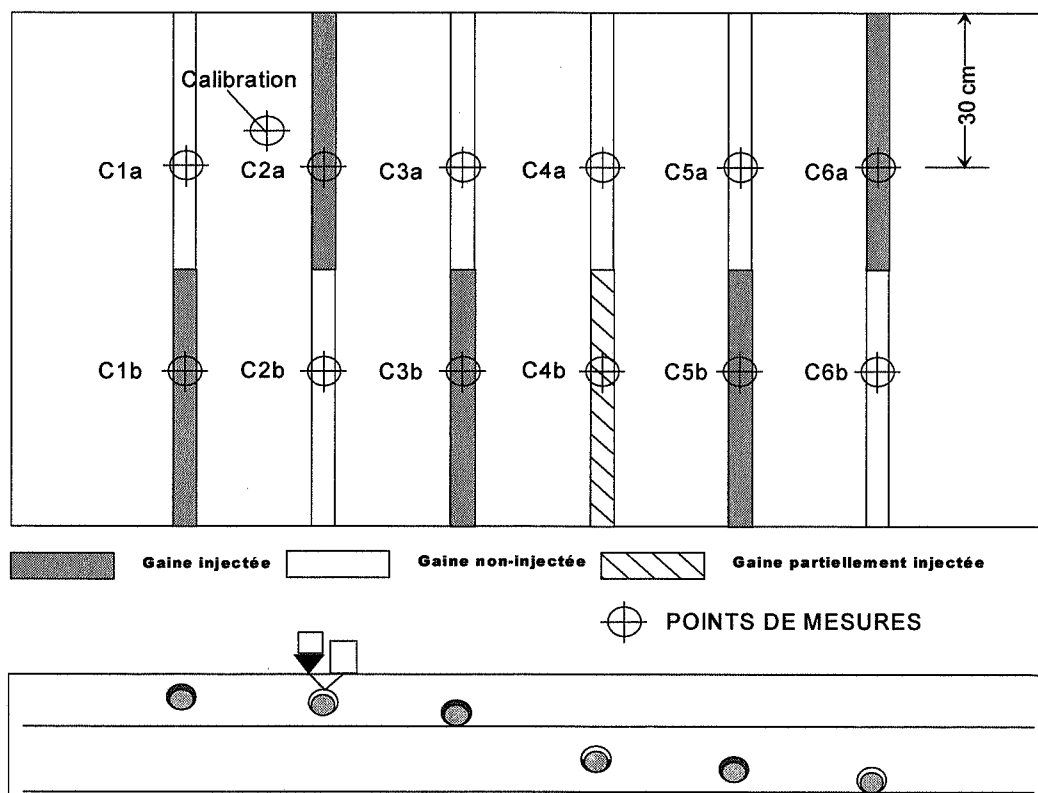


Figure 5.10 : Position des points de mesure

5.2.4 Résultats

Même si les signaux enregistrés ne sont pas toujours optimaux, il est possible d'interpréter correctement les résultats de cet essai.

Aucun pic de fréquence correspondant à une réflexion sur une gaine non injectée n'a pu être décelée sur les gaines 1, 2, 5 et 6. Ces quatre gaines sont placées en dehors des limites des profondeurs critiques pour une bille de 5 mm (voir chapitre 5.2.2). Les données de la littérature concernant les profondeurs minimales et maximales de détection d'un défaut en fonction du diamètre des impacteurs sont donc ici confirmée.

Le tableau 5.1 résume les résultats obtenus pour les gaines 3 et 4 testées avec un impacteur 5 mm.

position	fréquence épaisseur [kHz]	épaisseur [mm]	$f_{\text{treillis, sup}}$ [kHz]	$d_{\text{treillis, sup}}$ [mm]	f_{gaine} [kHz]	d_{gaine} [mm]	Autre réflexion [kHz]	Autre réflexion [kHz]	Autre réflexion [kHz]	Interprétation
C3a	8.3	241	10.74	93	46.9 à 48.3	46.3	-	-	-	Pas/mal injecté
C3b	8.8	228	-	-	Non	-	11.2	16.6	26.9	Injecté
C4a	8.3	241	10.74	93	15.6 à 17.1	136.2	21.4	-	-	Pas/mal injecté
C4b	8.3	241	-	-	15.6 à 17.1	136.2	-	-	-	Pas/mal injecté

Tableau 5.1 : Analyse des gaines C3a, C3b, C4a, C4b

On remarque que plusieurs pics sont apparus de manière répétitive, indépendamment de la position des mesures (tableau 5.2):

Fréquence observée [kHz]	Interface béton-air corresp. [mm]	Interface béton-acier corresp. [mm]	Commentaire
8.3	240	-	Epaisseur
10.7	187	94	Armature ?
16	125	63	Câble acier ?

Tableau 5.2 : Pics de fréquence répétitifs

La réflexion de 8.3 kHz correspond à l'épaisseur de la dalle.

Le pic de 10.7 kHz correspond vraisemblablement à une réflexion sur la nappe supérieure du treillis d'armature. La recherche de la position des barres au profomètre ainsi que les photos du coffrage prises avant le bétonnage ont confirmé que les points de mesure C_{1A} se trouvent effectivement au droit d'une des barres du treillis. Ceci contredit l'affirmation prétendant qu'une barre d'armature avec un rapport de diamètre ϕ sur profondeur t (ϕ/t) inférieur ou égal à 0.3 ne peut pas être décelée avec la méthode Impact-Echo [1]. En effet, la profondeur t du treillis est de 95 mm, le diamètre ϕ des barres est de 6 mm et le rapport ϕ/t est de $6/95 = 0.06$. Cependant, bien que cela semble très improbable, il ne faut pas absolument exclure que ce pic puisse correspondre à une fréquence parasite dont la cause n'a pas été identifiée.

Le pic de 16 kHz a été interprété comme étant une réflexion sur le vide des gaines mal ou pas injectées (mesures C4A et C4B). Cependant, ce pic est aussi visible lorsque la gaine est injectée (mesure C4B). Or par un hasard de construction du modèle, il s'agit dans ce cas d'une réflexion sur les brins d'acier du câble. En effet, la profondeur t du câble 3 est d'environ 60 mm (selon la position qu'il occupe dans la gaine) et la fréquence de profondeur correspondante $f_s = (0.96 \cdot 4000)/(4 \cdot 60) = 16$ kHz.

5.2.5 Conclusions

Globalement les résultats sont peu satisfaisants parce que l'on observe en effet une réponse-type complexe, comprenant une grande quantité de pics, souvent répétitifs (voir tableau 5.2), et qu'il est finalement difficile de se prononcer avec certitude sur l'état d'injection des gaines testées. Ceci peut avoir plusieurs explications :

Sur les 6 gaines coulées dans le béton, seules 2 sont théoriquement clairement décelables (profondeur 50 mm resp. 140 mm). Il apparaît donc logique qu'au droit des autres câbles aucune réponse claire ne soit mise en évidence.

Les profondeurs critiques de détection sont confirmées à savoir

$$d_{\min} = \lambda/2$$

$$d_{\max} = 3 \cdot \ell_{\text{défaut}}$$

On ne peut écarter l'effet de l'armature même si celle-ci est de faible diamètre. L'importance d'une reconnaissance préliminaire des zones à tester est une fois de plus soulignée.

Le diamètre des gaines est proche de la largeur critique déjà définie au chap. 4.3 pour des billes de 5 mm. De ce fait, il se peut que les caractéristiques de l'onde d'impulsion provoquée par la bille ne permettent que partiellement à cette dernière de se réfléchir sur les tronçons de gaine non injectés.

Le petit diamètre des gaines signifie également *un faible rayon de courbure de la surface de réflexion*, provoquant ainsi une forte dispersion des ondes de compression réfléchies.

L'absence de réflexion sur un vide dans la gaine accompagné d'une réflexion les brins d'acier du câble sont la preuve que la gaine testée est bien injectée.

Des mesures de contrôle régulières sur des parties saines d'ouvrage sont essentielles afin de s'assurer du bon fonctionnement de l'appareillage de mesure (contact accéléromètre-béton par exemple) et d'éviter ainsi toute erreur systématique dans les résultats.

5.3 CONTRÔLE D'INJECTION DE GAINES DE PRÉCONTRAINTÉ (LABORATOIRE)

L'expérience acquise antérieurement à cette étude sur différents chantiers en Suisse semble montrer que les meilleures réflexions sur les gaines de câble de précontrainte ne sont pas forcément obtenues lorsque les mesures sont faites juste à l'aplomb des câbles. Afin de contrôler cette hypothèse ainsi que de vérifier l'applicabilité de la méthode Impact-Echo au contrôle de l'injection des gaines de câbles de précontrainte en général, une deuxième série d'essai est entreprise sur le mur modèle qui avait servi en 1995 à un premier test de la méthode sur le chantier genevois du viaduc de la voie centrale [30]. Le diamètre des gaines étant de 80 mm, il est attendu de pouvoir clairement observer une réflexion des ondes de compression sur les tronçons de gaine non injectés. Enfin, les dimensions critiques sont encore vérifiées dans cet essai.

5.3.1 Description de l'élément testé

Il s'agit d'un modèle de mur de 3.0 x 2.0 x 0.2 m comportant 3 gaines horizontales ($\varnothing$ 80 mm) ainsi que 3 gaines verticales ($\varnothing$ 40 mm) (fig. 5.11). Seules les gaines horizontales sont testées ici. La gaine supérieure n'est pas injectée, la gaine médiane l'est partiellement alors que la troisième est complètement injectée.

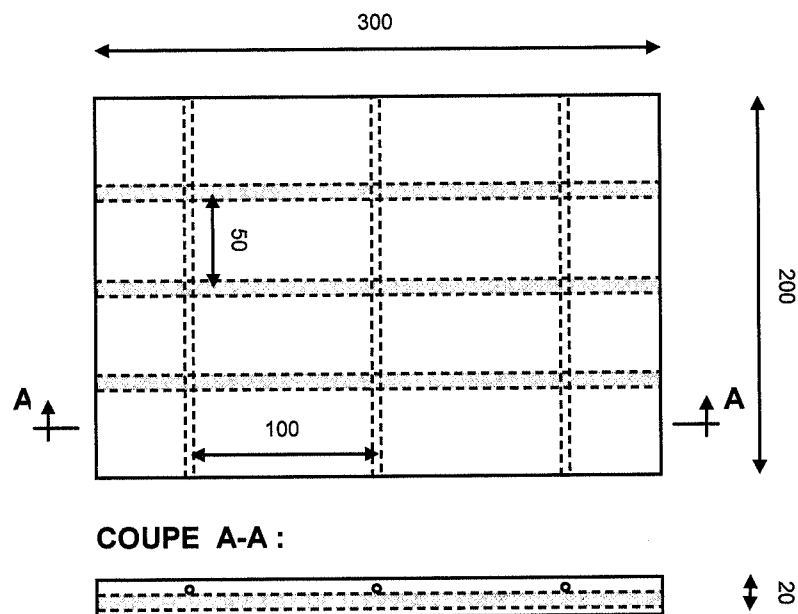


Figure 5.11 : Schéma du modèle, unités cm

5.3.2 Déroulement de l'essai

Des profils transversaux sur la gaine non injectée ont tout d'abord été effectués afin de déterminer la position optimale de l'ensemble „point d'impact - récepteur“ par rapport au câble. Ces profils ont comporté 9 ou 11 points de mesure espacés de 3 cm et répartis de part et d'autre de l'axe du câble.

Lorsque la meilleure position a été trouvée, 5 mesures ont été réalisées le long de chaque gaine avec une bille de 5 mm de diamètre (fig. 5.12).

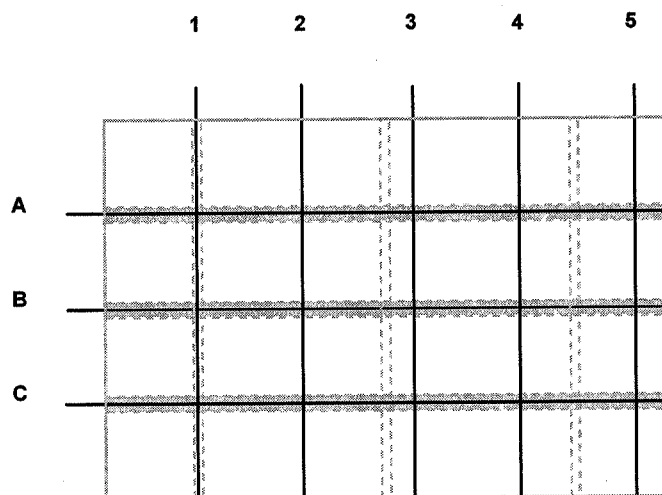


Figure 5.12 : Position des points de mesure

Le câble injecté a ensuite été testé avec des billes de 6.5 / 8.0 / 9.5 / 11.0 / 12.5 mm afin de juger l'influence de l'augmentation du diamètre de la bille sur le signal de réponse des torons.

Les relations régissant les différents paramètres pour les interfaces béton - barres métalliques (voir chap. 4.6) permettent de prévoir une réflexion sur les brins du câble et de calculer la fréquence de réflexion f_{toron} correspondante. En admettant un diamètre de câble de 60 mm et une profondeur de 65 mm, on a un coefficient géométrique de $\zeta \cong 1.0$. La fréquence de la réflexion attendue sur les torons du câble devrait être alors de $f_{\text{toron}} = 1.0 \cdot 4300 / 4 \cdot 65 = 16.5$ kHz.

5.3.3 Résultats

Les essais effectués pour déceler des gaines injectées et non injectées ont donné les résultats attendus.

Élément

- les gaines testées sont placées dans un élément dont la fréquence d'épaisseur est d'environ 10.7 kHz, en admettant une vitesse de propagation des ondes P de 4300 m/s

Gaine A (non injectée) (voir fig. 5.13)

- la fréquence d'épaisseur du mur obtenue à l'aplomb de la gaine A est d'environ 7.3 kHz. Ce décalage d'environ 3 kHz vers les basses fréquences de la pointe de fréquence d'épaisseur s'explique par une augmentation d'environ 75 mm du parcours de l'onde P qui contourne la gaine
- on observe une réflexion sur l'air dans la gaine à 25.4 kHz, soit à environ 85 mm de profondeur
- on ne constate pas de réflexion sur les torons du câble

Gaine B (partiellement injectée)

- les résultats sont identiques à ceux de la gaine A

Gaine C (injectée) (voir fig. 5.14)

- la fréquence d'épaisseur du mur obtenue à l'aplomb de la gaine C est d'environ 10.3 kHz, soit un décalage minime par rapport à la fréquence observée à un endroit sans câble
- on observe une nette réflexion sur les torons du câble vers 16.1 kHz, soit à 67 mm de profondeur

Il est à noter que les profondeurs calculées pour les réflexions sur du vide et sur les torons ne sont pas absolument identiques parce que qu'il s'agit de gaines différentes, que la position des câbles peut varier dans les gaines et que la position des points de mesure par rapport à l'axe des gaines n'est pas identique. Mais dans les deux cas, les réflexions sont parfaitement identifiables et l'ordre de grandeur des profondeurs est respecté.

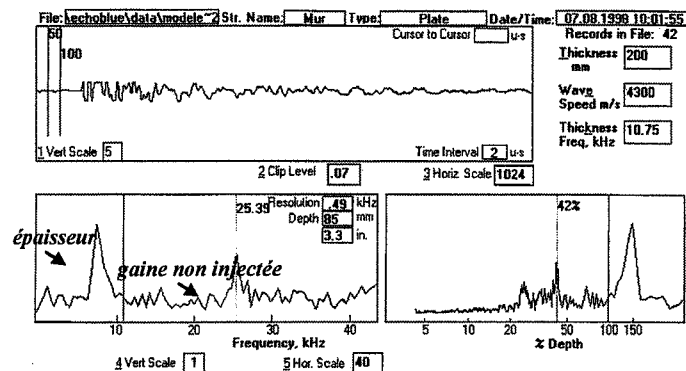


Figure 5.13 : Réponse d'une gaine non-injectée

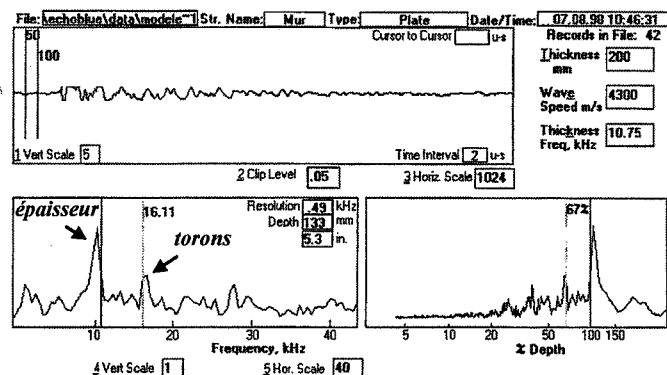


Figure 5.14 : Réponse d'une gaine injectée

Essais sur la gaine injectée avec les impacteurs de différents diamètres (voir fig. 5.15 et 5.16)

Les mesures effectuées sur la gaine injectée avec les différents impacteurs ont toutes donné des réflexions plutôt larges et de bonne amplitude correspondant au câble. Cependant, l'amplitude de la réflexion a diminué de manière significative avec la bille de 12.5 mm. Les résultats obtenus avec les différentes billes confirment donc que la limitation concernant l'étendue minimale détectable (ℓ_{crit}) d'un vide ne s'applique pas pour de l'acier.

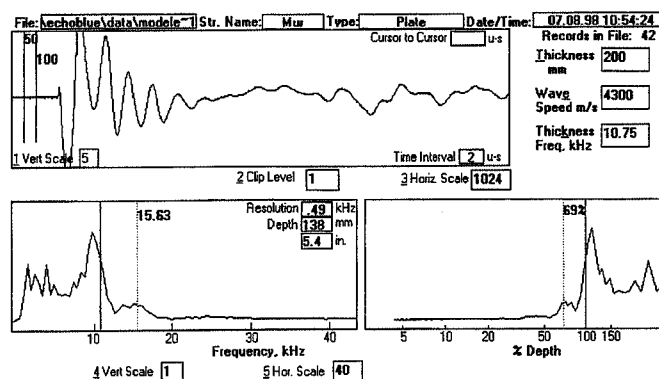


Figure 5.15 : Réponse d'une gaine correctement injectée, bille de 12.5 mm

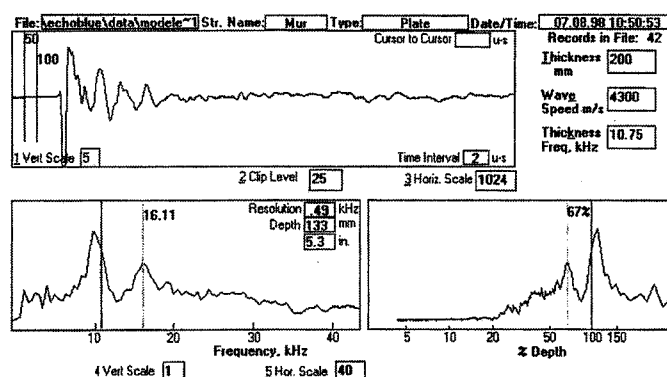


Figure 5.16 : Réponse d'une gaine correctement injectée, bille de 6.5 mm

Le tableau 5.3 donne un résumé des résultats obtenus avec les différents impacteurs sur les torons du câble ainsi que les largeurs critiques et les profondeurs minimales à partir desquelles des défauts peuvent être décelés avec ces mêmes impacteurs.

φ impacteur [mm]	largeur critique [mm]	Profondeur min [mm]	Remarque
5	70	35	bonne réflexion sur le câble à 16.1 kHz
6.5	91	46	bonne réflexion sur le câble à 16.1 kHz
8	112	56	bonne réflexion sur le câble à 16.1 kHz
9.5	133	67	bonne réflexion sur le câble à 16.1 kHz
11	154	77	bonne réflexion sur le câble à 16.1 kHz
12.5	175	88	réflexion de faible amplitude à 15.6 kHz

Tableau 5.3 : Largeurs critiques et profondeurs minimales de détection des défauts et résultats des essais sur les torons du câble avec différents impacteurs.

5.3.4 Conclusions

Les résultats obtenus avec cet essai sont concluants. Ils montrent ou confirment les points suivants:

- des mesures sont à effectuer régulièrement sur des petits profils transversaux par rapport à l'axe des câbles afin de trouver le meilleur emplacement pour les essais. En effet, les meilleures réflexions ne sont pas forcément obtenues juste à l'aplomb des gaines
- *les gaines non injectées peuvent être décelées par des réflexions sur du vide seulement si leurs caractéristiques sont compatibles avec les dimensions critiques dépendant de l'impacteur utilisé*
- *les gaines non injectées peuvent être décelées dans des éléments du type „plaque“ grâce à un décalage significatif vers les basses fréquence du pic d'épaisseur.* En principe, ces mesures peuvent être envisagées sans grand problème si une épaisseur peut être mesurée. Une dalle ou un mur sont en ce sens tout à fait appropriés.
- une réflexion sur le vide d'une gaine n'est pas toujours évidente à obtenir. C'est pourquoi, si la gaine se trouve au droit d'une surprofondeur matérialisée par un sommier ou une entretoise par exemple, la détection des vides sera nettement plus problématique.
- *cependant, lorsqu'une gaine est injectée, la réflexion sur les torons est une preuve de la bonne injection de la gaine.* Cette réflexion peut s'obtenir même avec des billes de gros diamètre, pour autant que le câble se situe à une profondeur suffisante (profondeur minimale de détection en fonction du diamètre de l'impacteur utilisé).
- la largeur critique à partir de laquelle *un défaut* peut être décelé ne s'applique pas pour un câble en acier ou une barre métallique. Seule, la profondeur minimale de détection reste valable.

5.4 CONTRÔLE D'INJECTION DE GAINES DE PRÉCONTRAINTÉ (IN SITU)

5.4.1 But de l'essai

Il s'agit ici d'appliquer la méthode Impact-Echo au contrôle de l'injection de gaines de câble de précontrainte sur un ouvrage réel. Un ouvrage existant se caractérise par sa forme, son degré de fissuration ou encore le type de revêtement ou d'enduit de surface. L'expérience montre que ces paramètres peuvent parfois influencer de façon négative le déroulement des essais Impact-Echo. Un ouvrages fissuré où l'on soupçonne des défauts d'injection a été choisi pour réaliser une série de tests et se rendre compte de l'influence réelle de ces paramètres.

5.4.2 Description de l'ouvrage testé

L'ouvrage est un passage supérieur sur la N1 situé à la hauteur de Birmenstorf (AG) (fig. 5.17).

Il s'agit d'un pont à béquille composé de 4 poutres caissons préfabriquées, elles-mêmes subdivisées en 4 tronçons dans les sens longitudinal. La continuité est assurée par un couple de câbles paraboliques disposés dans chacune des âmes (fig. 5.18). En raison de la très faible épaisseur des âmes des poutres, l'enrobage des gaines est très faible (3-5 cm) et de longues fissures longitudinales suivent le tracé des câbles (fig. 5.19).

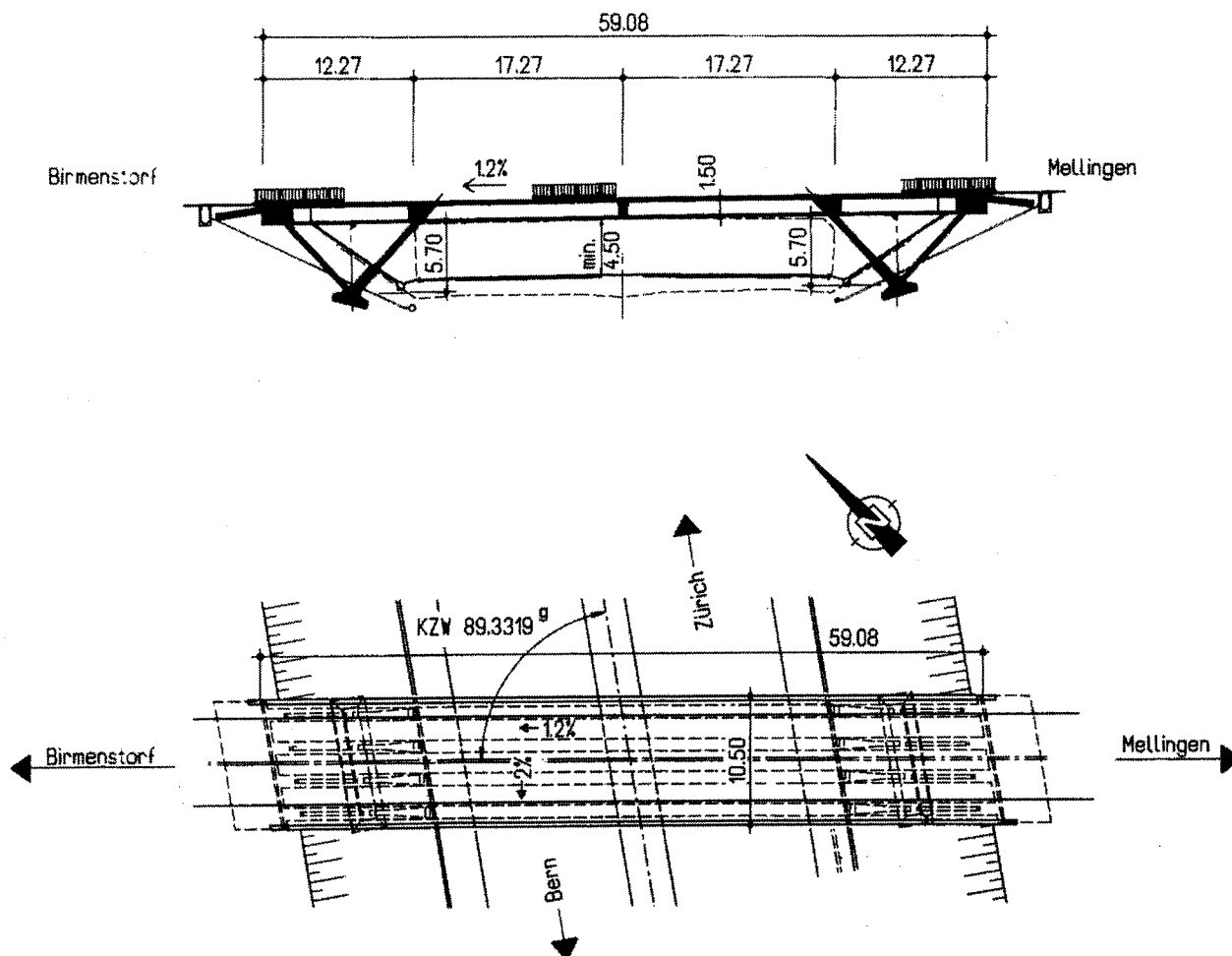


Figure 5.17 : Elévation et situation du passage supérieur de Birmenstorf

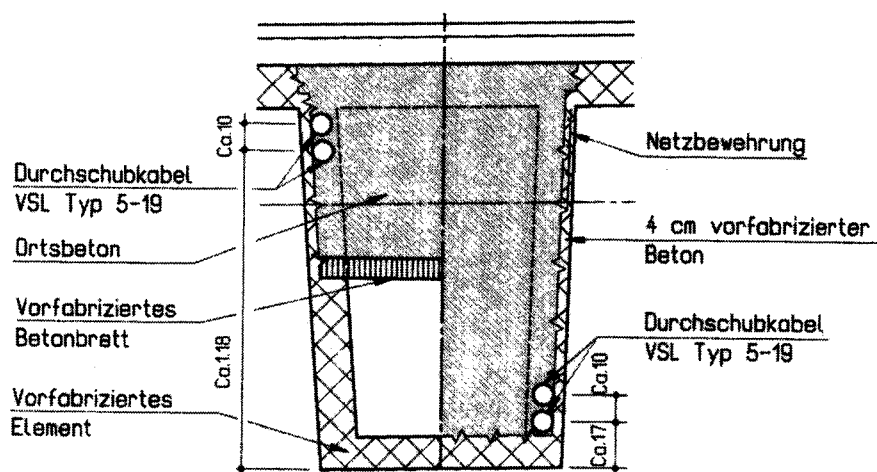


Figure 5.18 : Coupe d'une poutre préfabriquée au droit d'une béguille et en travée

5.4.3 Déroulement de l'essai

Les gaines sont testées sur une longueur de 2 m de part et d'autre des béquilles, du côté de Mellingen. Sur chacune d'elles, 6 points de mesure sont définis, ce qui fait au total 96 points de mesure pour l'ensemble des 16 câbles (fig. 5.19). Des billes de diamètre de 6.5 et 8 mm sont utilisées pour cet essai.

La faible profondeur des gaines et les nombreuses fissures sont autant d'éléments qui ont rendu l'exécution des mesures difficiles, voire impossibles par endroit. Il faut aussi noter que cet essai a été réalisé par grand froid, dans des conditions limites pour l'appareillage et particulièrement inconfortables pour les expérimentateurs.

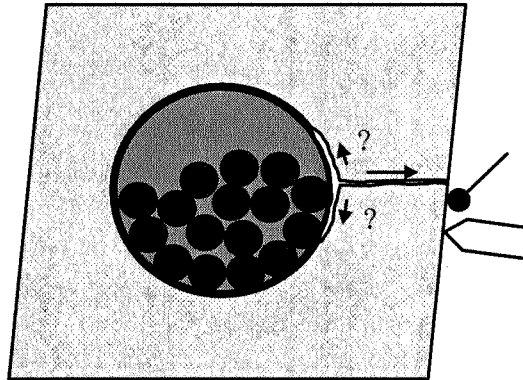


Figure 5.19 : Fissuration longitudinale le long du câble

5.4.4 Résultats

Une première interprétation des mesures ainsi que l'observation des fissures à proximité immédiate des emplacements testés sont présentées sur la fig. 5.20. Le niveau de fissuration est représenté à l'aide d'un ou deux astérisques.

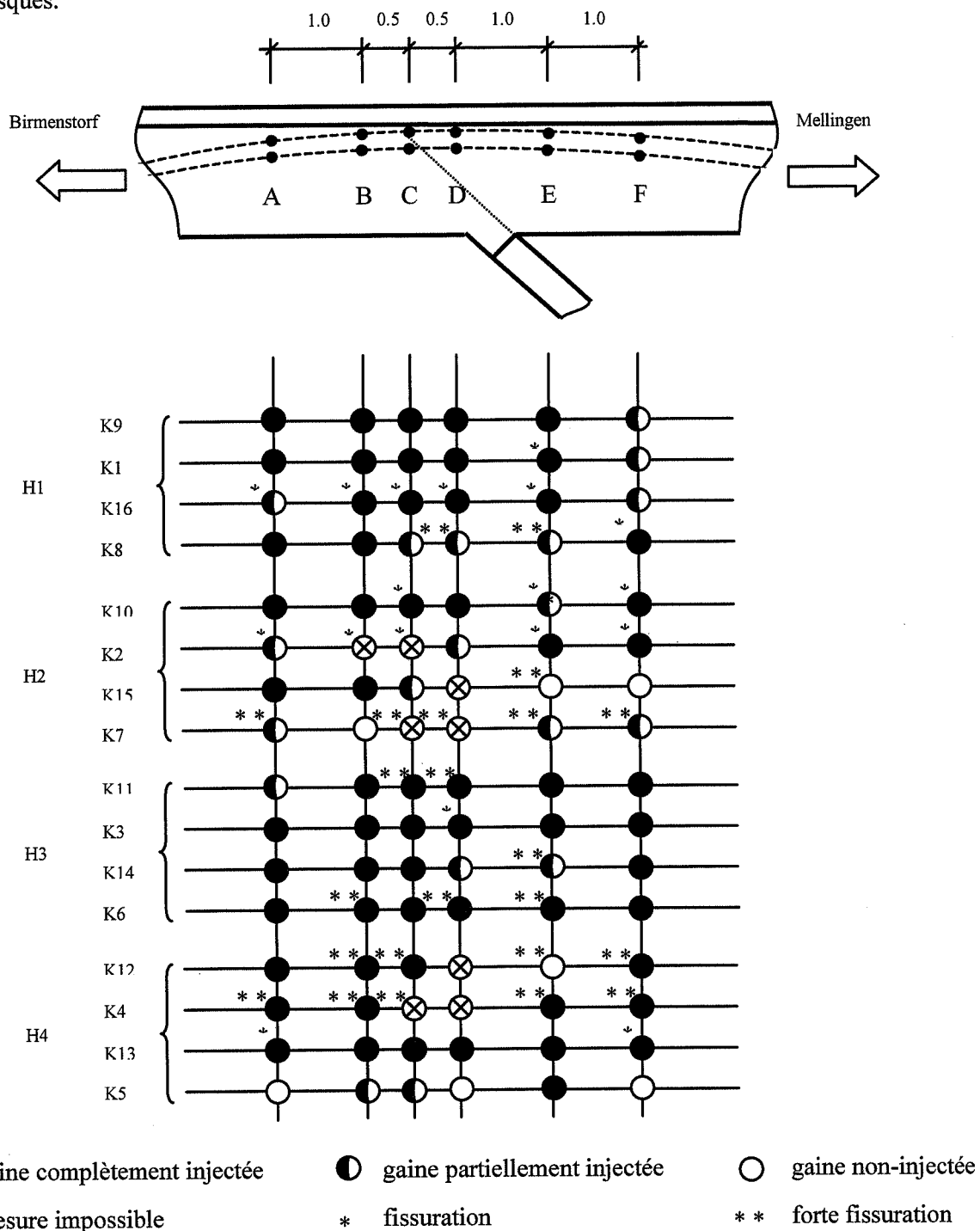


Figure 5.20 : Diagnostic Impact-Echo après la première interprétation

Il a ensuite été décidé de procéder à des sondages mécaniques au droit d'une vingtaine de points testés afin de vérifier les résultats Impact-Echo. Les gaines ont d'abord été inspectées superficiellement puis elles ont été ouvertes afin de contrôler leur niveau d'injection. Les résultats de ces sondages sont présentés sur la fig. 5.21.

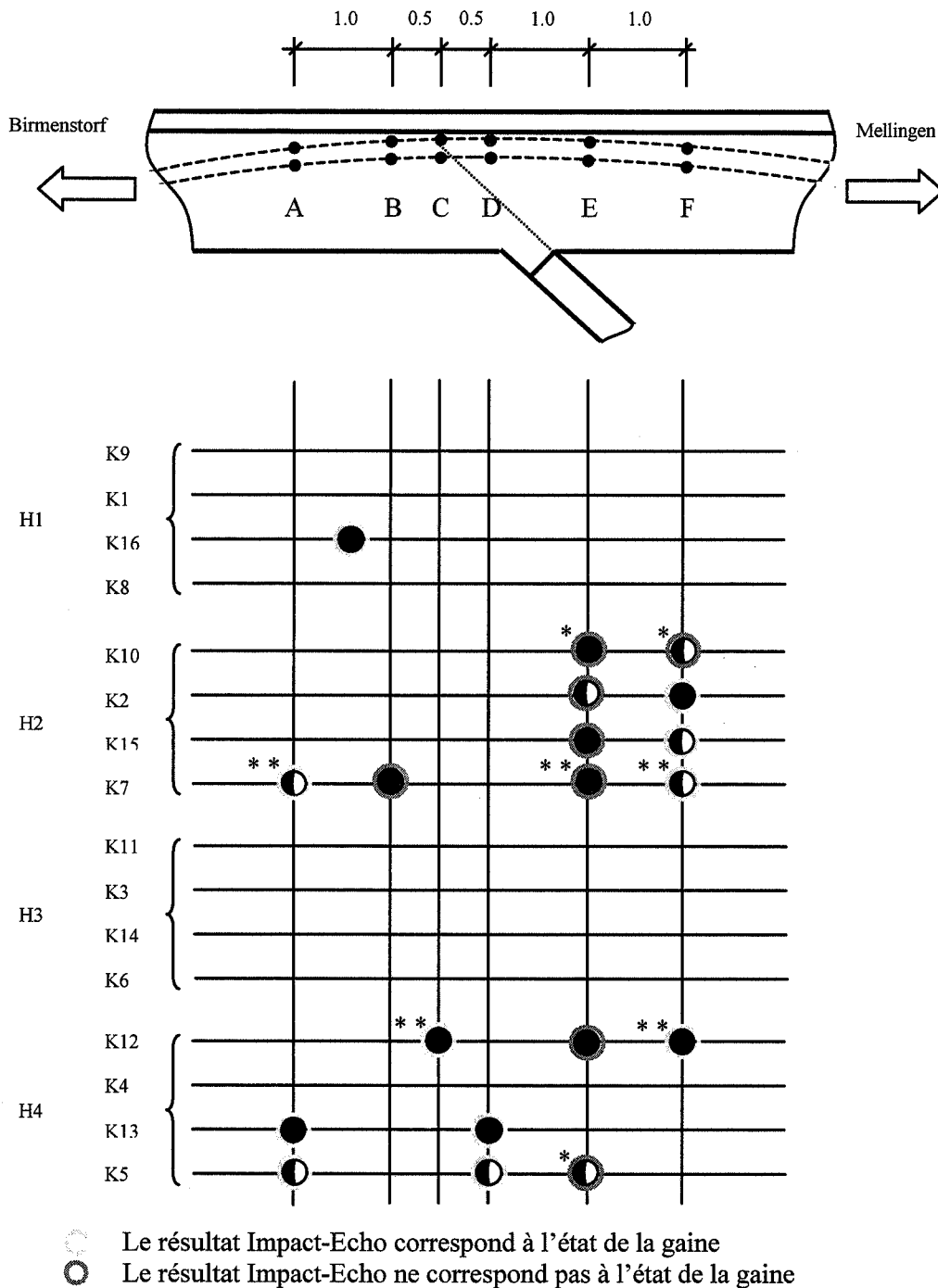


Figure 5.21 : Résultats des sondages

Une seconde interprétation „aveugle“ des mesures faites aux emplacements contrôlés par les sondages mécaniques a été effectuée ultérieurement. Les résultats de cette seconde interprétation sont identiques à ceux de la première interprétation sauf au point K12E où il correspond à l'état de l'injection observée dans le sondage mécanique. Il s'agit d'un emplacement particulièrement difficile à interpréter.

5.4.5 Conclusion

Avec un taux de corrélation de 58 % avec la première interprétation et de 63 % avec la seconde, les résultats de cet essai doivent être considérés comme insuffisants. En effet, avec un tel pourcentage, la fiabilité des résultats ne permet pas d'émettre un jugement définitif quant à l'état d'injection des gaines de précontrainte.

Lors de cet essai, il est clairement apparu que *l'état de fissuration de la zone testée influence considérablement les résultats*. Lorsqu'une fissure se trouve à proximité du point de mesure, le risque est grand que le spectre de fréquences contienne un pic principal correspondant à la profondeur de pénétration de la fissure et non à une réflexion sur la gaine recherchée. De même, lorsqu'une fissure contourne localement la gaine, créant ainsi une surface de séparation, l'onde de compression peut se réfléchir sur cette interface, ce qui laisse croire à une mauvaise injection.

Un léger décollement du coulis d'injection d'avec la gaine par suite de retrait, occasionne le même type de confusion, à savoir un pic de réflexion sur une interface « béton-air » à la même profondeur que celle de la gaine testée, alors que celle-ci est peut-être bien injectée.

Lors de cet essai, il est également apparu qu'un risque de confusion existe à cause du système de représentation du spectre de fréquence lié à l'appareillage. En effet, l'amplitude du spectre de fréquence est toujours calibré par rapport au pic de fréquence maximum. En d'autres termes, cela signifie que si aucune réflexion majeure n'est détectée par le récepteur, le spectre calculé est amplifié et laisse apparaître une grande quantité de pics qui ne sont en réalité que de petits pics souvent parasites dilatés verticalement.

Les conditions météorologiques défavorables par lesquelles les mesures ont été effectuées sont la cause d'un mauvais couplage entre le béton et le récepteur ainsi que du manque de concentration des expérimentateurs. Ces conditions météorologiques sont donc aussi en partie responsables de la mauvaise qualité des résultats obtenus.

5.5 DÉTECTION DE NIDS DE GRAVIER DANS UN MUR EN BÉTON (IN SITU)

5.5.1 Paramètres étudiés

Cet essai a pour but de rechercher des nids de gravier dans un mur en béton. Il a été effectué sous l'impulsion du Bureau des Routes Nationales du Canton de Soleure, désireux de pouvoir utiliser une méthode d'évaluation non-destructive du béton, et de l'appliquer en particulier au contrôle des parois de la tranchée couverte de la N5, actuellement en phase de construction à la hauteur de Lüsslingen (SO).

Un modèle grandeur nature a été réalisé sur le site afin de tester plusieurs qualités de béton et d'observer les conséquences de plusieurs types de mise en oeuvre. C'est sur deux murs de ce modèle que des mesures Impact-Echo ont été effectuées.

Rappelons que pour l'Impact-Echo, la présence de zones de vide de petite dimension provoque une entrave au déplacement de l'onde de compression. Il s'en suit d'une part un remplacement du pic de fréquence d'épaisseur f_c par plusieurs autres pics décalés vers les basses fréquences ainsi que de faibles réflexions sur les zones poreuses caractéristiques de ce type de défaut.

5.5.2 Description de l'élément testé

De nombreux nids de gravier ont été constatés lors du décoffrage des murs du modèle (fig. 5.22). Un relevé de ceux apparaissant en surface a été effectué puis la totalité des murs a été recouverte d'une couche d'environ 1 mm d'enduit minéral. Les parois frontales nord et sud d'environ 7 m de hauteur, 6.2 m de largeur et 0.7 m d'épaisseur ont ensuite été testées avec la méthode Impact-Echo (fig. 5.23).



Figure 5.22 : Lüsslingen, mur nord, vue des nids de gravier en surface avant reprofilage

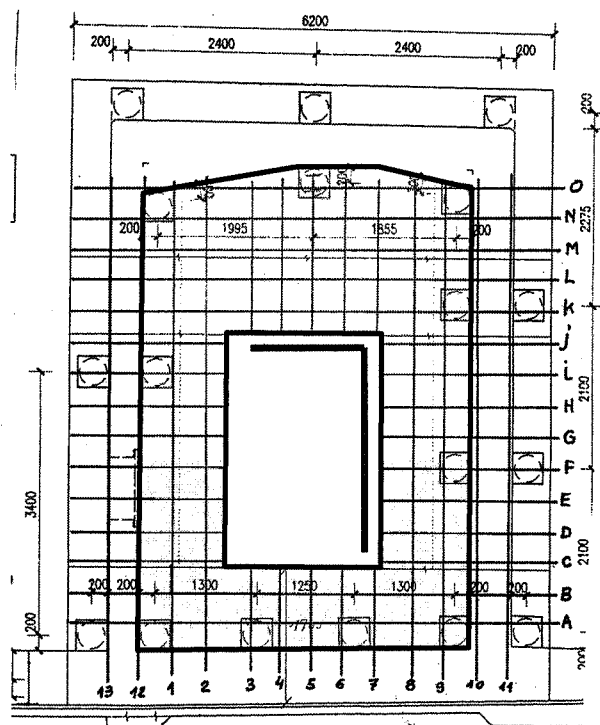
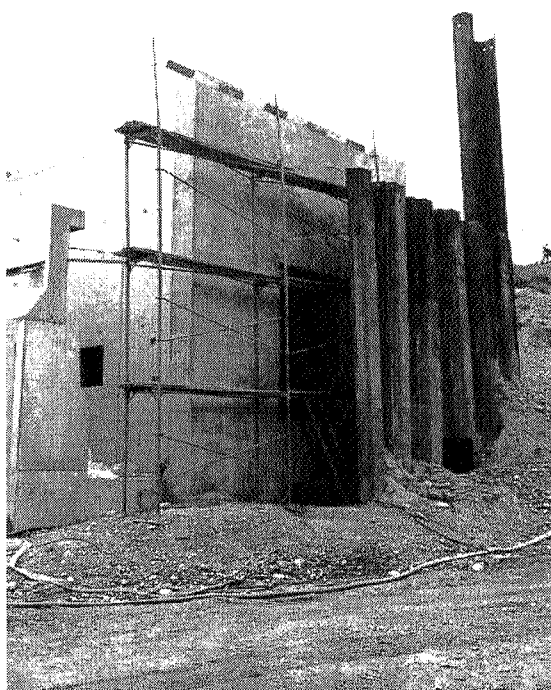


Figure 5.23 : Mur modèle testé et emplacement des points de mesure

5.5.3 Déroulement de l'essai

Les mesures ont été effectuées sur les deux faces de chacun des murs. Ces essais se sont déroulés durant 3 jours selon le programme suivant:

- relevé de la position des barres d'armature au Profomètre
- choix d'une grille définissant 135 points de mesure évitant autant que possible les barres d'armature. Les distances entre les points de mesures ont varié de 30 à 50 cm
- mesures Impact-Echo avec une bille de 25 mm de diamètre aux emplacements sélectionnés
- mesures Impact-Echo au droit des zones suspectes avec une bille de 15 mm de diamètre

5.5.4 Résultats

Les mesures effectuées sur les murs du modèle ont donné différents types de réponses qui ont été classés en quatre catégories d'après les critères suivants:

- résultats des mesures correspondants à des endroits sans défauts
- nombreux pics de grande amplitude entre 4 et 15 kHz dans le spectre des fréquences pouvant correspondre à des réflexions sur des vides
- diminution de la fréquence du pic d'épaisseur ou de son amplitude pouvant être causées par une augmentation du trajet de l'onde entre des vides pour atteindre la face opposée du mur et revenir en surface
- corrélation entre les résultats des mesures faites sur les faces internes et externes des murs

Il existe pour chaque type de réponse une probabilité plus ou moins grande de rencontrer un défaut au droit d'une mesure. Ces probabilités de défauts ont été classées en trois groupes:

- nid de gravier peu probable ou inexistant
- probabilité de nid de gravier moyenne
- probabilité de nid de gravier forte

Ce classement a permis d'établir une cartographie des murs. Elle montre les zones où il faut s'attendre à rencontrer des nids de gravier. (fig. 5.24b et 5.25b).

Une comparaison des résultats obtenus avec l'Impact-Echo et des observations faites au moment du décoffrage des murs par les responsables du chantier est également donnée sur les figures 5.24a et 5.25a.

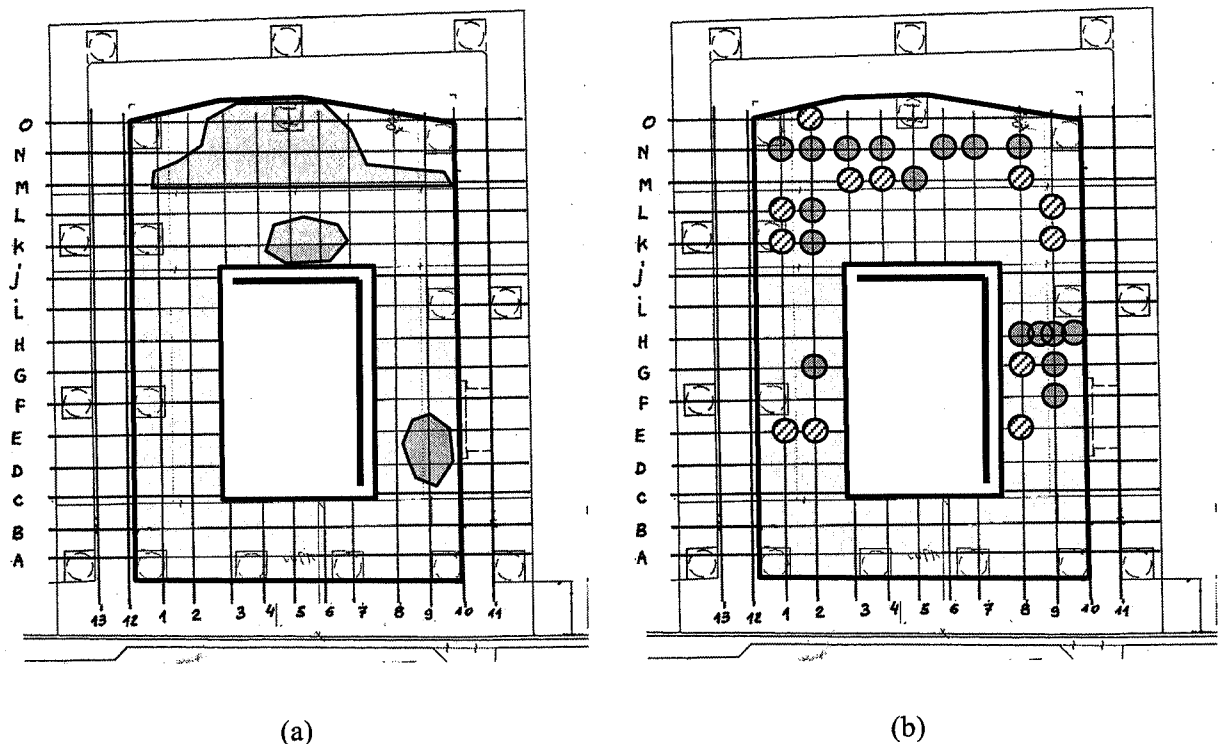


Figure 5.24 : Mur nord : Défauts constatés lors du décoffrage (a), défauts suspectés suite aux mesures IE (b)

Légende : ● = nids de gravier probables ⊗ = nids de gravier possibles

- il ne faut attendre aucune réflexion exploitable sur un nid de gravier à cause du caractère diffus et hétérogène de ce type de défaut. A sa place, on observe plusieurs autres pics correspondant à des réflexions sur des vides à différentes profondeurs
- un élément de grosse épaisseur implique l'utilisation d'un impacteur de gros diamètre, ce qui augmente la profondeur minimum critique ainsi que la dimension à partir de laquelle un défaut peut être décelé. Dans ce cas, il est recommandé d'effectuer une deuxième série de mesures avec un impacteur plus petit, de façon à déceler des petits défauts éventuels à une profondeur plus faible
- si l'élément testé a été reprofilé ou si un enduit lui a été appliqué, il faut s'attendre à un signal détérioré, parfois inexploitable

5.6 DÉTERMINATION DE LA PROFONDEUR DE PÉNÉTRATION DE FISSURES (LABORATOIRE)

5.6.1 Paramètres étudiés

Les fissures engendrent une pénétration accrue de l'air et de l'humidité vers le cœur d'un élément en béton. Il peut s'en suivre une carbonatation accélérée du béton, un risque de contamination par des sels agressifs (chlorures par exemple), ce qui peut provoquer, à terme, une corrosion de l'armature passive voire de la précontrainte si celle-ci n'est pas parfaitement injectée. Par ailleurs, en cas de fissures ouvertes traversantes et si l'on se trouve en présence d'eau, un écoulement peut se produire au travers de l'élément, ce qui n'est souvent pas acceptable.

La profondeur de pénétration des fissures apparaît dès lors comme une information nécessaire pour une bonne évaluation d'ouvrage. Cette valeur pourra être comparée avec les profondeurs connues des armatures ainsi qu'avec l'épaisseur totale de l'élément afin de pouvoir apprécier objectivement un risque de corrosion ou de percolation.

5.6.2 Description de l'élément testé

L'élément choisi pour cet essai est une poutre mixte en béton composée d'une épaisseur de vieux béton (15 cm) et d'un surbéton jeune (12 cm). Cet élément fait partie d'un lot de poutres fabriquées et testées par Bernard dans le cadre de sa thèse « Comportement à long terme de poutres formées de bétons d'âge différent » [9, rapport OFROU en préparation par Wolf]. La section de ces poutres est 50 x 27 cm. Elles ont été testées au préalable jusqu'à leur rupture en flexion, ce qui a provoqué de larges fissures, bien visibles en surface. Quatre fissures ont été choisies pour cet essai (fig. 5.26).

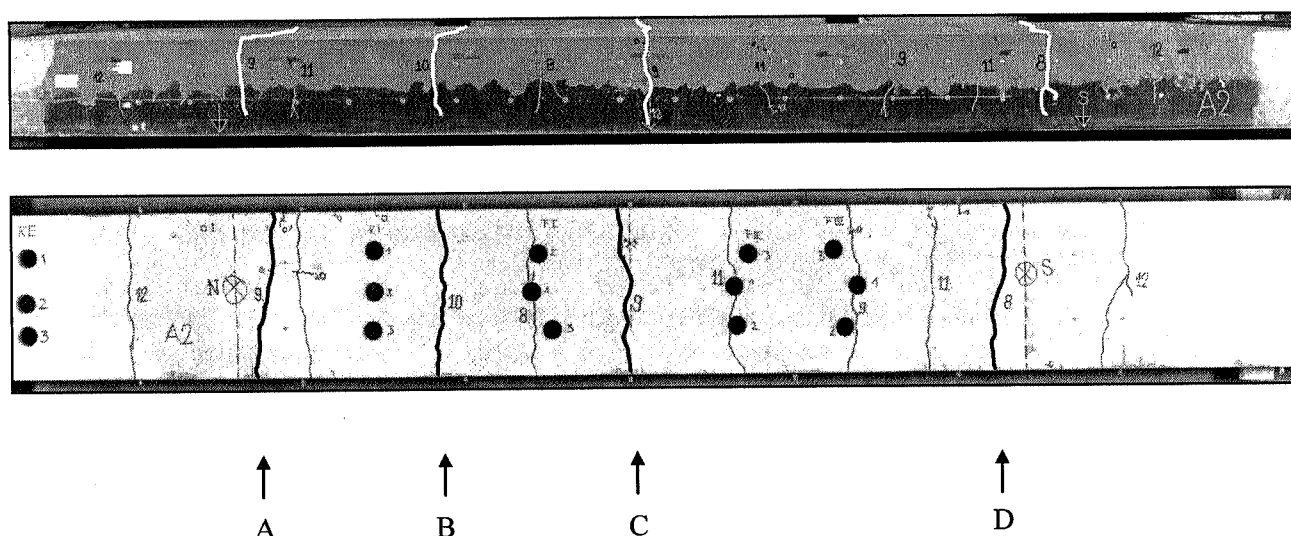


Figure 5.26 : Vue latérale et en plan de la poutre testée et des fissures choisies

5.6.3 Déroulement de l'essai

La profondeur de pénétration des 4 fissures testées a été mesurée avec l'Impact-Echo et l'ultrason, ce qui a permis de s'assurer immédiatement que l'ordre de grandeur des résultats obtenus était correct. Un carottage mécanique a été effectué par la suite au droit des 4 fissures et leur profondeur de pénétration a été observée à l'aide d'une loupe 40x.

5.6.4 Résultats

Les résultats de l'essai sont présentés dans le tableau 5.6. Les abréviations suivantes y sont utilisées :

$d_{mes,US}$: profondeur de pénétration mesurée par ultrason

$d_{moy,US}$: profondeur de pénétration moyenne mesurée par ultrason

$d_{mes,IE}$: profondeur de pénétration mesurée par Impact-Echo

$d_{moy,IE}$: profondeur de pénétration moyenne mesurée par Impact-Echo

d_{obs} : profondeur de pénétration observée sur carotte à la loupe

$d_{0.1, obs}$: profondeur observée à la loupe à partir de laquelle la fissure présente une ouverture inférieure à 0.1 mm

Fissure	Ultrason		Impact-Echo		Carotte		Comparaison IE - Carotte
	$d_{mes,US}$ [mm]	$d_{moy,US}$ [mm]	$d_{mes,IE}$ [mm]	$d_{moy,IE}$ [mm]	d_{obs} [mm]	$d_{0.1,obs}$ [mm]	$d_{moy,IE} - d_{0.1,obs}$ [mm]
A	85	90	90	90	195	-	-
	90		85				
			95				
B	100	95	100	100	155	80	20
	90		100				
			95				
C	85	90	95	85	170	100	15
	90		70				
			95				
D	105	110	105	105	190	90	15
	110		105				
			105				

Tableau 5.4 : Résultats des mesures de profondeur de pénétration des fissures

Les mesures faites avec l'Impact-Echo sont bien corroborées par les mesures faites avec ultrason. La précision est de l'ordre 5 mm, ce qui est jugé satisfaisant.

La différence entre les résultats obtenus avec l'Impact-Echo et l'observation effectuée à la loupe sur les carottes est de l'ordre de 20 mm. Il y a deux explications à cela:

- toute fissure fermée ou d'ouverture inférieure à 0.08 mm n'est pas visible avec l'Impact-Echo. La profondeur mesurée est donc la profondeur à partir de laquelle les fissures présentent une ouverture inférieure à environ 0.08 mm.
- la profondeur déterminée avec la loupe manque de précision à cause de l'hétérogénéité du matériau et de l'apparence irrégulière des fissures à la surface des carottes. L'erreur commise lors de la détermination de ces profondeurs (lorsque cette détermination était possible !) est aussi de l'ordre de +/- 20mm.

A défaut de pouvoir se prononcer clairement sur la précision de ces résultats, on constate en tout cas que l'ordre de grandeur est respecté.

5.6.5 Conclusions

De nombreuses recherches effectuées en laboratoire et sur des ouvrages existants ont montré que les problèmes de durabilité et en particulier les risques de corrosion des barres d'armature passive ne sont pas influencés de manière significative par une fissuration dont l'ouverture est inférieure à 0.3 mm [10].

Les essais réalisés avec l'Impact-Echo indiquent que la méthode est bien *adaptée pour mesurer la pénétration des fissures dont l'ouverture est supérieure à 0.1 mm*. Elle ne convient pas si l'ouverture des fissures est inférieure ou s'il s'agit de fissures fermées. On peut donc considérer que la profondeur des fissures mesurée avec l'Impact-Echo représente correctement la profondeur à partir de laquelle le risque de détérioration de la matrice et des armatures dû à l'humidité ou à des agents corrosifs peut être exclu.

6 CONCLUSIONS

La compilation des informations concernant l'Impact-Echo relevées dans la littérature, dans les études effectuées en Suisse indépendamment de ce projet ainsi que dans les essais réalisés dans le cadre du projet en laboratoire et sur des ouvrages existants conduit aux conclusions suivantes.

6.1 DIMENSIONS DES DÉFAUTS DÉCELABLES

Une fissure ou une délamination ne peuvent être décelées par l'Impact-Echo que si leur ouverture est égale ou supérieure à 0.1 mm.

Un vide ou une délamination ne peuvent être décelés que si leur plus petite dimension latérale est supérieure d'environ 25% de la longueur de l'onde de compression λ générée par l'impacteur. En outre, le défaut doit se trouver entre les limites de détection.

Les profondeurs limites de détection données dans la littérature ont été confirmées par nos essais:

- profondeur minimum de détection: $d_{min} = \lambda / 2$ [mm]
- profondeur maximum de détection: $d_{max} = 3 \cdot \ell$ [mm]

Un vide ou une délamination dont le rapport largeur sur profondeur (ℓ / d) est inférieur à 0.6 est uniquement détectable grâce à une diminution de la fréquence d'épaisseur, mais aucune réflexion sur le défaut lui-même ne peut être perçue. Toutefois, sa profondeur doit être supérieure à 0.6 fois sa largeur minimum ℓ .

6.2 TYPE DE RÉPONSE

La réponse typique obtenue avec les mesures Impact-Echo est la fréquence d'épaisseur. Elle se traduit par une pointe de forte amplitude dans le spectre des fréquences. C'est le résultat final après un traitement informatique adéquat des allers et retours d'une onde de compression entre les deux faces parallèles d'une structure (ou d'une interface dans la structure).

Si la structure contient un défaut de petite dimension, l'onde le contourne et le trajet parcouru entre les deux faces est plus long qu'en l'absence de défaut. Dans ce cas, la fréquence d'épaisseur mesurée avec l'Impact-Echo est plus basse.

Si le défaut est important et s'il est localisé entre les profondeurs limites de détection, on observe une pointe de plus haute fréquence qui correspond à la réflexion sur le défaut.

Si le défaut est situé à moins de 10 cm de profondeur, l'impact donné à la surface de la structure génère des fréquences flexionnelles. Ces fréquences sont souvent d'amplitude bien supérieure à celles des fréquences d'épaisseur sur un défaut. De ce fait, il est difficile d'observer simultanément un pic d'épaisseur et les pics flexionnels associés (courbes calibrées selon le pic d'amplitude maximum).

Lorsque aucune réponse dominante n'est perçue par l'appareil, le programme calibre l'axe vertical du diagramme du spectre de fréquence sur des petits pics parasites non significatifs. Le signal apparaît perturbé sans que l'élément testé ait le moindre défaut.

6.3 EFFET DE L'ARMATURE

Contrairement à ce qu'affirme la littérature, nos essais montrent qu'on ne peut pas écarter l'effet de l'armature, même si les barres sont de faible diamètre. Une reconnaissance des positions de l'armature dans les parties d'un ouvrage à tester avec l'Impact-Echo est recommandée.

6.4 DOMAINES D'UTILISATION

6.4.1 Mesures d'épaisseur

C'est une application directe du principe de l'Impact-Echo (aller et retour d'une onde de compression entre les deux faces parallèles d'un élément). L'épaisseur maximum mesurable est d'environ 1 mètre en l'état actuel de la technique.

6.4.2 Qualité d'interface

Il s'agit par exemple de la liaison entre une couche d'enrobés bitumineux placée sur du béton, ou d'une couche de nouveau béton sur du vieux béton ou encore du contact entre le rocher et un revêtement de béton. Il existe un film d'air à l'interface entre les deux matériaux si leur liaison est mauvaise. Celui-ci agit comme une fissure horizontale. Selon l'épaisseur plus ou moins importante du matériau de la couche supérieure, on observe soit sa fréquence d'épaisseur, soit un phénomène de flexion. Le film d'air n'existe pas lorsque la liaison entre les deux matériaux est bonne. Dans ce cas, on obtient un pic de fréquence d'épaisseur qui correspond à l'épaisseur des deux couches, ou bien pratiquement pas de réflexion dans le cas d'une bonne liaison béton-rocher.

6.4.3 Nids de gravier

La méthode Impact-Echo est utilisable pour la recherche des nids de gravier dans une structure en béton pour autant que sa surface soit propre et de qualité acceptable. Aucune réflexion claire n'est à attendre sur un nid de gravier étant donné le caractère diffus et hétérogène de ce type de défaut. En revanche, on observe une diminution de la fréquence d'épaisseur en raison de la perturbation du passage des ondes et éventuellement de faibles réflexions secondaires qui n'apparaissent pas systématiquement. Une bonne connaissance de l'épaisseur de l'élément testé est très utile, voire nécessaire.

6.4.4 Contrôle d'injection de gaines de câbles de précontrainte

Différents critères dépendants du genre de structure testée permettent de savoir si une gaine est bien injectée.

6.4.4.1 Structure avec 2 faces parallèles

Si la gaine est injectée, on observe la fréquence d'épaisseur de la plaque à l'aplomb du câble parce l'onde générée par l'impact peut normalement circuler dans l'ensemble béton-mortier-câble. Des réflexions sur les torons du câble peuvent aussi être visibles.

Si la gaine est mal injectée, la pointe de fréquence d'épaisseur est décalée vers les basses fréquences à l'aplomb du câble parce l'onde contourne la gaine. Une réflexion sur le vide dans la gaine peut aussi être décelée si sa profondeur et son diamètre sont compatibles avec les dimensions critiques pour lesquelles un défaut peut être mis en évidence. Enfin, un phénomène de flexion peut éventuellement se produire si la gaine est proche de la surface.

6.4.4.2 Structure dont les faces ne sont pas parallèles

Dans ce cas, il n'existe pas de pic de fréquence d'épaisseur.

Si la gaine est injectée, des réflexions sur les torons du câble sont la preuve d'une bonne injection.

Si la gaine est mal injectée, une réflexion sur le vide dans la gaine peut être décelée si sa profondeur et son diamètre sont compatibles avec les dimensions critiques pour lesquelles un défaut peut être mis en évidence. Un phénomène de flexion peut aussi être éventuellement observé si la gaine est proche de la surface.

6.4.4.3 Remarques

La fissuration de la zone testée influe considérablement la qualité des résultats obtenus et peut même rendre impossible toute mesure Impact-Echo.

Un léger décollement du coulis d'injection d'avec la gaine par suite de retrait occasionne le même type de confusion, à savoir un pic de réflexion sur une interface „béton-air“ à une profondeur correspondant à celle de la gaine testée, alors que celle-ci est peut-être bien injectée.

Le contrôle de l'injection des gaines de câble est moins difficile lorsque la forme géométrique de la structure est une plaque. Pourtant, même dans ce cas, il peut être problématique parce que le défaut à trouver possède seulement une petite dimension latérale et que des phénomènes perturbateurs (fissures) peuvent encore compliquer le problème. Cependant, un interpréteur expérimenté a de meilleures chances de reconnaître une gaine non injectée en différenciant un large pic, caractéristique de ce défaut, d'un pic plus étroit pouvant correspondre par exemple à une fissure ou à une délamination.

6.4.5 Profondeur de pénétration de fissures

La profondeur à partir de laquelle une fissure apparente en surface présente une ouverture inférieure à 0.1 mm peut être déterminée avec précision grâce à la méthode Impact-Echo.

Étant donné le caractère quantitatif et l'importance de la précision de cette mesure, il est très important de connaître parfaitement la vitesse de propagation des ondes de compression dans la structure testée. Une comparaison des résultats obtenus avec d'autres méthodes non destructives (ultrason par exemple) peut s'avérer intéressante.

6.4.6 Maçonnerie

Les murs en maçonnerie réagissent de façon similaire aux parois en béton puisque les briques ou les parpaings sont assemblés entre eux par des joints en mortier et qu'ils forment une unité. L'épaisseur de ces murs et le remplissage des briques et des parpaings peuvent donc être contrôlés avec l'Impact-Echo. Cependant, les joints de mortier ne sont pas toujours réguliers, ce qui crée des hétérogénéités dans la structure et peut provoquer des réflexions parasites de l'onde de compression. Ceci peut compliquer le spectre de fréquence et rendre l'interprétation parfois difficile.

7 ÉVALUATION ET DISCUSSION

7.1 ADÉQUATION DE LA MÉTHODE VIS-À-VIS DES PROBLÈMES PROPOSÉS

Lorsque la décision est prise d'entamer une campagne de mesure sur un ouvrage existant, et donc d'investir du temps et de l'argent, la fiabilité des résultats fournis par la méthode choisie doit être absolument garantie. C'est à cette condition seulement qu'une interprétation correcte et sûre pourra être effectuée par un spécialiste et qu'un diagnostic clair pourra être établi par l'ingénieur responsable.

De même, il est important de s'interroger avant chaque campagne de mesure sur les conséquences que peuvent avoir les résultats des mesures sur la structure en général et surtout sur ce que le maître d'ouvrage est effectivement disposé à entreprendre une fois les résultats des essais connus.

A la suite de notre expérience acquise lors des essais effectués dans le cadre de cette étude ainsi que grâce aux résultats rapportés d'autres essais effectués par Géotest, nous sommes en mesure de fournir une appréciation de l'efficacité de la méthode. Cette évaluation prend la forme du tableau 7.1 où les diverses utilisations possibles sont évaluées selon les critères de précision, de facilité d'interprétation et de fiabilité.

	Précision des mesures	Facilité d'interprétation	Fiabilité des résultats	Évaluation de l'adéquation
Mesures d'épaisseur	$\pm 5 \%$	<i>très bon</i>	<i>très bon</i>	<i>très bon</i>
Qualité d'interfaces	$\pm 10 \%$	<i>bon</i>	<i>moyen</i>	<i>bon</i>
Recherche de nid de gravier	$\pm 50 \%$	<i>mauvais</i>	<i>moyen</i>	<i>moyen</i>
Injection de gaines de câble de précontrainte	$\pm 50 \%$	<i>moyen</i>	<i>moyen</i>	<i>moyen à mauvais</i>
Profondeur des fissures	$\pm 20 \%$	<i>bon</i>	<i>très bon</i>	<i>bon</i>

Tableau 7.1 : Évaluation de la méthode Impact-Echo

En fonction du type de problème à résoudre, on constate que le recours à la méthode Impact-Echo n'est pas toujours adéquat. Nous sommes de l'avis qu'il est souvent difficile, sur un ouvrage réel, d'utiliser la méthode Impact-Echo et de fournir toujours des résultats optimaux, comme lors du contrôle d'injection de gaines de câble de précontrainte par exemple. En revanche, pour tout ce qui touche au contrôle de zones ou de défauts de dimensions supérieures aux dimensions limites résumées dans le tableau 7.2, le recours à la méthode s'avère souvent judicieux, pour autant qu'elle soit bien mise en œuvre par des spécialistes expérimentés.

Diamètre de la bille $\varnothing$ [mm]	Longueur d'onde λ [mm]	Profondeur minimale $d_{\min}$ [mm]	Profondeur maximale $d_{\max} = 3 \text{ fois la dimension latérale minimale du défaut, } \ell_{\text{défaut}}$
5	70	35	$d_{\max} = 3 \cdot \ell_{\text{défaut}}$
8	112	60	
11	154	75	
15	210	105	
25	350	175	

Tableau 7.2 : Domaine d'utilisation des impacteurs Impact-Echo

D'une manière générale, on a constaté que l'on obtenait rarement de bons résultats lorsque les défauts étaient de dimensions trop proches des valeurs limites, que ce soit au niveau de leur étendue, de leur épaisseur ou encore de leur position dans l'élément testé. Une campagne de mesures doit donc toujours être précédée d'une phase préparatoire soignée afin de s'assurer que l'utilisation de la méthode est effectivement possible (voir chapitre 8).

7.2 CONFORT D'UTILISATION

Un véhicule léger suffit au transport de l'appareillage Impact-Echo ainsi que du générateur nécessaire à son alimentation en électricité. Une fois sur les lieux des mesures deux expérimentateurs sont nécessaires. L'expérimentateur n° 1 prend en charge la mesure proprement dite, à savoir préparation de la surface testée (brossage et nettoyage), positionnement et armement de l'accéléromètre et finalement impact de la bille. L'expérimentateur n° 2 a pour mission de contrôler visuellement sur l'écran la qualité du signal et de valider les résultats jugés satisfaisants. L'accéléromètre étant relié à la station de mesure par une bobine de fil de grande longueur, il est ainsi possible d'être très mobile et d'atteindre des endroits exigus ou difficiles d'accès. Cependant, un éloignement trop important entre les deux expérimentateurs n'est pas souhaitable, car il rend difficile la communication nécessaire entre ces derniers durant les mesures.

Une fois l'appareil calibré (vitesse de propagation des ondes de compression déterminée), les essais peuvent se faire rapidement. L'efficacité des mesures dépend étroitement de l'expérience des expérimentateurs et de leur capacité à communiquer durant l'essai.

La tâche de l'expérimentateur 1 n'est pas évidente. En effet, être en mesure de produire systématiquement un signal de bonne qualité nécessite une bonne expérience et une certaine dose d'agilité. Le choix de la zone de contact ainsi que le soin porté à la préparation de la surface à tester sont des éléments essentiels à la réussite de la mesure. De plus, la manipulation simultanée de petites billes et de l'accéléromètre est loin d'être évidente et c'est pourquoi des mesures particulières doivent être prévues afin de lui garantir un confort maximum et de lui permettre de travailler dans les meilleures conditions possibles.

7.3 INFLUENCE DES PARAMÈTRES EXTÉRIEURS

- humidité : l'influence du taux d'humidité dans l'air n'a en soi pas d'influence. L'expérience a en revanche montré qu'une surface parfaitement sèche était nécessaire pour pouvoir effectuer des mesures correctes.
- température : aucune influence au-dessus de 0°. A des températures négatives en revanche, des problèmes peuvent apparaître au niveau de l'appareillage. De plus, l'habilité de l'expérimentateur chargé de produire les impacts et de mesurer les accélérations risque de diminuer.
- bruit : dans un environnement bruyant, la communication entre les deux expérimentateurs est altérée et l'efficacité du travail de mesure est diminuée
- vibrations : des vibrations occasionnées par des travaux effectués sur un ouvrage (marteau piqueur par ex.) rendent impossible toute mesure Impact-Echo sur ce dernier

D'une manière générale, les paramètres extérieurs évoqués ci-dessus ont une influence plus marquée sur les personnes chargées d'effectuer les mesures que sur les mesures proprement dites. Les facteurs humains ne sont donc pas à négliger et on veillera en particulier à ne pas entreprendre une campagne d'essais dans des conditions météorologiques défavorables.

7.4 CONCLUSIONS PRINCIPALES D'AUTRES UTILISATEURS/CHERCHEURS

La méthode Impact-Echo a été étudiée jusqu'à présent pour les applications suivantes :

- déterminer l'épaisseur de béton
- localiser des vides ou des discontinuités dans le béton (fissures, nids de gravier, délamination)
- contrôler l'injection des gaines de câbles de précontrainte

Les études effectuées en Europe et aux États-Unis [2, 4, 7, 12, 13, 14] ont démontré que cette technique donne souvent de bons résultats, mais pas toujours concluants, spécialement en présence d'éléments à géométrie complexe (ponts à caisson, multiples câbles de précontrainte, structures renforcées) ou dans le cas de faibles épaisseurs pour lesquelles les réflecteurs sont proches les uns des autres.

L'Impact-Echo est utilisé avec succès pour identifier et quantifier des problèmes suspects dans des structures, mais également lors de programmes de maintenance (évaluation d'un tablier de pont en vue de détecter une délamination), dans des applications de contrôle de qualité (mesures d'épaisseurs d'enrobés).

Plusieurs exemples de cas étudiés peuvent être cités [15]:

- mesures de fissures dans un tablier de pont ferroviaire renforcé avec du béton (Danemark)
- test de l'intégrité des murs d'un tunnel de métro (Los Angeles)
- mesure de l'épaisseur d'un tronçon de chaussée d'autoroute (Arizona)
- localisation de vides dans des gaines de câbles de précontrainte injectées d'un pont autoroutier (nord-est des États-Unis)
- identification de poutres abîmées d'un mur en béton armé immergé (Los Angeles)
- localisation de nids de gravier sur un tronçon routier en béton armé (Dakota du sud)
- identification d'une délamination de l'asphalte sur un tablier de pont en béton armé (État de New York)
- localisation de fissures dans des poutres et des colonnes d'un parking (État de New York)
- localisation de moellons manquants derrière un mur en maçonnerie (Ville de New York)

Ces différents cas amènent aux remarques suivantes :

- l'Impact-Echo est très efficace pour mesurer l'épaisseur d'un élément
- il n'a pas été possible de déterminer la position des câbles de précontrainte lorsque leur diamètre était inférieur à leur profondeur
- les défauts (nids de gravier, fissures,...) sont décelés, mais sans détermination de leur profondeur exacte
- les mesures sont ponctuelles et les analyses ne peuvent se faire in-situ, ce qui demande du temps pour le dépouillement et l'interprétation est parfois difficile
- la méthode demande de l'expérience de la part de l'utilisateur
- les mesures sont rapides et leur reproduction est possible
- la position des défauts n'est pas déterminée avec exactitude, ce qui peut causer des problèmes avec les armatures
- l'analyse de la position des câbles de précontrainte est difficile et longue. Il est de plus très délicat de déterminer l'état d'injection des gaines

8 RECOMMANDATIONS

8.1 CHOIX DE LA MÉTHODE

Comme déjà mentionné dans les chapitres précédents, la méthode Impact-Echo ne peut s'appliquer que sous certaines conditions. L'ouvrage doit être d'une part bien accessible et présenter une géométrie simple et régulière aux endroits devant être testés; les éléments minces ($h < 50$ cm) se prêtent par exemple particulièrement bien à ce type de mesures, étant donné que la mesure de l'épaisseur fournit déjà à elle seule une information importante sur l'état interne de l'élément.

- cas bien adaptés à la méthode Impact-Echo : *mesures d'épaisseur ; qualité d'interfaces ; profondeur des fissures ; maçonnerie*
- cas difficiles pour la méthode Impact-Echo : *recherche de nid de gravier ; injection de gaines de câble de précontrainte*

Le cas particulier du contrôle de gaines de câbles de précontrainte sans possibilité de mesurer l'épaisseur de l'élément dans lequel il se trouve est à éviter, car l'issue de telles mesures peut être incertaine.

8.2 PRÉPARATION DES MESURES

Quel que soit le type d'essai à effectuer par Impact-Echo, nous répétons ici que la phase préparatoire précédant la phase de mesure proprement dite est à traiter avec le plus grand soin. Outre le fait que cette préparation permet de s'assurer que la géométrie de l'ouvrage et que les défauts attendus sont bien compatibles avec les performances de l'appareil, cette phase a également pour but de définir clairement les objectifs recherchés par le maître de l'ouvrage.

Une bonne préparation permet de prédire les divers résultats possibles auxquels il faut s'attendre, ce qui améliore l'efficacité au moment des essais, lors du dépouillement des mesures, ainsi que lors de l'interprétation des résultats.

La règle à suivre lorsque l'on désire avoir recours à la méthode Impact-Echo peut donc s'énoncer de la façon suivante :

*« Il faut toujours savoir ce que l'on cherche,
afin d'éviter de devoir chercher à savoir ce que l'on a trouvé... »*

8.3 EXÉCUTION DES MESURES

Les mesures doivent toujours être effectuées par deux expérimentateurs, à moins que la zone à tester soit petite (max. 30 m^2) et que surtout la station de mesure puisse être installée à proximité immédiate (max. 5 m).

Une fois sur les lieux, 2 heures au minimum sont à prévoir pour installer le matériel, préparer la zone à tester et calibrer l'appareillage.

L'expérimentateur chargé d'effectuer les mesures sur l'ouvrage doit faire preuve d'agilité et être entraîné à la manipulation des billes et de l'accéléromètre sans quoi, les résultats enregistrés par l'ordinateur ont toutes les chances d'être inutilisables. Pour la même raison, on veillera tout particulièrement à ne pas effectuer des mesures par grand froid ou dans de mauvaises conditions météorologiques.

Si l'ouvrage sur lequel doivent se faire les mesures se trouve en situation très bruyante (au bord ou sur une autoroute par exemple) des moyens de communication entre les expérimentateurs, faisant également office de protection contre le bruit, sont à prévoir (casques). Sinon, les résultats risquent d'être compromis par une mauvaise compréhension entre les expérimentateurs et par l'énervement et la précipitation qui peuvent en découler.

Suite à l'impact de la bille sur la surface de l'élément à tester, le signal produit par l'accéléromètre est donné par la station de mesure sous la forme d'une courbe de déplacement et d'un spectre de fréquences. Cette courbe de déplacement doit absolument être validée par l'expérimentateur n° 2 car c'est véritablement elle qui détermine la qualité du signal reçu et donc la cohérence des fréquences calculées. Parmi les facteurs pouvant influencer négativement sur la qualité de ce signal, mentionnons par exemple une mauvaise qualité du matériau de surface (saleté, lait de ciment, enduit) ainsi qu'une manipulation imprécise de l'impacteur ou de l'accéléromètre (perte de contact entre l'élément et l'accéléromètre par exemple).

Chaque mesure, en plus d'être stockée dans l'ordinateur, sera répertoriée sur papier et complétée si nécessaire par des annotations ou des remarques décrivant d'éventuelles conditions particulières (présence d'une fissure, mauvaise qualité de surface, etc.)

8.4 DÉPOUILLEMENT DES RÉSULTATS

Le dépouillement doit se faire le plus rapidement possible afin d'avoir encore en mémoire toutes les particularités des mesures effectuées.

A la condition que le signal à analyser soit de bonne qualité (courbe des déplacements), il peut être retravaillé en mode édition pour séparer les fréquences parasites des fréquences utiles, supprimer le bruit et faire ressortir les pics correspondant aux défauts recherchés. Ce travail fastidieux est d'autant plus nécessaire si le spectre des fréquences brut est complexe ou de piètre qualité. L'importance du contrôle de la qualité des signaux au moment des mesures est pour cette raison d'une grande importance.

Une fois la fréquence d'épaisseur repérée, on recherche les pics des fréquences secondaires correspondant aux défauts probables sur la base desquels l'interprétation et le diagnostic peuvent finalement se faire.

8.5 INTERPRÉTATION ET DIAGNOSTIC

Par l'observation des pics de fréquences obtenus, et connaissant la vitesse de propagation de l'onde dans le matériau testé, il est possible de calculer l'épaisseur de l'élément et la profondeur exacte des défauts recherchés. Plusieurs cas de figure peuvent se présenter:

1. Le spectre des fréquences est clair et ne présente qu'un pic principal correspondant à la fréquence d'épaisseur de l'élément. Dans ce cas, la zone testée est saine ou ne comporte que de petits défauts situés en dehors des dimensions limites de détection (fig. 8.1).

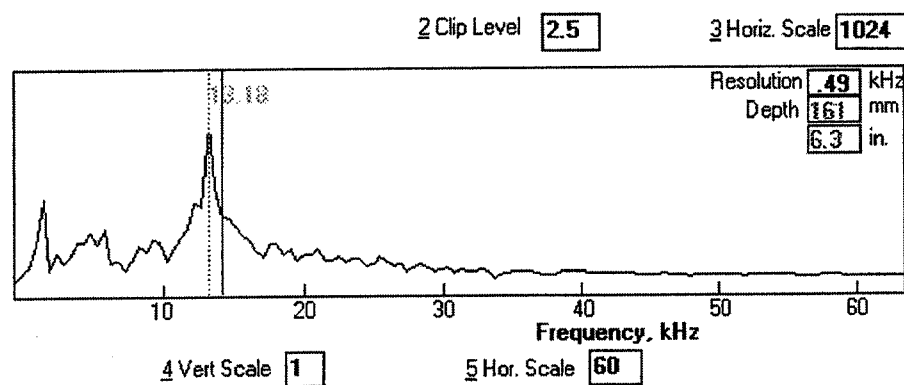


Figure 8.1 : Élément sain, fréquence d'épaisseur bien visible

2. Le spectre des fréquences est clair et présente au maximum 3 pics. Ceux-ci sont nets et cohérents avec la structure testée. L'observation du pic d'épaisseur renseigne sur l'intégrité du matériau (présence de vides internes) et les positions des pics secondaires permettent de déterminer la profondeur des éventuelles discontinuités (fig. 8.2).

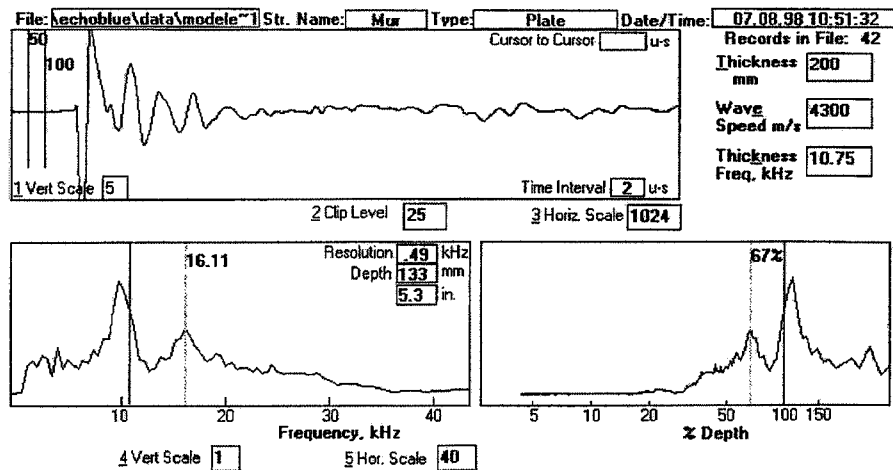


Figure 8.2 : Discontinuité clairement visible à 133 mm sous la surface

3. Le spectre des fréquences contient plusieurs pics de grande amplitude situés en deçà de la valeur théorique de la fréquence d'épaisseur. On se trouve ici vraisemblablement en présence d'une délamination de taille supérieure à 100 cm². L'épaisseur totale n'est plus visible et l'on observe les fréquences de vibrations de la zone délaminée (fig. 8.3).

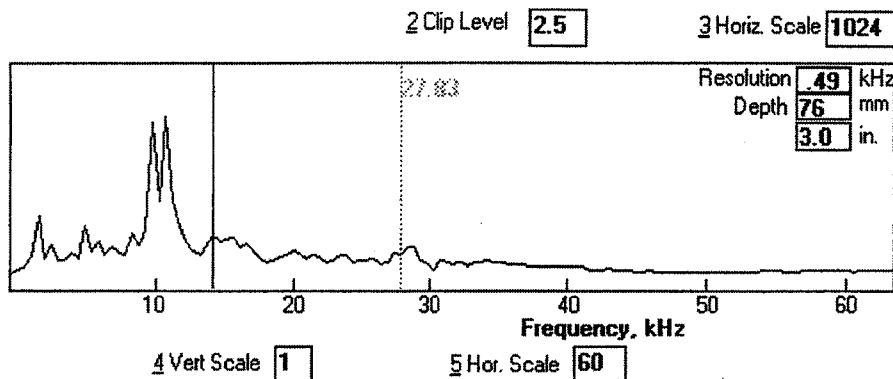


Figure 8.3 : fréquences flexionnelles d'une zone délaminée

4. Le spectre des fréquences contient en plus de la pointe d'épaisseur qui est décalée vers les basses fréquences plusieurs autres pics assez larges de plus faible amplitude. On se trouve ici en présence d'un nid de gravier de géométrie mal définie. La vitesse de l'onde est ralentie dans le défaut, ce qui explique la pointe d'épaisseur décalée. Les pics multiples sont des réflexions secondaires sur différents vides.

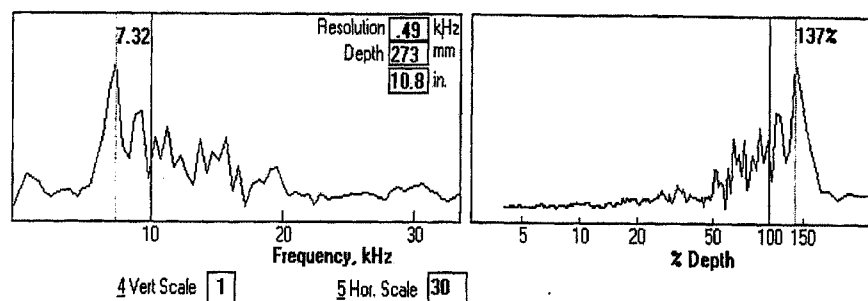


Figure 8.4 : Spectre de fréquences obtenu sur un nid de gravier

5. Le spectre des fréquences n'est pas clair et présente une « forêt » de pics de grande taille sans qu'il soit possible de déduire quelque chose d'objectif et de cohérent. Il est dans ce cas probable qu'aucune fréquence dominante n'ait été calculée et que le résultat obtenu soit dû à une amplification des signaux parasites. (pics de fréquence normalisés) (fig. 8.5).

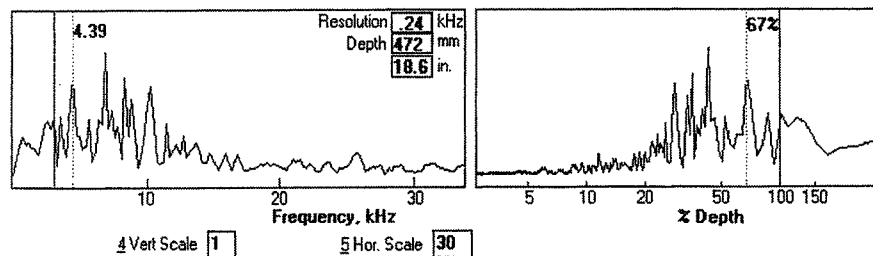


Figure 8.5 : Pics de fréquence non-identifiables

8.6 RECHERCHES FUTURES

Les recherches menées depuis plus de 15 ans sur la méthode Impact-Echo ont abouti aujourd'hui à un produit performant, basé sur un concept simple mais efficace (la propagation et la réflexion périodique d'ondes de compression dans un matériau). Néanmoins, d'importants progrès restent à faire au niveau de l'applicabilité de la méthode et de l'exploitabilité de ses résultats. Les buts à poursuivre à l'avenir sont d'une part l'augmentation de la fiabilité de la méthode et de la convivialité des mesures et d'autre part une amélioration de l'expérience d'utilisation de la méthode par tous les acteurs de la construction concernés par la maintenance des ouvrages (maître d'ouvrage, ingénieurs, spécialistes).

Les recherches futures devraient probablement être tournées vers les aspects pratiques de la méthode, en vue d'une amélioration des appareillages de mesure. Ceci passe vraisemblablement par une automatisation accrue du système impacteur-accéléromètre, ainsi que par le développement du programme de traitement et d'analyse des données, permettant une meilleure lisibilité des résultats. L'automatisation des mesures permettrait par exemple d'augmenter le nombre de relevés par zone et de s'affranchir des risques liés à des mauvaises manipulations de l'impacteur et du récepteur. Cet accroissement du nombre de mesures et de résultats devrait pouvoir être géré par un programme informatique amélioré, à même de filtrer les signaux parasites, de mettre en évidence les réponses répétitives et de faire ressortir de manière systématique des spectres de fréquences clairs et parfaitement représentatifs des zones testées. Si l'interface graphique est jugée bonne aujourd'hui, c'est surtout au niveau du module de calcul que ces améliorations devraient être apportées.

Parallèlement, il importe d'étendre l'utilisation de la méthode Impact-Echo en Suisse afin d'accroître l'expérience des spécialistes et d'encourager son utilisation auprès des ingénieurs et des maîtres d'ouvrage. Les connaissances par ceux qui ont utilisé cette méthode d'auscultation non-destructive jusqu'à aujourd'hui devraient être communiquées sous la forme de conseils et d'aide à la compréhension auprès de nouveaux utilisateurs. Ce rapport constitue en ce sens un premier pas et nous espérons qu'il pourra susciter chez le lecteur la volonté et l'assurance nécessaire à une application régulière de la méthode Impact-Echo lors de l'évaluation et de la maintenance de structures existantes.

9 RÉFÉRENCES

- [1] M. SANSALONE, W. B. STREET, *Impact-Echo, non-destructive evaluation of concrete and masonry*, Cornell University, 1997
- [2] J. MARTIN, M. S. A. HARDY, A. S. USMANI, M. C. FORDE, *Impact-Echo Assessment of post-tensioned concrete bridge beams*, 1997
- [3] <http://www.impact-echo.com/>
- [4] J. MARTIN, *Non-destructive Testing of metal ducted Post-tensioned bridge Beams using sonic Impact-Echo techniques*, Edinburgh, 1997
- [5] R. GRIEVE, *Evaluating concrete structures using the Impact-Echo technique*, Tekron services Inc., 1993
- [6] J. & H. KRAUTHAMER, *Ultrasonic testing of materials*, New York, 1969
- [7] C. U. GROSSE, H. W. REINHARDT, *The resonance method-application of a new non-destructive technique which enables thickness measurements at remote concrete parts*, 1996
- [8] N. J. CARINO, M. SANSALONE, *Detection of voids in grouted ducts using the Impact-Echo method*, Cornell 1992
- [9] O. BERNARD, *Comportement à long terme de poutres formées de bétons d'âge différent*, thèse no 2283, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2000
- [10] R. FAVRE, J.-P. JACCOUD, O. BURDET, H. CHARIF, *Dimensionnement des structures en béton*, Traité de Génie Civil 8, PPUR, 1997
- [11] http://www.bam.de/a_vii/vii_3/kompendium/welcome.html
- [12] C. GROSSE, B. WEILER, *Analyse von Vielfachreflexionen nach mechanischer Pulsanregung (Impakt-Echo)*, 1996.
- [13] J. KRIEGER, *Ultraschall- und Impact-Echo-Verfahren zur Zustandsuntersuchung von Spannkäulen*, München 1999.
- [14] C. COLLA, G. SCHNEIDER, J. WOESTMANN, H. WIGGENHAUSER, *Bundesanstalt für materialforschung und -prüfung (BAM)*, Berlin 1999.
- [15] <http://www.olsoninstruments.com/ie.html>

Rapports d'essais GEOTEST SA, 1996-1999 :

- [16] Tunnel du Mont Blanc, Italie: *essais destinés au contrôle de la qualité du béton en dehors et dans la zone de l'incendie*, Societa Italiana per azioni per il Traforo del Monte Bianco, Roma, 1999
- [17] A2, Passage supérieur CFF à Balerna TI: *positionnement des tuyaux Cofratol et recherche de cavités sous les tuyaux*, Ufficio die Ponti, Repubblica e Cantone del Ticino, 1999
- [18] A1, Tunnels d'Arissoules, Yvonand VD: *contrôle de l'épaisseur du revêtement en béton (anneau intérieur) et calage des essais au géoradar sur les résultats Impact-Echo*, Service des Routes et des Autoroutes du Canton de Vaud, 1999
- [19] A1, Viaduc des Vaux, Yvonand VD: *contrôle de l'injection de gaines de câbles de précontrainte*, Service des Routes et des Autoroutes du Canton de Vaud, 1999
- [20] A1, Viaduc de Lenzburg, Lenzburg AG: *mesure de l'épaisseur du revêtement en asphalte et du tablier en béton*, Abteilung Tiefbau des Aargauisches Baudepartement à Aarau, 1999
- [21] The Peninsula Bangkok Hotel, Bangkok, Taïland: *contrôle de l'application des spécifications du cahier des charges sur différents murs en maçonnerie*, The Peninsula Bangkok Hotel, 1999
- [22] A1, Ponts près de l'autoroute et au-dessus de la Limat à Neuenhof AG: *mesure de l'épaisseur du revêtement en asphalte et du tablier du pont en béton*, Abteilung Tiefbau des Aargauisches Baudepartement à Aarau, 1999
- [23] Pont sur la Reuss à Mülhau AG: *contrôle de la qualité du contact entre une ancienne et une nouvelle couche de béton*, Abteilung Tiefbau des Aargauisches Baudepartement à Aarau, 1998
- [24] A1, Passage supérieur Etoy-Buchillon VD: *recherches de cavités sous des tuyaux Cofratol*, Service des Routes et des Autoroutes du Canton de Vaud, 1998

- [25] A1, Tunnels de Pomy, Yverdon, VD: *contrôle de l'épaisseur du revêtement en béton (anneau intérieur) et calage des essais au géoradar sur les résultats Impact-Echo*, Service des Routes et des Autoroutes du Canton de Vaud, 1998
- [26] Galerie d'amenée d'eau WKW, La Goule JU: *contrôle de la liaison entre le revêtement en béton et le rocher*, BKW FMB Energie SA, Berne, 1997
- [27] N9, Galerie de Plantzette Sud, Sierre VS: *contrôle de l'épaisseur du revêtement (anneau intérieur) en béton*, Service des Routes Nationales du Canton du Valais, 1997
- [28] A1, Pont de la Golaz, Yvonnand VD: *contrôle de l'injection des gaines de câbles de précontrainte*, Service des Routes et des Autoroutes du Canton de Vaud, 1997
- [29] A1, Tunnels d'Arrissoules, Yvonand VD: *contrôle de l'injection entre des voussoirs et le rocher*, Service des Routes et des Autoroutes du Canton de Vaud, 1997
- [30] A1a, Viaduc de la voie centrale à Genève GE: *contrôle de l'injection des gaines de câbles de précontrainte dans des piliers du viaduc*, Département des Travaux Publics et de l'Energie du Canton de Genève, 1996
- [31] A1, Tranchée couverte d'Arare à Genève GE: *contrôle de l'injection entre des éléments d'habillage préfabriqués et un mur anti-refoulement*, Département des Travaux Publics et de l'Energie du Canton de Genève, 1996

