

Détermination de la présence de chlorures à l'aide du géoradar

Georadar zur Auffindung von Chloriden

Detection of chlorides using Ground Penetrating Radar

Empa, Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche
Johannes Hugenschmidt, géophysicien dipl., MBA

Mandat de recherche 2005/009 sur demande du groupe de travail recherches en matière de ponts (AGB)

Table des matières

1	Résumé	5
2	Zusammenfassung.....	7
3	Summary	9
4	Exposition du problème	11
5	Principe du géoradar	12
6	Etat de la recherche	13
7	But et concept du projet	14
8	Expériences de laboratoire	15
8.1	Confection des échantillons.....	15
8.2	Contrôles du béton	17
8.3	Examen radar avec antennes cornets.....	19
8.4	Examen radar avec antennes couplées	25
8.5	Conclusions tirées des essais en laboratoire	29
9	Pont sur la Denève	30
9.1	Indications fournies.....	30
9.2	Préparation des mesures	30
9.3	Exécution des mesures	32
9.4	Traitement des données.....	33
9.5	Propositions concernant les emplacements de sondage	34
9.6	Evaluation.....	36
9.7	Résultats.....	45
9.8	Comparaison entre résultats radar et réalité selon le relevé de l'état	50
10	Pont de la Veveyse de Féglise.....	53
10.1	Indications fournies.....	53
10.2	Préparation des mesures	53
10.3	Exécution des mesures	53
10.4	Traitement des données.....	53
10.5	Propositions concernant les emplacements de sondage	53
10.6	Evaluation.....	54
10.7	Résultats.....	54
10.8	Comparaison entre les résultats radar et la réalité.....	59
11	Aspects économiques	61
12	Travaux ultérieurs	62
13	Conclusions.....	63

14	Remerciements	64
15	Bibliographie	65
16	Annexes	67
16.1	Résultats des sondages de calibration sur le Pont sur la Denève	67
16.2	Résultats des sondages de calibration sur le Pont sur la Veveyse de Fégire.....	68

1 Résumé

La corrosion provoquée par les chlorures est l'une des causes principales des dégâts sur les structures en béton armé et elle est responsable d'une grande partie des coûts de réparation de ces structures. Dans le cas des ponts où le tablier est recouvert d'une couche d'asphalte il n'est pas possible d'effectuer d'inspection visuelle ou d'utiliser la technique d'analyse du potentiel d'armatures. Ceci a pour conséquence que la décision de la réparation des tabliers de ponts ne repose souvent que sur un faible nombre d'échantillons et sur la seule expérience des ingénieurs responsables. C'est pourquoi une méthode de localisation des zones à hautes teneurs en chlorures serait très utile.

Le géoradar (Ground-Penetrating-Radar; GPR) est une technique d'inspection non destructive applicable sur des objets de grande taille tels que les tabliers de pont. Jusqu'ici il était principalement utilisé pour apporter des réponses à des problèmes structuraux tels que la détermination de l'épaisseur du béton au-dessus des armatures ou la localisation des câbles de précontrainte. La méthode n'étant pas affectée par la couche d'asphalte sur le tablier, plusieurs auteurs ont proposés le GPR comme outil de localisation des dégâts et des zones à haute teneur en chlorures. Un certain nombre d'études ont été menées dans cette direction, cependant aucune conclusion définitive n'a pu être encore apportée sur l'applicabilité de cette méthode.

Le projet de recherche présenté dans ce rapport a pour but de lever cette incertitude.

Des expériences de laboratoire ont permis de démontrer l'influence de la teneur en humidité et en chlorures du béton sur les amplitudes des réflexions transmises au géoradar. L'effet provoqué par cette influence semble atteindre un ordre de grandeur intéressant pour une application sur des ponts réels. Le calcul du quotient de réflexion des amplitudes, entre la surface et le fond d'échantillons de béton, fournit en effet des valeurs deux fois plus élevées pour les échantillons humides renfermant des chlorures que pour les échantillons secs et exempts de chlorures et constitue ainsi une approche qui devrait fournir des résultats stables dans des conditions réelles aussi.

L'analyse des vitesses du signal radar a aussi mis en évidence une influence des chlorures et de l'humidité sur la vitesse de propagation du signal radar dans le béton. Cet effet est cependant moins important que l'effet sur l'amortissement de la réflexion du signal. Comme, de plus, la détermination de la vitesse de propagation est notablement plus compliquée que celle de l'amortissement, cette approche semble pour le moment moins prometteuse.

Des calculs d'inversion effectués dans le cadre d'un travail de bachelor à l'Institut de géophysique de l'EPF de Zurich à partir des données obtenues lors des expériences de laboratoire ont fourni des indices d'une différenciation entre l'influence de l'humidité et celle des chlorures.

Afin de vérifier l'applicabilité de la méthode des quotients sur des ponts réels, deux tests ont été réalisés sur le Pont de la Denève et sur le Pont de la Veveyse sur l'autoroute A12. Ces examens radar ont été effectués durant la phase préparatoire des réfections prévues et ont fourni des résultats plausibles sur la contamination par les chlorures du tablier de ces deux ponts. Le prélèvement originalement prévu d'un grand nombre d'échantillons durant les travaux de réfection n'a pas pu être réalisé de sorte qu'il a fallu se reporter à des sondages antérieurs pour le contrôle des résultats. Cependant ces sondages antérieurs n'étaient ni positionnés de manière idéale ni en nombre suffisant pour la vérification des résultats des mesures radar. Il n'a ainsi pas été possible, malgré la plausibilité des résultats radar obtenus, d'établir définitivement l'applicabilité de cette méthode des quotients.

Le coût de la détermination de la contamination des tabliers des ponts par les chlorures au moyen de mesures géoradar dépend de nombreux facteurs et on a procédé à leur estimation sur l'exemple du Pont de la Denève. Sur ce pont d'une longueur de 122 mètres et d'une largeur de 24 mètres, on a procédé à des mesures parallèles espacées de 1 mètre sur toute la longueur du pont. La préparation et l'exécution des mesures, leur évaluation et la rédaction du rapport ont nécessité environ 90 heures de travail. A cela viennent s'ajouter les dépenses du commettant pour les déviations du trafic et les sondages. Si cette méthode devait parvenir à s'imposer comme méthode de routine, il est certain que certaines de ces étapes pourraient encore être optimisées et en réduire ainsi les coûts. Comparées aux coûts de la réparation d'un tablier de pont, les dépenses qu'implique une étude radar sont certainement justifiables.

Les connaissances acquises dans le projet de recherche documenté ici indiquent que, malgré les résultats non définitivement vérifiables de deux essais sur des objets réels, la méthode radar est fondamentalement adaptée à l'étude de la contamination des tabliers de ponts par les chlorures. Il serait indiqué de procéder à une vérification détaillée dans un essai réel.

2 Zusammenfassung

Durch Chloride verursachte Korrosion ist ein wichtiger Grund für Schäden an Verkehrsbauwerken aus Beton und somit für einen wesentlichen Teil der anfallenden Sanierungskosten verantwortlich. Auf Brückenplatten kommt hinzu, dass die Betonoberfläche wegen des Asphaltbelages weder visuell noch mit den gängigen Potentialverfahren beurteilt werden kann. Der Entscheid über allfällige Sanierungsmassnahmen bzw. deren Planung basiert deshalb üblicherweise auf einigen Sondierungen sowie auf der Erfahrung der beteiligten Ingenieure. Ein zerstörungsfreies Verfahren zur Lokalisierung von Bereichen mit erhöhten Chloridgehalten auf asphaltierten Brückenplatten wäre somit von grossem Nutzen.

Georadar ist ein zerstörungsfreies Verfahren, welches auch für die Untersuchung grosser Objekte, wie beispielsweise Brückenplatten eingesetzt wird. Bisher werden mit dieser Methode vor allem strukturelle Fragestellungen wie die Eisenüberdeckung der obersten Bewehrungslage oder die Position von Vorspannkabeln untersucht. Der Asphaltbelag stellt hierbei kein wesentliches Hindernis dar. Georadar wurde von einigen Autoren zur Lokalisierung von Schäden und Zonen mit erhöhten Chloridgehalten in der Brückenplatte in Betracht gezogen und in Pilotstudien erprobt, welche jedoch keinen abschliessenden Entscheid über die Eignung des Verfahrens zulassen.

Um die Eignung des Georadar zur Untersuchung von Brückenplatten auf Chloride abzuklären, wurde das in diesem Bericht dokumentierte Forschungsprojekt durchgeführt.

In einem Laborexperiment konnte gezeigt werden, dass Feuchtigkeit und Chloride im Beton die Dämpfung des Radarsignals erheblich verstärken und somit einen messbaren Einfluss auf Radaramplituden haben. Dieser Einfluss liegt in einer Grössenordnung, welche auch für die Anwendung auf realen Brücken interessant scheint. Die Berechnung des Quotienten der Reflexionsstärke an der Betonoberfläche und der Betonunterunterseite liefert für feuchte und chloridhaltige Prüfkörper doppelt so hohe Werte wie für trockene und chloridfreie und stellt somit einen Ansatz dar, der auch unter Feldbedingungen stabile Ergebnisse liefern sollte.

Eine ebenfalls im Rahmen des Laborexperimentes durchgeführte Analyse des Einflusses von Feuchtigkeit und Chloriden auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals im Beton zeigte ebenfalls einen Zusammenhang. Dieser ist jedoch weniger deutlich ausgeprägt als der Einfluss auf die Dämpfung des Signals. Da die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit zusätzlich erheblich aufwändiger als die der Dämpfung ist, erscheint diese Herangehensweise momentan wenig erfolgversprechend.

Eine im Rahmen einer Bachelorarbeit am Institut für Geophysik der ETH Zürich durchgeführte Inversion der im Laborexperiment gewonnenen Datensätze liefert Ansätze für eine Unterscheidung der Einflüsse von Feuchtigkeit und Chloriden.

Um die Anwendbarkeit der Methode auf realen Brücken zu überprüfen, wurden auf der A12 die Pont sur la Denève und die Pont de la Veveyse de Féglise untersucht. Aufgrund der Ergebnisse des Laborexperiments wurde der Quotient der Reflexionsstärke an der Betonoberfläche und der obersten Bewehrungslage als Kriterium für das Vorhandensein von Chloriden und Feuchtigkeit im Beton ausgewertet. Die Radaruntersuchungen wurden im Vorfeld von geplanten Sanierungsmassnahmen durchgeführt und lieferten plausible Ergebnisse für die Chloridbelastung auf beiden Brückenplatten. Die ursprünglich geplante umfassende Beprobung beider Brückenplatten während der Bauarbeiten konnte nicht durchgeführt werden, so dass zur Kontrolle der Radarergebnisse auf bereits bestehende Sondierungen zurückgegriffen werden musste. Diese waren für die Kontrolle der Radarergebnisse weder ideal positioniert noch in ausreichender Zahl vorhanden. Somit konnte die Tauglichkeit der Quotientenmethode für die Praxis, trotz plausibler Radarergebnisse, nicht abschliessend geklärt werden.

Die Kosten für Chloriduntersuchungen auf Brückenplatten mittels Georadar hängen von zahlreichen Faktoren ab und wurden deshalb beispielhaft für die Pont sur la Denève abgeschätzt. Bei einer Brückenlänge von 122m und einer Breite von 24m wurden parallele Linien im Abstand von jeweils einem Meter über die gesamte Brückenlänge gemessen und ausgewertet. Der reine Zeitaufwand für Vorbereitung und Durchführung der Messungen, Auswertung und Bericht betrug ca. 90 Personenstunden. Hinzu kommen die Aufwendungen des Auftraggebers für die Sperrung einzelner Fahrspuren während der Messungen und die Sondierungen. Sollte sich das Verfahren durchsetzen und routinemässig eingesetzt werden, so besteht zweifellos Potential zur Optimierung der einzelnen Arbeitsschritte und somit zur Kostensenkung. Im Vergleich zu den Kosten für die Sanierung einer Brückenplatte ist der Aufwand für eine Radaruntersuchung somit zweifellos vertretbar.

Die im Rahmen des hier dokumentierten Forschungsprojektes gewonnenen Erkenntnisse deuten, trotz der nicht abschliessend verifizierbaren Ergebnisse der beiden Feldversuche, darauf hin, dass das Radarverfahren für die Untersuchung der Chloridbelastung von Brückenplatten grundsätzlich geeignet ist. Es wird empfohlen, dies in einem Feldversuch detailliert zu überprüfen.

3 Summary

Chloride induced corrosion is a main cause for damages on concrete structures and thus responsible for a large share of the cost for the rehabilitation of concrete structures. On bridge decks covered with asphalt the concrete surface can not be inspected visually or with common potential techniques. As a result the planning of the repair of bridge decks is usually based on a small number of probes and the experience of the engineers involved. Therefore, a non-destructive method for the localization of zones with increased chloride contents on bridge decks is desirable.

Ground-Penetrating-Radar (GPR) is a non-destructive inspection method that can be applied on large objects such as bridge decks. Today, it is mainly used for structural problems such the concrete cover of rebar or the localization of tendons. There, asphalt pavement does not cause significant problems. Several authors have suggested GPR as a method for the localization of damages and zones with increased chloride contents and a number of pilot studies has been carried out. However, no final conclusion has been reached on the applicability of this approach.

To examine the suitability of GPR as an inspection tool for chlorides, the research project described in this report was carried out.

In a laboratory experiment it was shown that both chlorides and moisture in concrete have a measurable influence on the damping of the radar signal and thus on radar amplitudes. This effect seems to be large enough to be applied for the inspection of real bridges. The computation of the quotient of the reflection amplitudes at the concrete surface and the bottom of a concrete specimen resulted in values that were twice as high for specimens containing chloride and moisture than for dry ones without added chlorides. Thus, this approach should also be stable under field conditions where additional effects will be present.

An analysis of the velocity of the radar signal also showed the influence of chlorides and moisture. However, this effect was much smaller than the impact on the damping of the signal. As the analysis of the signal velocity is a good deal more complex than that of the damping, this approach has to be considered not very promising at present.

An inversion of the laboratory data carried out within the framework of a bachelor's thesis at ETH Zurich may suggest an approach for the distinction between moisture and chlorides.

A field test was carried out on two bridges on Swiss motorway A12, Pont sur la Denève and Pont sur la Veveyse de Fégire to examine the suitability of the method. As suggested by the laboratory results, the damping of the radar signal was analyzed by computing the quotient of the reflection

amplitudes at the concrete surface and the top layer of rebar. The radar inspections were carried out prior to rehabilitation work and radar results for the chloride contamination of the bridge decks seemed plausible. Unfortunately it was not possible to carry out the extensive probing programme that had been planned to verify the radar results. Thus, existing probing results had to be used that were too few and not positioned ideally. Therefore the applicability of the suggested quotient method to real bridges could not be verified conclusively although the results obtained on both bridges seem plausible.

The cost for chloride inspections of bridge decks depends on numerous factors and was therefore exemplified for the Pont sur la Denève. Radar data were recorded and analyzed along parallel lines over the whole length of 122m and the width of 24m. The time required for the preparation and execution of the data acquisition, the analysis of the data and the preparation of the report was about 90 man-hours. In addition, there is some work that has to be carried out by the awarding authority such as the closure of single lanes during radar data acquisition and the sampling and analysis of the probes. If the proposed method should become routine, there will certainly be space for an optimization and thus for cost reduction. When compared to the cost for the rehabilitation of bridge decks, the expenses for radar surveys are certainly economically justifiable.

Although the value of chloride inspections using Ground Penetrating Radar could not be defined conclusively during the field tests, the results of this research project are indicating that radar is applicable to this problem. A detailed verification of this statement with the help of a field test is recommended.

4 Exposition du problème

Dans les conditions normales, les armatures du béton sont principalement protégées de la corrosion par la valeur élevée pH du liquide contenu dans les pores du milieu. Dans de telles conditions, il se forme à la surface de l'acier un film protecteur qui passive les armatures et prévient les processus électrochimiques de corrosion [1]. Toutefois cette couche de protection de passivation peut être détruite par la carbonatation du béton ou la pénétration de chlorures [2]. Dès que la teneur en chlorures dépasse un certain seuil, la couche de passivation protectrice est détruite localement et la corrosion de l'armature peut alors s'initier en combinaison avec l'eau et l'oxygène [3]. Cette corrosion induite par les chlorures a deux conséquences. La première est que les produits de corrosion occupent un volume plusieurs fois plus élevé que l'acier originel de sorte que leur formation provoque une fissuration et un écaillage du béton. Deuxièmement du fait de la très forte localisation de la corrosion induite par les chlorures il se forme une anode de petite taille conduisant à la formation de piqûres de corrosion, à une perte de section de l'acier et à une diminution de la capacité portante [2]. La corrosion des armatures est la cause principale de la détérioration du béton armé et est ainsi responsable dans une large mesure des coûts de réfection des structures en béton armé [4].

La corrosion des aciers d'armature induite par les chlorures dans le béton armé n'est pas seulement un problème majeur dans les pays où ces structures sont en contact avec l'eau de mer mais aussi dans les pays où l'on utilise du sel pour le déverglaçage des routes. L'inspection visuelle périodique des structures en béton est une méthode établie pour le contrôle de leur état. Il existe en outre des méthodes basées sur la mesure du potentiel électrique des aciers dans le béton pour la détection de la corrosion dans le béton armé [5, 6]. Dans le cas des ponts où le tablier est couvert par une couche d'asphalte il n'est d'une part pas possible d'effectuer d'inspections visuelles ou des techniques d'analyse du potentiel d'armatures. D'autre part, le prélèvement d'échantillons est restreint dans la majorité des cas à cause du trafic. De ce fait, la planification des mesures d'entretien repose sur l'expérience et non pas sur des données de l'état réel du tablier. Une méthode permettant de déceler les zones où la teneur en chlorures et/ou en humidité est élevée suite à des défauts de la couche d'étanchéité est ainsi souhaitable pour permettre de mieux planifier les travaux de réparation sur le plan des coûts et du planning temporel.

5 Principe du géoradar

Le géoradar, aussi dénommée GPR (de l'anglais Ground Penetrating Radar) ou encore méthode de réflexion électromagnétique, est une méthode de mesure électromagnétique. Elle s'utilise le plus souvent en mode réflexion dans lequel un signal est émis par une antenne dans la structure à examiner. L'énergie réfléchiée par des modifications des propriétés du matériau est enregistrée (figure 5-1) et analysée.

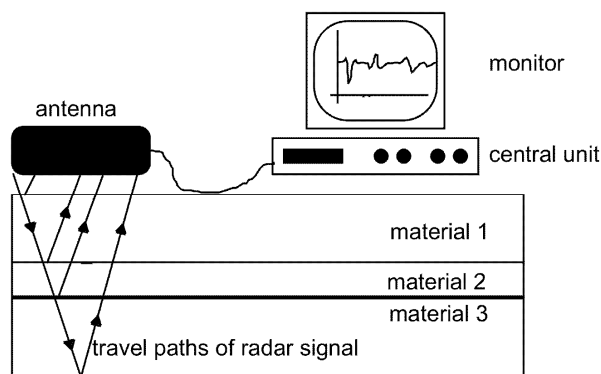


Figure 5-1: Principe du géoradar

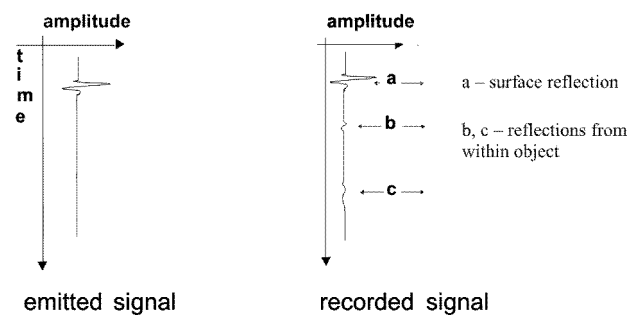


Figure 5-2: Signal émis et signal enregistré

Une représentation schématique du signal émis et du signal enregistré est donnée sur la figure 5-2. Le signal enregistré est aussi souvent dénommé scan ou trace radar. L'axe vertical est l'axe du temps, et la fenêtre d'enregistrement typique dans l'investigation non destructive des ponts en béton est inférieure à 30 nanosecondes (ns).

L'amplitude de la réflexion à l'interface entre deux matériaux dépend de nombreux facteurs tels que la différence des propriétés des matériaux (en particulier la différence de leur constante diélectrique), de l'amplitude du signal émis ou de l'atténuation du signal radar dans le matériau situé au-dessus de l'interface.

L'atténuation du signal radar, et par là même la profondeur d'investigation, dépendent étroitement de la conductivité électrique de l'objet examiné. Lorsque les matériaux investigués présentent des conductivités électriques élevées, le signal radar est transformé en courants de fuite, ce qui augmente l'atténuation du signal et réduit ainsi la profondeur d'investigation atteignable.

Daniels [7] donne une description détaillée du principe du géoradar et de ses applications à la résolution de problèmes variés dans différents domaines.

6 Etat de la recherche

Le géoradar a été suggéré par différents auteurs comme méthode d'inspection possible pour l'évaluation de l'état des tabliers des ponts. Cardimona et. al. [8] mesurent la dégradation du signal radar (diminution d'amplitude et/ou accroissement de la durée de propagation) comme indication de la présence d'un endommagement de la région située au-dessus de l'armature. Scheff and Chen [9] décrivent une comparaison des résultats obtenus par géoradar et «chain drag» (méthode acoustique avec chaîne trainée à la surface du béton) dans une étude sur la délamination d'un tablier de pont en béton et constatent que les résultats de ces deux méthodes ne concordent pas très bien. Roberts [10] compare les résultats de détection par radar des détériorations sur plusieurs tabliers de ponts du New Hampshire avec des techniques de «vérité de terrain» et des techniques conventionnelles (destructives). Il arrive à la conclusion que les résultats concordent bien entre eux. Shin et Grivas [11] étudient la précision des conditions d'évaluation par géoradar basée sur les seuils de réflexion des barres d'armature et la constante diélectrique. Ils proposent ainsi l'utilisation d'une technique de multi-détecteurs pour améliorer les capacités d'évaluation de l'état des tabliers de ponts. Barnes et Trottier [12] décrivent une étude des détériorations sur neuf tabliers de ponts où les données radar ont été triées manuellement pour détecter les atténuations excessives du signal et les réflexions dues à l'interface bitume/béton. La comparaison des résultats radar avec ceux obtenus par la méthode du « chain drag » et les mesures potentiométriques conduit à la conclusion que le géoradar peut représenter une option valable pour l'estimation quantitative des dommages nécessitant réparation. Hugenschmidt [13] décrit l'application d'une méthode reposant sur l'atténuation du signal à l'intérieur du béton d'un pont en Suisse. Cet effet est décrit comme probablement dû à une augmentation de l'humidité et de la teneur en chlorures du béton. La vérification des résultats obtenus n'a toutefois pas été possible car le pont est toujours en service. Finalement, les fabricants d'équipements radars [14] offrent leur produit comme outil pour l'évaluation de l'état des tabliers des ponts et une norme ASTM [15] décrit une méthode de détection des zones de délamination sur les tabliers de ponts reposant sur les variations de l'écho de la face inférieure de la dalle.

7 But et concept du projet

Il serait très souhaitable de pouvoir disposer d'une méthode de détermination quantitative non destructive des teneurs en chlorures du béton sur les ponts possédant un revêtement de chaussée bitumineux. Une telle méthode permettrait de faciliter grandement la planification des mesures d'entretien et de réparation. Cependant, une méthode qualitative de localisation des zones à haute teneurs en chlorures serait d'une grande utilité comme soutien dans la planification des sondages par carottage et dans l'extrapolation des résultats obtenus. En 2004 et 2005, le viaduc de Felsenau (A1/Berne) a été soumis à des mesures par géoradar dans le cadre d'un projet pilote. Les résultats obtenus sont plausibles mais non vérifiables pour le moment. De plus, ces résultats reposent sur des hypothèses qui sont certes elles aussi plausibles mais qui n'ont encore pas pu être soumises à une vérification expérimentale.

Le projet documenté ici avait pour but de vérifier en laboratoire les hypothèses posées et de quantifier leur ordre de grandeur. De plus, deux ponts devaient être auscultés au moyen du géoradar avant leur assainissement et les résultats obtenus soumis à vérification au moyen de prélèvements d'échantillons, une fois le revêtement bitumineux enlevé.

8 Expériences de laboratoire

8.1 Confection des échantillons

Afin de pouvoir étudier aussi bien l'influence de l'humidité que celle des chlorures, il a été confectionné 9 échantillons de béton. Pour cela un béton avec un grain maximum de 3 mm et un rapport e/c de 0.50 a été utilisé. Trois mélanges ont été préparés auxquels il a été ajouté à chacun une quantité de chlorures différente (pourcentage massique de chlorures rapporté à la teneur en ciment):

- 3 échantillons sans adjonction de chlorures
- 3 échantillons avec adjonction de 0.4% de chlorures, ce qui correspond environ à ce que l'on considère dans la pratique comme la valeur limite pour le béton doté d'armatures passives.
- 3 échantillons avec adjonction de 1% de chlorures, ce qui correspond à environ deux fois la valeur limite.

Le béton a été coulé dans des moules dont la surface de base était recouverte d'une feuille d'aluminium (figure 8-4) simulant la couche supérieure de l'armature du tablier du pont. On a préféré appliquer cette feuille plutôt que de poser des barres d'armature car cela permettait d'éviter les problèmes de positionnement et d'orientation au cours de la mesure radar. Le béton a été vibré à l'aide d'un vibreur à aiguille puis sa surface a été lissée (figure 8-5). Les dimensions des moules étaient de 0.75 x 0.80 m, l'épaisseur du béton atteignant 0.08 m.

Après leur confection, les échantillons ont été entreposés durant 99 jours à 20°C et à trois humidités relatives différentes (35%, 70% et 90%). On disposait ainsi de 9 échantillons avec trois teneurs en chlorures différentes et trois humidités différentes (tableau 8-1). Lors de la confection des échantillons, un contrôle du béton frais a été réalisé sur chaque mélange de béton. De plus après les essais, diverses caractéristiques de matériau ont été déterminées (paragraphe 8.2).

Tableau 8-1: Description et numérotation des échantillons

	Humidité relative / entreposage	35%	70%	90%
Adjonction chlorure				
0.0%		1	2	3
0.4%		4	5	6
1.0%		7	8	9



Figure 8-1: Adjonction du chlorure dans l'eau de gâchage



Figure 8-2: Confection du mélange de béton



Figure 8-3: Contrôle du béton frais

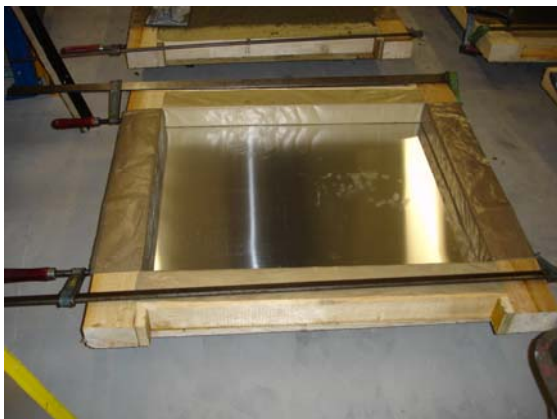


Figure 8-4: Moule avec feuille d'aluminium



Figure 8-5: Lissage de la surface

8.2 Contrôles du béton

La composition des mélanges de béton avec les caractéristiques du béton frais correspondantes sont indiquées dans le tableau 8-2.

Tableau 8-2: Composition et caractéristiques du béton frais

Mélange	Adjonction NaCl [kg/m ³]	Ciment CEM I 42.5 [kg/m ³]	Eau [l/m ³]	Rapport e/c	Vides d'air [Vol.-%]	Etallement [cm]	Degré de compactibilité [-]
0.0% Cl	0	310	155	0.50	1.0	42.5	1.04
0.4% Cl	2	306	154	0.50	1.1	44.0	1.04
1.0% Cl	5	301	152	0.50	1.0	44.0	1.04

Lors de la confection des échantillons, il a été réalisé deux prismes de 120 x 120 x 360 mm, à partir de chaque mélange, sur lesquels la résistance à la compression a été mesurée après un entreposage de 28 jours à 90 % d'humidité. Pour cela on a tout d'abord procédé sur chaque prisme à la détermination de la résistance à la traction par flexion puis, sur chacun des demi-prises ainsi obtenu, à celle de la résistance à la compression. La figure 8-6 montre que la résistance à la compression du béton diminue avec l'augmentation de sa teneur en chlorure. La diminution maximale atteint 10% (par rapport à la valeur maximale). Cette diminution peut probablement être expliquée d'une part par la formation des produits d'hydratation différents (par ex. Sels de Friedel) et d'autre part par les alcalins (NA²⁺) qui résultent en une augmentation de la résistance initiale et une faible réduction de la résistance après 28 jours.

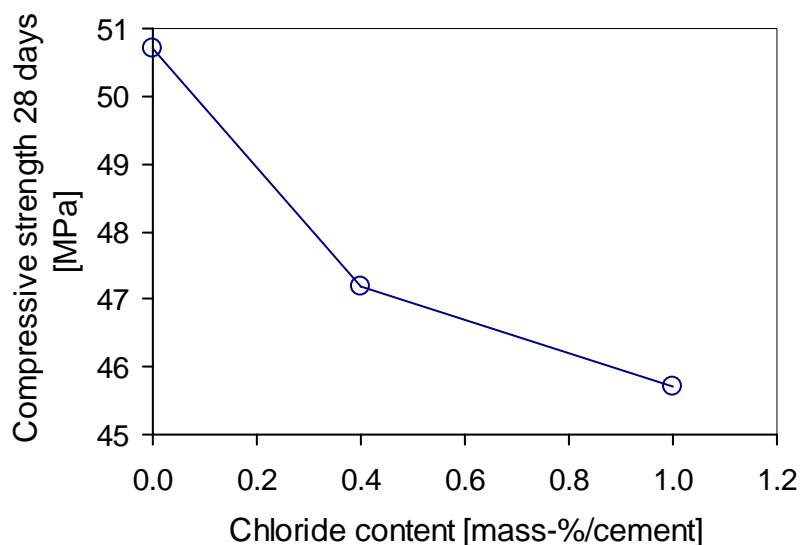


Figure 8-6: Résistance à la compression des trois mélanges de béton en fonction de la teneur en chlorures après 28 jours d'entreposage à 90% d'humidité relative.

Nous avons en outre déterminé les variations de masse des plaques de béton avec l'augmentation de leur âge. Ces variations sont provoquées par la perte et l'absorption d'humidité du béton aux différentes humidités de l'air. Alors qu'à 35% et 70% d'humidité relative, les plaques de béton subissaient une perte de masse, la masse de celles entreposées à 90% d'humidité relative augmentait (figure 8-7). Le bilan hygrométrique des plaques de béton est en plus influencé par leur teneur en chlorures. Du fait des propriétés hygroscopiques du chlorure, les déperditions d'eau à humidité constante de l'air diminuent avec l'augmentation de la teneur en chlorure. Inversement, l'absorption d'humidité du béton dans l'enceinte climatisée à 90% d'humidité relative augmente avec l'accroissement de sa teneur en chlorures.

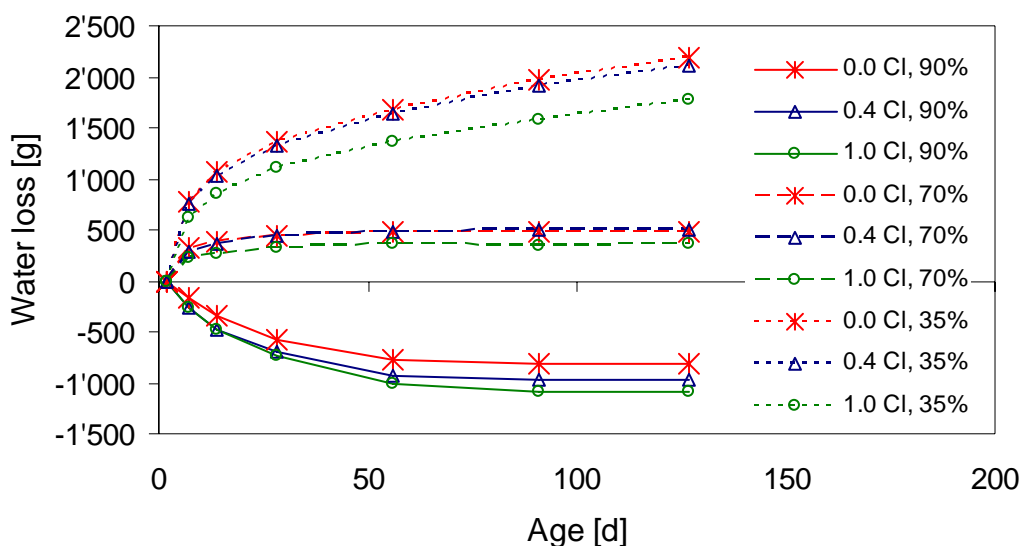


Figure 8-7: Variations de masse des plaques de béton en fonction de l'âge

A côté du bilan hygrométrique, l'humidité d'entreposage influence aussi le développement de la résistance du béton. La résistance à la compression du béton augmente avec l'augmentation de l'humidité d'entreposage (figure 8-8). Comme les valeurs de résistance à la compression indiquées sur la figure 8-8 ont été déterminées après 136 jours sur une seule carotte par plaque, la dispersion des résultats est relativement importante. La tendance à l'augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de l'humidité d'entreposage se distingue toutefois nettement. Les humidités d'entreposage élevées permettent une meilleure hydratation du ciment formant une structure plus compacte ayant une meilleure résistance. L'augmentation de la résistance à la compression semble ici indépendante de la teneur en chlorures.

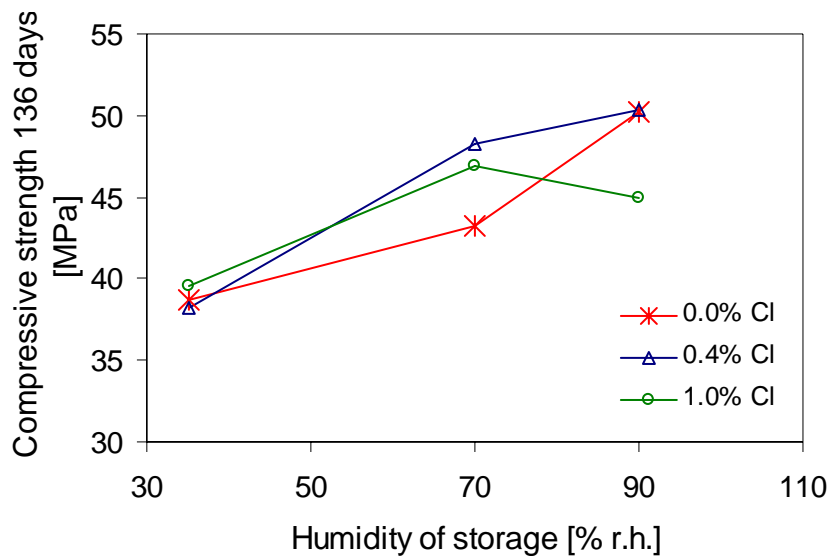


Figure 8-8: Résistance à la compression en fonction de l'humidité d'entreposage des trois mélanges de béton après 136 jours

8.3 Examen radar avec antennes cornets

Cette expérience a servi à vérifier l'hypothèse selon laquelle l'association de chlorures et d'humidité dans le béton entraîne une conductibilité plus élevée engendrant une atténuation mesurable du signal ou de l'amplitude de la réflexion sur signal radar sur la couche supérieure des aciers d'armature. Les examens effectués en 2004 et 2005 sur le viaduc de Felsenau reposaient sur cette hypothèse. Le principe de mesure est représenté sur la figure 8-9. Les deux antennes cornets (un émetteur et un récepteur) se trouvent en position stationnaire au-dessus de l'échantillon. La hauteur des antennes au-dessus des échantillons de 0.25 m correspond à celle des mesures effectuées avec l'installation géoradar mobile sur les ponts. Le signal émis par l'émetteur parvient au récepteur par différentes voies:

- Sous forme d'onde directe à travers l'air de l'émetteur au récepteur (flèche verte sur la figure 8-9)
- Après réflexion à la surface du béton (flèche bleue sur la figure 8-9)
- Après réflexion sur la feuille d'aluminium et après avoir traversé deux fois l'échantillon (flèche rouge sur la figure 8-9)

L'onde directe n'est pas intéressante dans l'expérience effectuée et pourrait au besoin s'utiliser à des fins de calibrage et de contrôle. L'amplitude de la réflexion devrait diminuer sur la feuille d'aluminium et augmenter à la surface du béton avec l'augmentation de la conductibilité du béton.

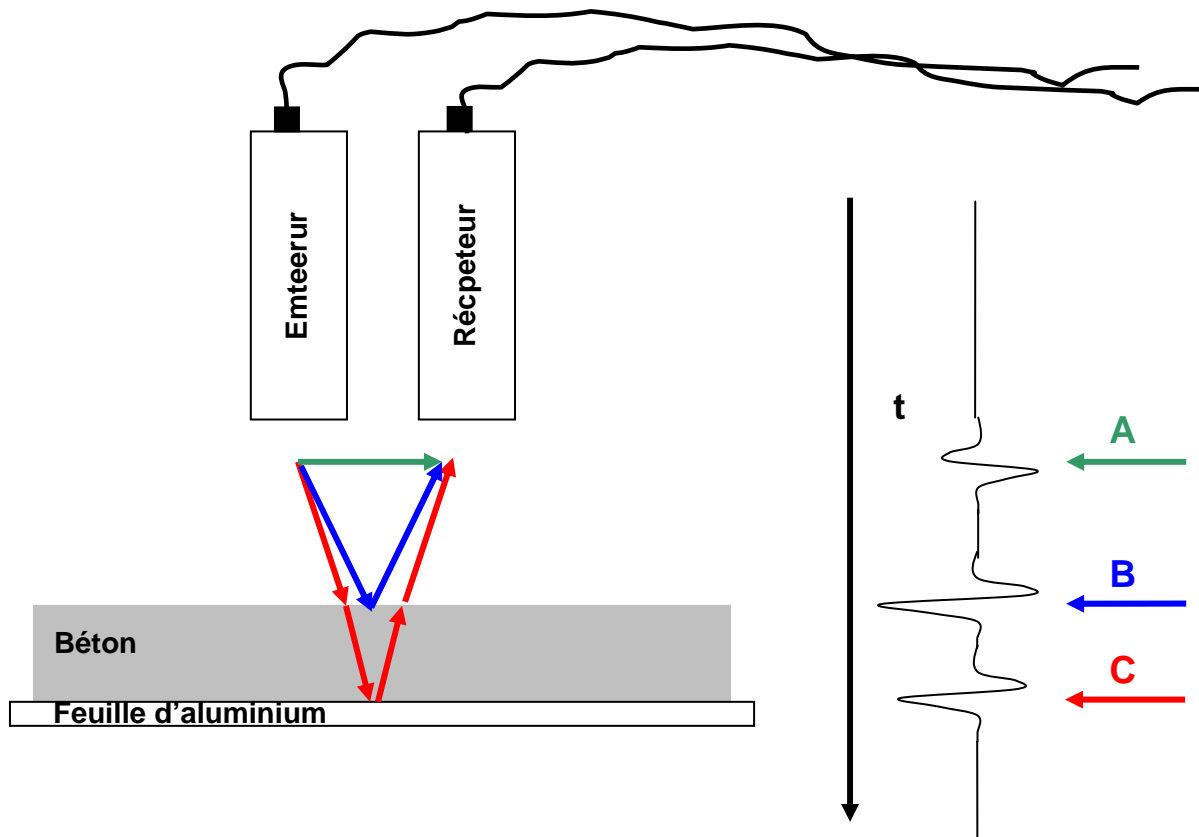


Figure 8-9: Principe de mesure de l'atténuation

Des mesures stationnaires ont été réalisées sur chaque échantillon. Les appareils utilisés et les paramètres d'enregistrement sont indiqués dans le tableau 8-3. La photo de la figure 8-10 montre l'exécution d'une mesure avec les deux antennes disposées au-dessus de l'échantillon.

Tableau 8-3: Appareils et paramètres d'enregistrement

Appareil radar	GSSI SIR-20
Antennes	GSSI Modell 4205 Horn
Hauteur du boîtier de l'antenne au-dessus du béton	0.25m
Traitement des données durant la mesure	aucun
Nombre de points de mesure par échantillon	5



Figure 8-10: Mesures avec antennes cornets au-dessus de l'échantillon

Les figures 8-11 à 8-14 montrent à titre d'exemple le signal provenant des quatre échantillons. L'échantillon 1 (sans adjonction de chlorures, entreposage à 35% d'humidité relative) devrait présenter la plus faible conductibilité et la plus petite atténuation alors que l'échantillon 9 (adjonction de 1% de chlorures, entreposage à 90% d'humidité relative) devrait présenter la plus forte conductibilité et la plus forte atténuation. Si l'on compare les réflexions sur la feuille d'aluminium (flèche rouge, marquage C) de ces deux échantillons, on constate que la réflexion est affaiblie de manière visible sur l'échantillon 9.

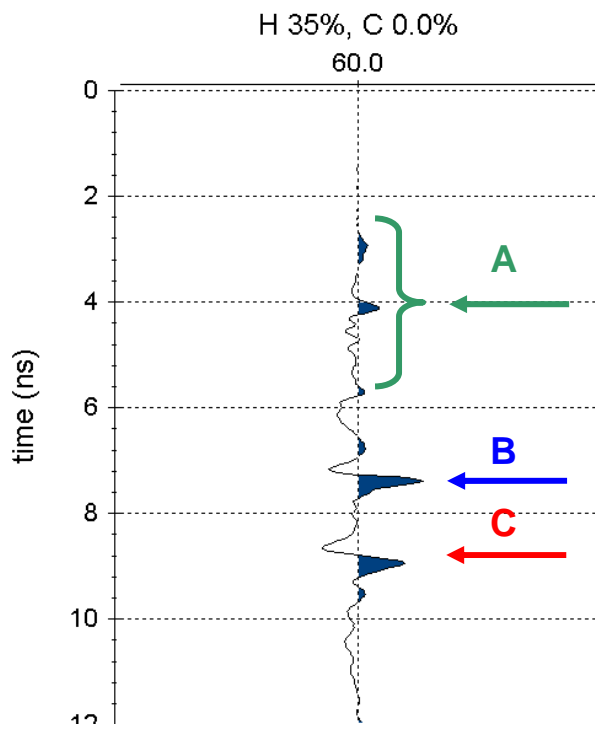


Figure 8-11: Signal de l'échantillon 1

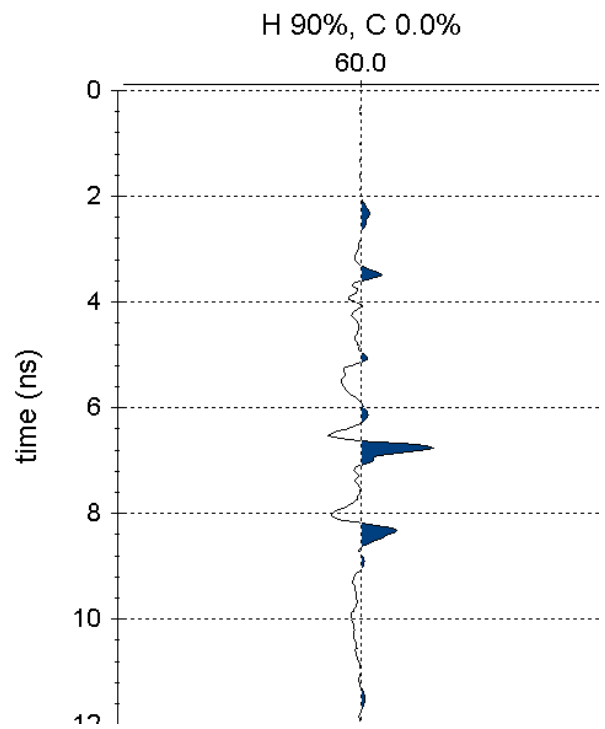


Figure 8-12: Signal de l'échantillon 3

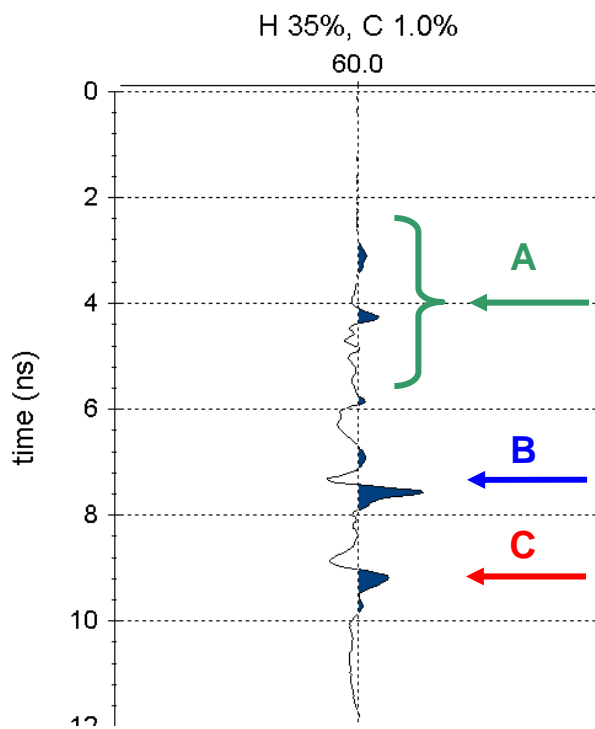


Figure 8-13: Signal de l'échantillon 7

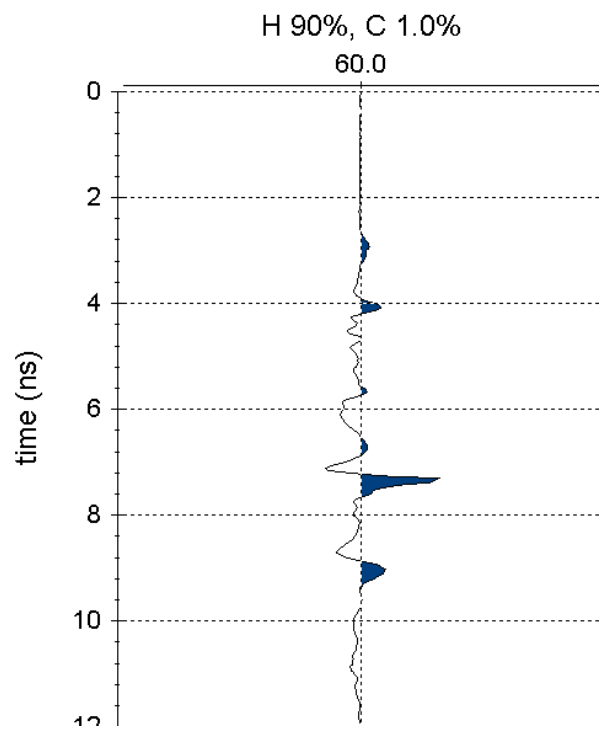


Figure 8-14: Signal de l'échantillon 9

Pour une évaluation numérique, on a déterminé sur chaque échantillon la moyenne de l'amplitude de la réflexion en cinq points de mesure. Les résultats pour la réflexion à la surface du béton sont donnés dans le tableau 8-4 et à la figure 8-15. Les amplitudes de réflexion s'accroissent nettement avec l'augmentation de l'humidité. Cet effet est encore renforcé par l'accroissement de la teneur en chlorures. La différence entre les amplitudes maximales et minimales de la réflexion atteint 18 % (rapportée au maximum).

Tableau 8-4: Amplitudes de la réflexion à la surface du béton

	Humidité	35%	70%	90%
Teneur en chlorures				
0.0%		10675	11374	11986
0.4%		10832	11638	12204
1.0%		10824	11946	13017

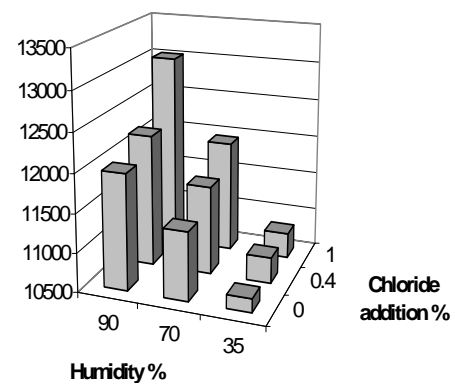


Figure 8-15: Amplitudes de la réflexion à la surface du béton

Le tableau 8-5 et la figure 8-16 représentent les amplitudes de la réflexion sur la feuille d'aluminium. On remarquera que sur la figure 8-16 les axes pour l'humidité et la teneur en chlorures ont été inversés par rapport à la figure 8-15. On aperçoit une nette atténuation de l'amplitude du signal avec l'augmentation de l'humidité et de la teneur en chlorures. La différence entre les amplitudes maximales et minimales de la réflexion atteint 48 % (rapportée au maximum) et est ainsi notablement plus grande que pour la réflexion à la surface du béton.

Tableau 8-5: Amplitudes de la réflexion sur la feuille d'aluminium

Teneur en chlorures	Humidité	35%	70%	90%
	0.0%		7812	6645
0.4%		6549	5523	5137
1.0%		5540	4730	4065

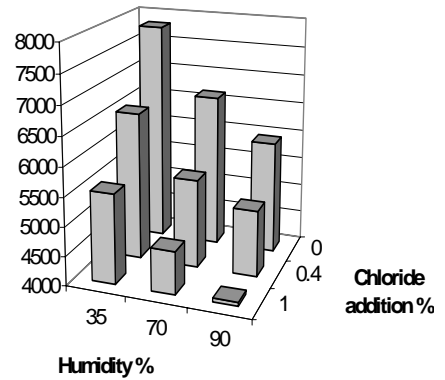


Figure 8-16: Amplitudes de la réflexion sur la feuille d'aluminium

Sur les ponts, le signal qui parvient sur la surface du béton est déjà amorti par le revêtement bitumineux. Cette atténuation dépend de l'état et de l'épaisseur du revêtement. Ainsi les amplitudes de réflexion absolues n'ont qu'une utilité limitée. Le quotient des amplitudes de réflexion à la surface du béton et sur la feuille d'aluminium devrait être indépendant de l'atténuation au sein du revêtement bitumineux. En effet, ces deux paramètres ont un comportement opposé. De plus, ce quotient dépend plus fortement de l'association de l'humidité et de l'adjonction de chlorures que les différentes amplitudes de réflexion elles-mêmes. Le tableau 8-6 et la figure 8-17 montrent les valeurs de ce quotient. Ce quotient présente une dépendance en majeure partie régulière aussi bien par rapport à l'humidité que par rapport à l'adjonction de chlorures. La différence entre les quotients maximum et minimum est de 57% (rapportée au maximum). Ainsi le quotient semble constituer une approche prometteuse. Dans la suite de ce rapport cette approche est désignée par «méthode du quotient».

Tableau 8-6: Quotient des amplitudes de réflexion surface du béton/feuille d'aluminium

	Humidité	35%	70%	90%
Teneur en chlorures				
0.0%		1.37	1.71	2.02
0.4%		1.65	2.11	2.38
1.0%		1.95	2.53	3.20

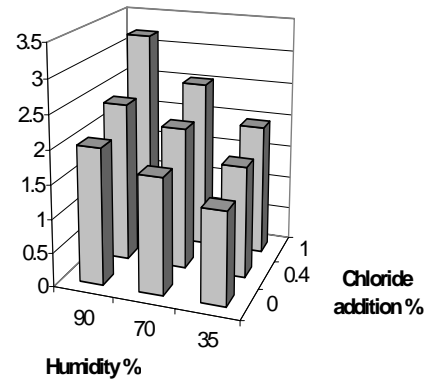


Figure 8-17: Quotient des amplitudes de réflexion surface du béton/feuille d'aluminium

8.4 Examen radar avec antennes couplées

Les mesures pour l'analyse de la vitesse de propagation ont été réalisées avec des antennes couplées. Les antennes ont été posées directement sur la surface du béton puis la distance entre l'émetteur et le récepteur a été augmentée par pas de mesure de 1 cm de 0.12 m à 0.62. Le principe de mesure est représenté sur la figure 8-18.

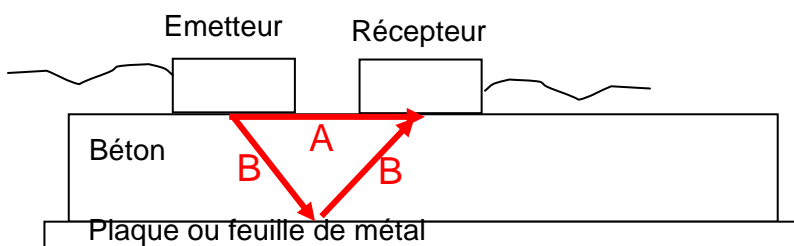


Figure 8-18: Disposition de la mesure

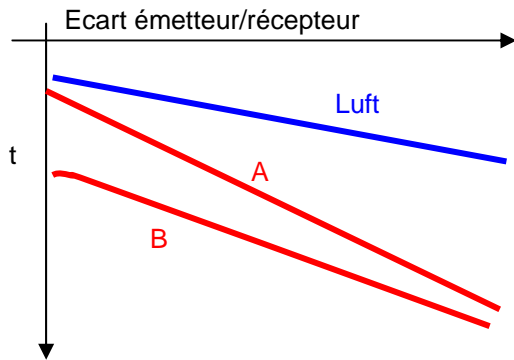


Figure 8-19: Principe de mesure



Figure 8-20: Mesures avec écart variable entre émetteur et récepteur

Avec la variation de la distance entre l'émetteur et le récepteur, la durée de parcours du signal varie elle aussi pour l'onde aérienne (propagation directe entre émetteur et récepteur), pour l'onde directe dans le béton (désignation A dans la figure 8-19) et pour la réflexion sur la feuille d'aluminium (désignation B sur la figure 8-19). Ce type d'enregistrement permet d'analyser la vitesse de propagation du signal dans le béton. L'exécution pratique de la mesure est montrée sur la photo de la figure 8-20. A côté de cela, on a encore effectué une mesure dans l'air après chaque mesure sur la plaque de béton. Comme la vitesse de propagation du signal dans l'air est connue et constante, elle permet de contrôler et de corriger si nécessaire des effets parasites comme une dérive de l'appareillage.

D'une manière générale, cette forme d'analyse de la vitesse de propagation réagit de manière très sensible à la moindre erreur dans la fixation du temps zéro. De plus, dans le cas présent, la faible épaisseur des échantillons pouvait provoquer une superposition des signaux. Un exemple de vérification d'une dérive de l'appareil est donné sur la figure 8-21. Les données enregistrées dans l'air avant et après la mesure sur une échantillon sont représentées par une ligne bleue et par une ligne rouge. La seconde mesure indique une vitesse de propagation dans l'air trop élevée de 3% mais la dérive de l'appareil entre les deux mesures reste cependant négligeable.

Tableau 8-7: Appareils et paramètres d'enregistrement

Appareil radar	GSSI SIR-20
Antennes	GSSI modèle 5100
Hauteur des antennes au-dessus du béton	0.00m
Traitement des données durant la mesure	aucun
Ecart émetteur récepteur	0.12m – 0.62m

1. C:\NEMPADATEN\REFLEXDATEN\LCL-V\PROCDATA\AIR-90-1001.02T / traces: 5 / samples: 1024

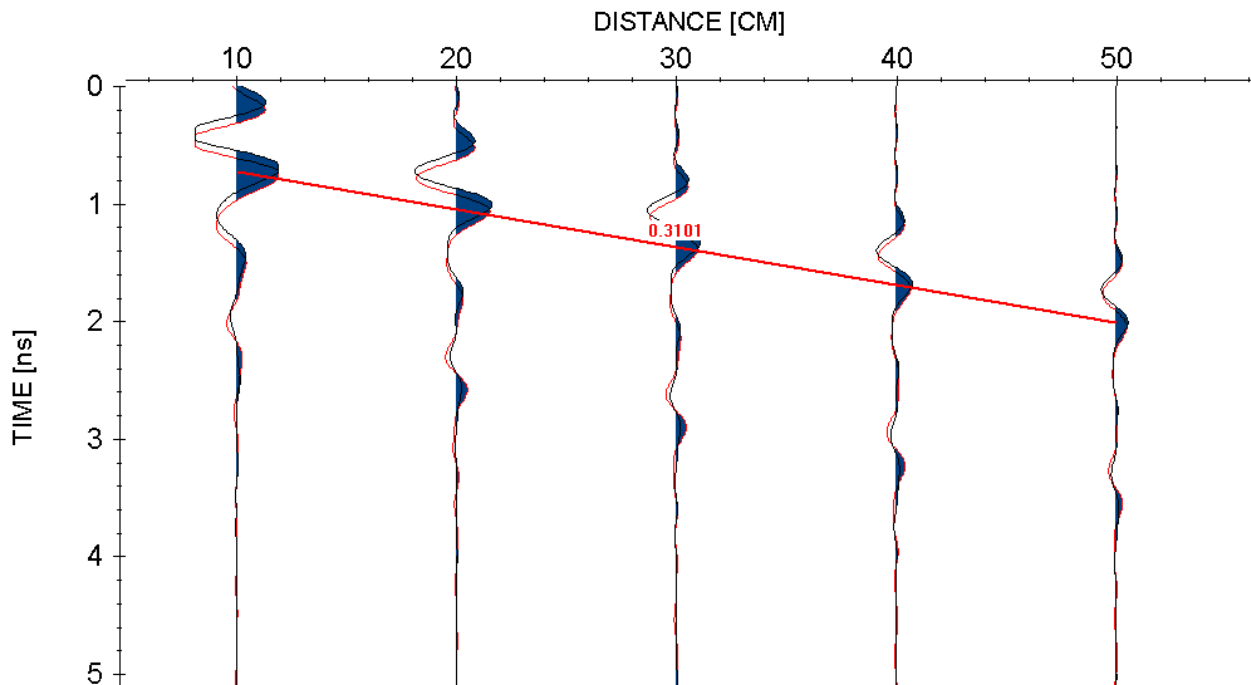


Figure 8-21: Mesures de contrôle dans l'air, distance 0.1m à 0.5m, avant et après échantillon 1

Les figures 8-22 à 8-25 montrent à gauche l'enregistrement radar et à droite le spectre de vitesses correspondant. Le tableau 8-8 donne une vue d'ensemble des vitesses de propagation et la figure 8-26 le graphique correspondant. Il semble qu'il y ait bien une diminution des vitesses avec l'augmentation des teneurs en eau et en chlorures mais celle-ci est relativement faible. La différence entre la vitesse maximale et minimale est de 11% (rapportée au maximum). Ainsi l'analyse des vitesses fournit un résultat moins net que l'analyse de l'atténuation. Dans la pratique cette analyse est rendue encore plus difficile par la présence du revêtement bitumineux.

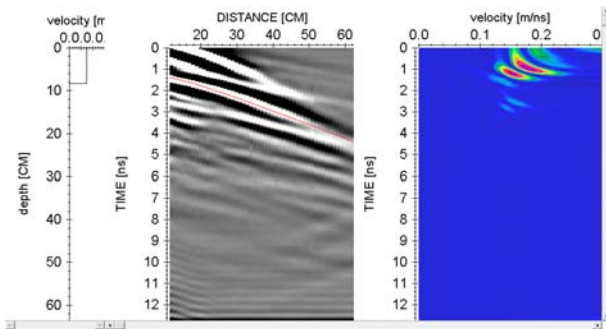


Figure 8-22: Echantillon 1

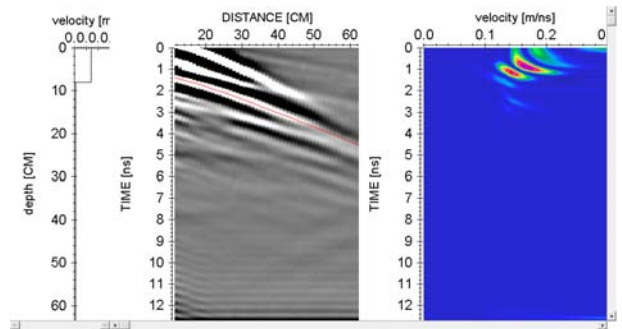


Figure 8-23: Echantillon 3

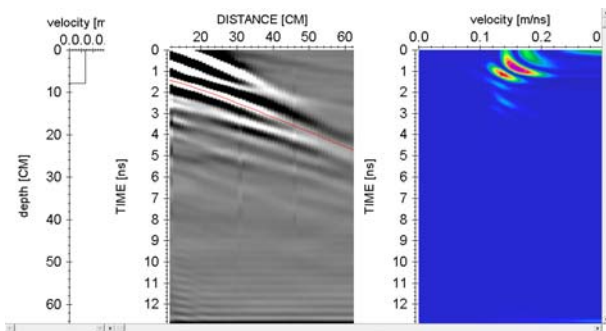


Figure 8-24: Echantillon 7

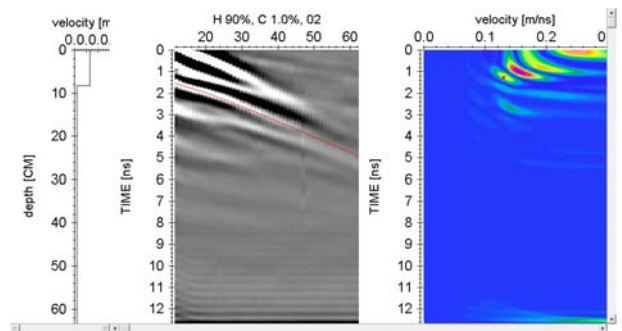


Figure 8-25: Echantillon 9

Table 8-8: Vitesses déterminées (* 10⁸ m/s)

	Humidité			
Teneur en chlorures		35%	70%	90%
0%		1.48	1.43	1.44
0.40%		1.47	1.40	1.37
1%		1.35	1.31	1.31

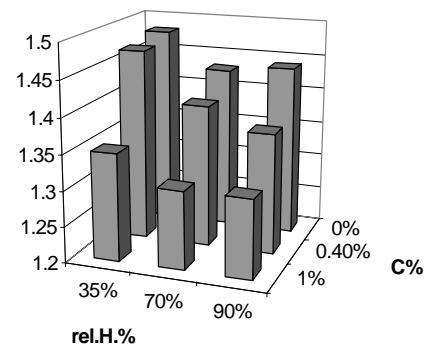


Figure 8-26: Vitesses de propagation (* 10⁸ m/s)

8.5 Conclusions tirées des essais en laboratoire

L'augmentation du quotient avec l'augmentation de l'humidité d'entreposage dans la figure 8-17 peut être attribuée d'une part à la teneur en eau plus élevée du béton et d'autre part à une structure plus dense de ce dernier (meilleure hydratation du béton en présence d'une humidité de l'air élevée). Les résultats acquis ici ne permettent pas de discerner lequel de ces effets est responsable de l'atténuation du signal radar, puisque ces deux effets influencent les résultats de mesure dans le même sens. De plus, la teneur en humidité sous le revêtement et l'étanchéité des ponts, ne devrait guère varier avec une ampleur aussi élevée que celle de ces essais de laboratoire. On peut admettre que sur les ponts l'humidité peut tout varier dans une plage de 70 - 100 % et qu'ainsi l'influence de l'humidité sur l'atténuation du signal radar est là encore moins discernable.

Comme le montre la figure 8-6, la résistance à la compression du béton diminue avec l'augmentation de la teneur en chlorures. Ainsi si la résistance à la compression, et donc la densité du béton, jouait un rôle déterminant dans l'atténuation du signal radar, le quotient devrait alors diminuer avec l'augmentation de la teneur en chlorures. Comme cela est exactement l'inverse, ainsi que le montre la figure 8-17, les chlorures doivent exercer une influence beaucoup plus grande que la résistance à la compression. Les différences dans l'absorption d'eau du béton avec l'augmentation de la teneur en chlorures pour une humidité d'entreposage constante (cf. figure 8-7) sont trop faibles pour avoir une influence décisive sur le quotient. Si cela était le cas, les différences du quotient découlant des variations de l'humidité d'entreposage devraient être notablement plus élevées. Ces considérations amènent à la conclusion que l'augmentation du quotient avec l'accroissement de la teneur en chlorures du béton ne peut être essentiellement due qu'aux chlorures.

En résumé on peut conclure que l'atténuation du signal radar permet de localiser les teneurs élevées en chlorures dans le béton. L'influence exacte de l'humidité demeure peu claire. Il faut toutefois relever que, du fait des propriétés hygroscopiques des chlorures, l'humidité et les chlorures ne sont jamais totalement inséparables.

9 Pont sur la Denève

9.1 Indications fournies

- Plans du pont à diverses échelles
- Coordonnées des axes du pont
- Coordonnées d'un point de mensuration voisin pour la station de base GPS

Les figures 9-1 et 9-2 montrent deux vues du pont.



Figure 9-1: Pont sur la Denève



Figure 9-2: Pont sur la Denève

9.2 Préparation des mesures

Les coordonnées GPS, fournies par le Canton de Vaud sous forme de fichier ASCII, ont été utilisées comme base pour l'orientation sur le pont. Ces données ont tout d'abord été importées dans le programme « Trimble Geomatics Office » (logiciel pour le traitement des données GPS) à l'aide duquel on a calculé dans un premier temps des lignes parallèles espacées d'un mètre sur toute la longueur du pont. A l'aide du logiciel on a tracé une courbe passant par les points d'une ligne le long de laquelle on pouvait enregistrer les données radar. Pour plus de clarté, et afin d'éviter des erreurs, chaque courbe=ligne de mesures a été exportée séparément et mise en mémoire dans un fichier. Les lignes de mesures ont été transférées sous format image sur le contrôleur GPS et étaient ainsi disponibles comme carte de fond des points de trace sur l'objet. La figure 9-3 montre toute les lignes de mesures réunies sur une seule image. Les désignations utilisées dans ce rapport différencient les deux chaussées Est et Ouest et la numérotation des

lignes de mesures débute à un mètre de distance de l'axe du pont. Exemple: Ligne-2-est = chaussée Est, 2 m à partir de l'axe du pont

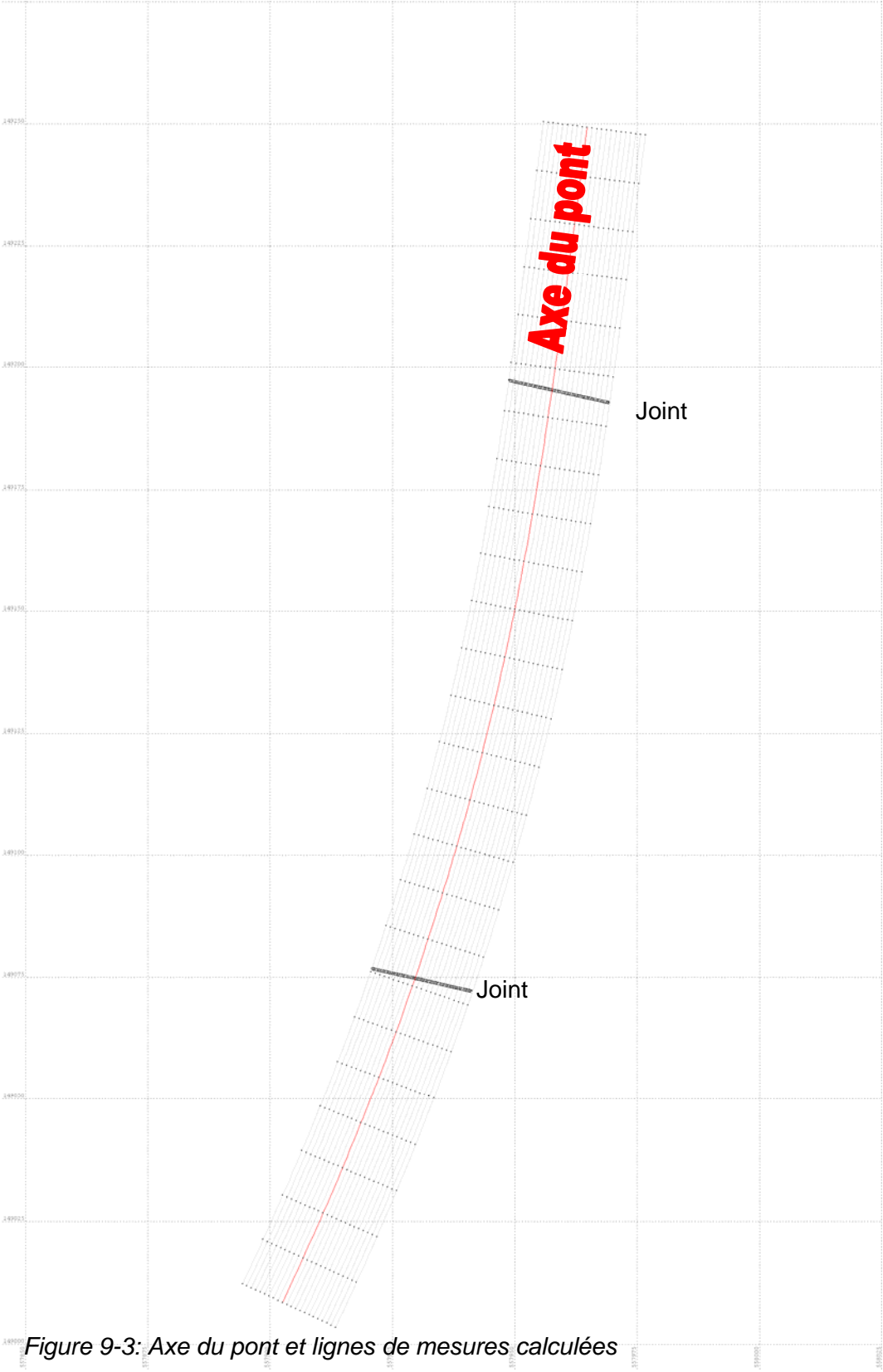


Figure 9-3: Axe du pont et lignes de mesures calculées

9.3 Exécution des mesures

Les mesures radar ont été effectuées le 25 octobre 2005 entre 8.35 et 14.30 heures par temps sec. Le véhicule équipé d'un GPS (figure 9-4) a été conduit le long des lignes de mesures prévues. Les voies où les mesures avaient lieu étaient fermées à la circulation. Lors d'arrêts en plusieurs points de chaque ligne on a procédé à la mesure des coordonnées GPS et ces points ont été marqués sur les enregistrements radar pour une mise en relation ultérieure.



Figure 9-4: Avant du véhicule de mesures avec les antennes radar (flèche rouge) et l'antenne GPS (flèche jaune)

Lignes de mesures enregistrées:

- 15 lignes de mesures parallèles sur toute la longueur du pont

Deux lignes de mesures prévues n'ont pas été mesurées car elles se trouvaient entre deux voies de circulation et auraient demandé un déplacement complet du dispositif de barrage de la circulation.

Tableau9-1: Appareils utilisés

	Modèle	Fabricant
Antennes cornets	4205	GSSI
Appareil radar	SIR 20	GSSI
Montage mobile		EMPA
Système GPS		Trimble

Tableau 9-2: Paramètres d'enregistrement

Vitesse de déplacement:	10 km/h
Longueur des traces:	20 ns
Traces par mètre:	40
Traitement des données durant la mesure:	aucun

Responsable des mesures radar: Johannes Hugenschmidt, EMPA

Responsable des mesures GPS: Roman Mastrangelo, EMPA

Barrage des voies de circulation: Département des infrastructures du Canton de Vaud, Marco Benassi

9.4 Traitement des données

Les données brutes ont été soumises aux séquences de traitement suivantes:

- Correction de longueur à l'aide des points GPS: cette étape est nécessaire car les distances enregistrées à l'aide de la roue d'arpenteur ne sont pas suffisamment précises.
- Filtre passe-bande: l'utilisation d'un filtre passe-bande améliore le rapport signal/bruit.
- Correction de la réflexion à la surface du revêtement au temps 0. Avec cette séquence, la surface de la route devient le point zéro.
- Formation de la moyenne en direction horizontale sur six points de mesures. Cette séquence améliore le rapport signal/bruit et réduit les fluctuations des amplitudes de réflexion.

9.5 Propositions concernant les emplacements de sondage

Après lecture des données radar et calcul des quotients des amplitudes de réflexion à la surface du béton et sur la couche des aciers d'armature la plus superficielle, on a proposé, après accord avec Monsieur Nendaz de la Section tunnels et grands ouvrages, deux emplacements de sondage à des fins de calibration. Ceci devait permettre en particulier d'obtenir une indication sur la valeur du quotient à partir de laquelle il fallait s'attendre à une haute concentration de chlorures ou d'humidité. Ces positions ont été choisies de manière à ce que le quotient soit situé pour l'un au voisinage de 4 et pour l'autre à une valeur nettement supérieure. La valeur de 4 a une importance par le fait qu'elle avait été utilisée dans les études antérieures comme valeur limite entre zones contaminées et zones non contaminées.

Tableau 9-3: Positions de sondage proposées

Direction	Nom	Latitude	Longitude
Sud	Sdw-01	149105.035	557934.789
Nord	Sdo-02	149162.889	557954.458

En même temps que les positions on a défini les paramètres à déterminer:

- Epaisseur du revêtement
- Profondeur de l'armature supérieure
- Détermination de la teneur en chlorures soluble dans l'acide sur quatre couches d'une épaisseur de 10 mm.

Les résultats des deux sondages sont donnés en annexe. Les figures 9-5 et 9-6 montrent les enregistrements radar effectués aux environs immédiats des positions de sondage.

1. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\deneve\PROCDATA\ID-W-04_04T / traces: 6934 / samples: 520

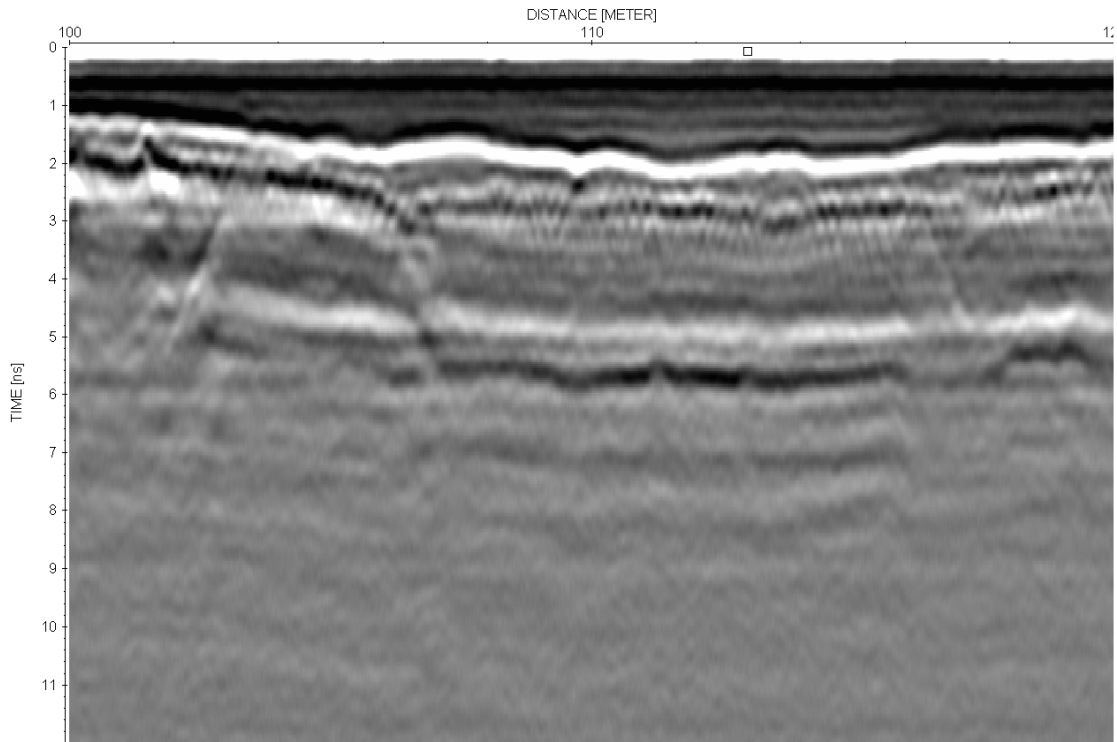


Figure 9-5: Extrait du fichier de données de la ligne Ouest-04, sondage à 110.00 m

1. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\deneve\PROCDATA\ID-0-02_04T / traces: 7543 / samples: 524

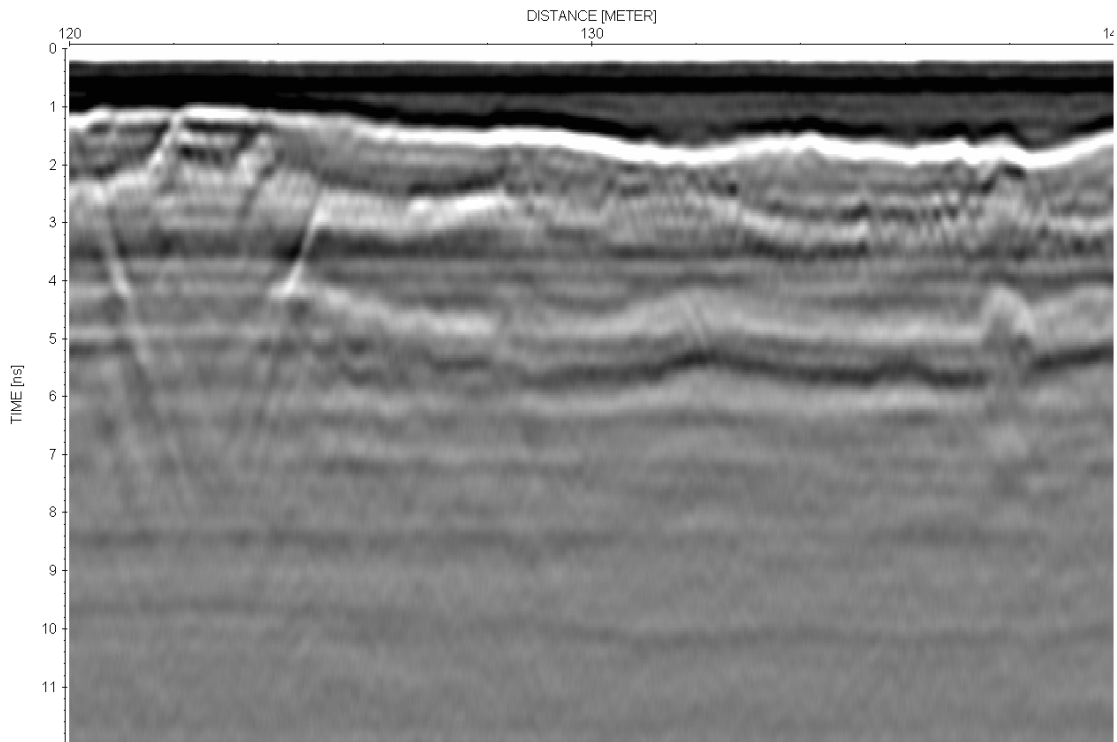


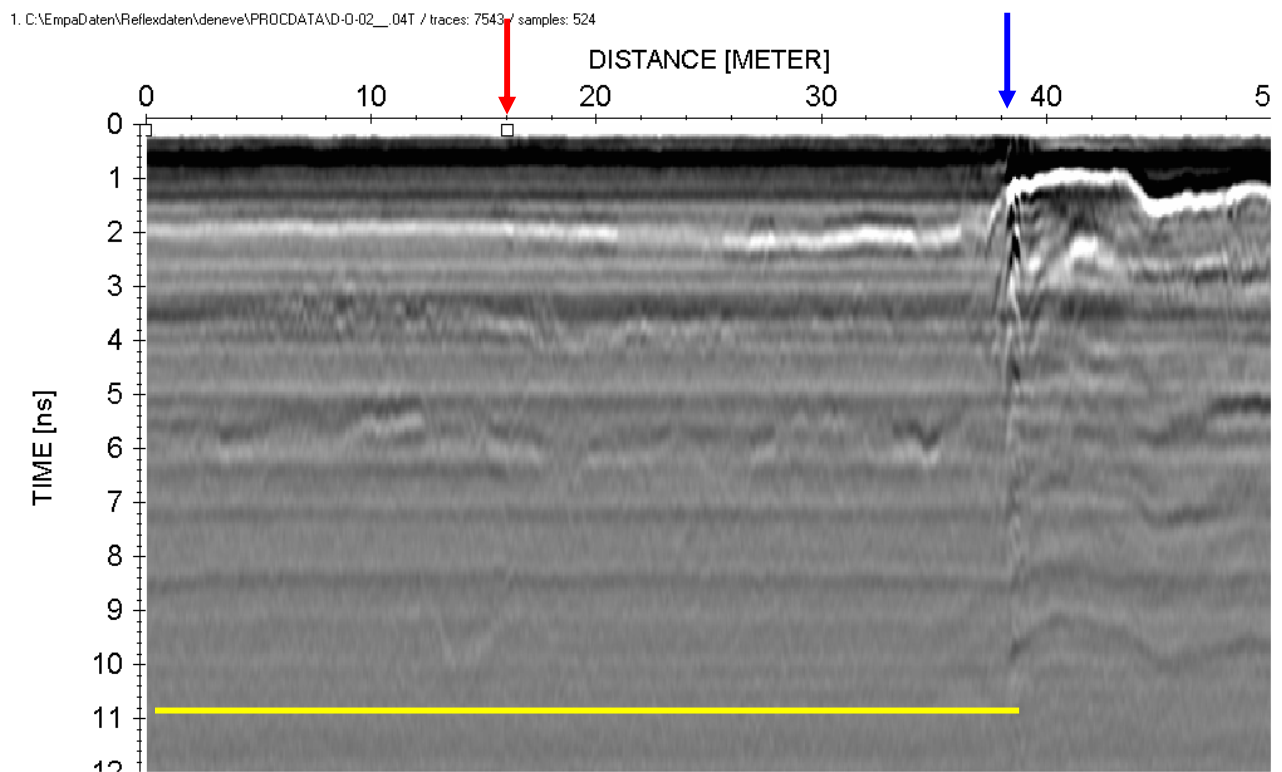
Figure 9-6: Extrait du fichier de données de la ligne Est-02, sondage à 130.00 m

9.6 Evaluation

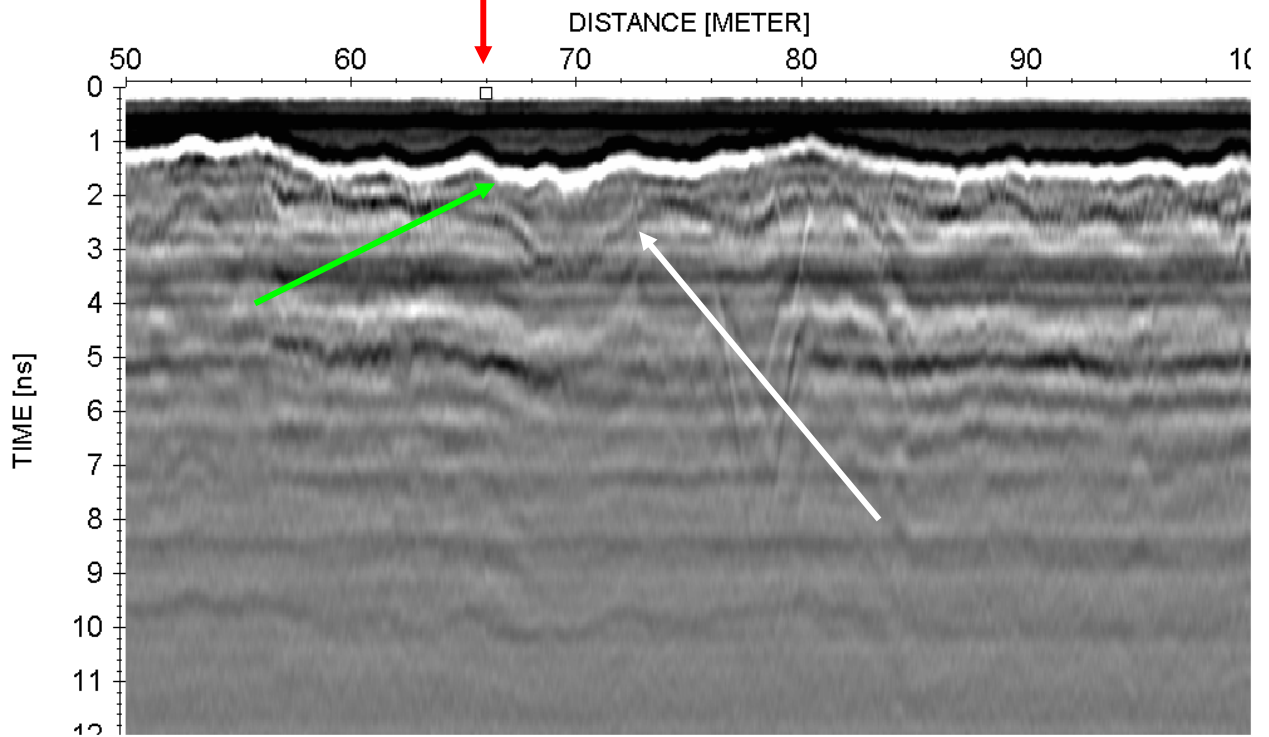
Exemple

La figure 9-7 montre les données enregistrées le long de la ligne de mesures 2-Est. Les marquages de différentes couleurs ont les significations suivantes:

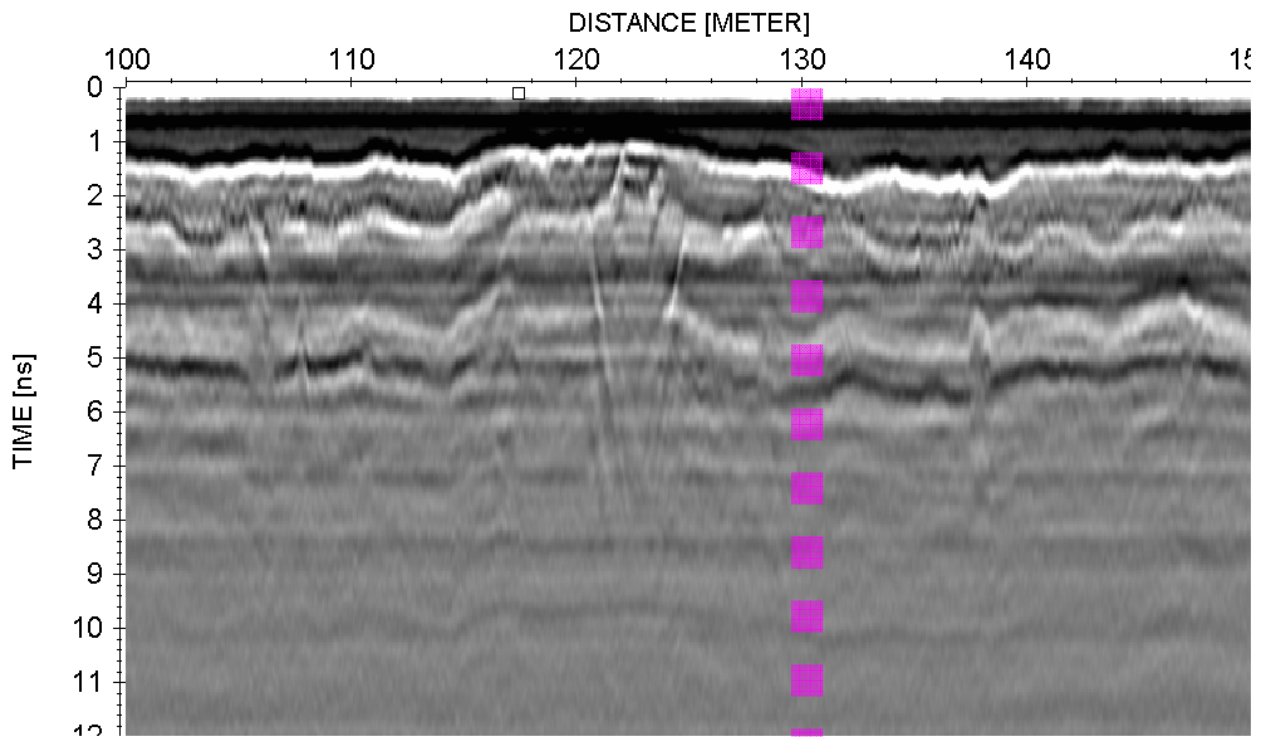
- Flèche rouge verticale; endroits où les coordonnées GPS ont été enregistrées lors d'un bref arrêt.
- Flèche bleue verticale: joint de chaussée
- Ligne jaune horizontale: zone non située sur le pont
- Flèche verte: réflexion à la surface du béton
- Flèche blanche: réflexion sur la couche d'armature la plus superficielle
- Ligne pointillée verticale magenta: position de sondage proposée



1. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\deneve\PROCDATA\D-0-02__04T / traces: 7543 / samples: 524



1. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\deneve\PROCDATA\D-0-02__04T / traces: 7543 / samples: 524



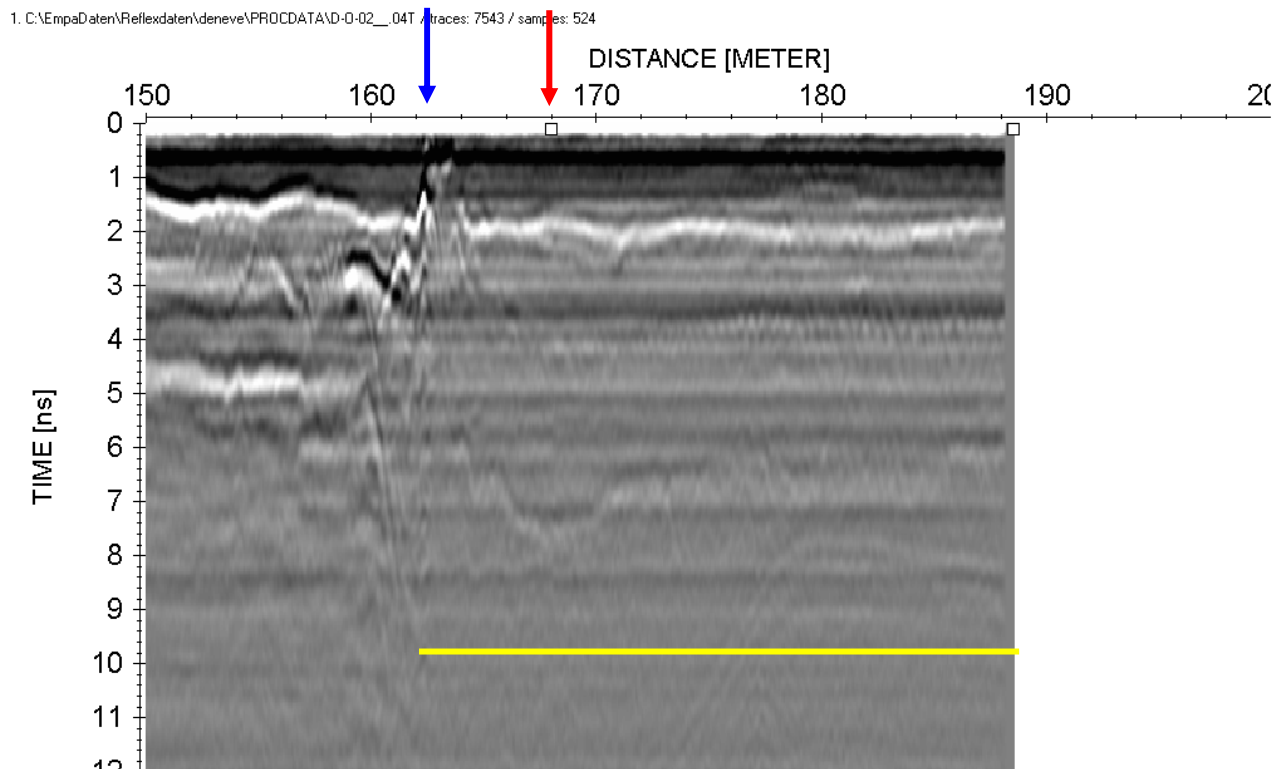


Figure 9-7: Exemple de données de la ligne-2-Est

Correction d'amplitude en fonction du temps de propagation

D'une manière générale, l'énergie du signal radar décroît avec l'augmentation de la profondeur. Ceci est dû, d'une part à l'atténuation dépendant du matériau et découle, d'autre part de considérations géométriques. L'atténuation dépendant du matériau est à la base des examens documentés dans ce rapport par lesquels on a étudié l'influence de l'humidité et des chlorures sur l'atténuation du signal radar dans le béton. Il va de soi, qu'un béton atténue aussi le signal radar même si son humidité n'est pas augmentée et qu'il n'est pas contaminé par des chlorures. Toutefois, on peut alors s'attendre à ce que cette atténuation soit plus faible. L'atténuation géométrique repose sur l'agrandissement de la surface traversée par l'énergie en fonction de la distance. Pour les signaux non directionnels, on peut admettre que la propagation a une forme sphérique et que la diminution de l'énergie est quadratique. Comme l'énergie est proportionnelle au carré de l'amplitude, il en résulte une diminution linéaire de l'amplitude en fonction de la distance.

La figure 9-8 montre la réflexion à la surface du béton (axe vertical) sur le Pont sur la Denève en fonction du temps de propagation du signal. Le résultat est représenté pour toutes les lignes de mesures sur la voie Berne. On devrait s'attendre à une augmentation des amplitudes de réflexion avec la diminution du temps de propagation, c.-à-d. une montée du nuage de points de la gauche en bas vers le haut à droite. Ceci n'est manifestement pas le cas. La cause peut être une atténuation variable à l'intérieur du revêtement bitumineux ou de fortes variations des concentrations de chlorures dans le béton

Si l'on avait observé une augmentation de l'amplitude de la réflexion avec une dispersion suffisamment faible avec la diminution du temps de propagation pour la surface du béton, ceci aurait éventuellement permis d'effectuer une correction de l'amplitude en fonction de la profondeur. Mais comme manifestement d'autres effets viennent se superposer à l'atténuation en fonction de la profondeur, on doit renoncer à cette correction.

Les mêmes considérations que pour la surface du béton peuvent être faites pour la réflexion sur la couche la plus supérieure de l'armature. Les figures 9-9- et 9-10 montrent les amplitudes de la réflexion en fonction du temps de propagation pour les lignes de mesures en direction Ouest et Est. Dans les deux cas on distingue une augmentation des amplitudes de la réflexion avec la diminution du temps de propagation, c.-à-d. que sur les deux diagrammes le nuage de points monte d'en bas à gauche vers le haut à droite. Ceci ressort encore mieux des deux droites de régression calculées à l'aide de la méthode des moindres carrés. La dispersion est toutefois considérable et on ne peut ainsi pas considérer qu'une correction d'amplitude calculée sur cette base améliorerait la qualité des résultats.

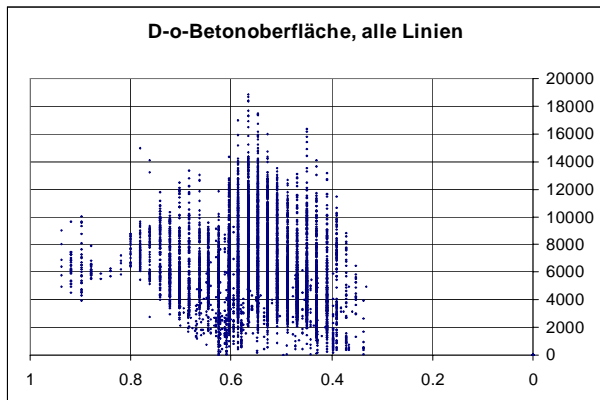


Figure 9-8: Amplitudes des réflexions à la surface du béton en fonction de la durée de propagation, Denève, voie Berne, toutes les lignes

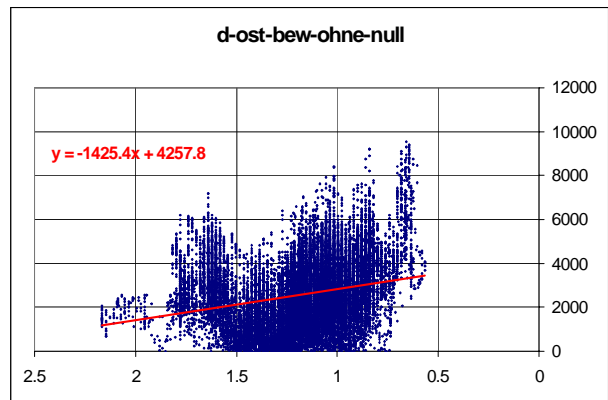


Figure 9-9: Amplitudes des réflexions sur la couche la plus superficielle de l'armature en fonction de la durée de propagation, voie Berne, toutes les lignes

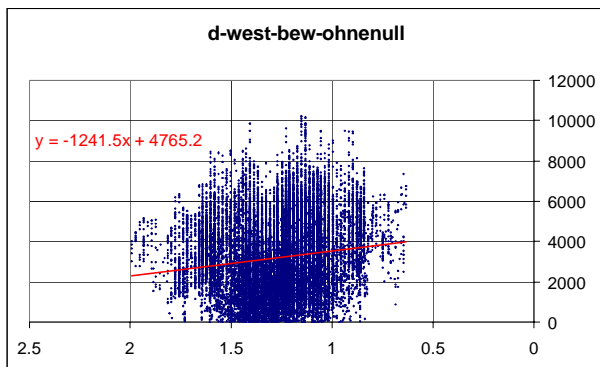


Figure 9-10: Amplitudes des réflexions sur la couche la plus superficielle de l'armature en fonction de la durée de propagation, voie Vevey, toutes les lignes

Quotient des amplitudes de réflexion surface du béton/couche supérieure de l'armature

Le calcul du quotient des amplitudes de réflexion surface du béton/couche supérieure de l'armature a été réalisé comme suit:

1. Sélection des maxima des réflexions à la surface du béton et sur la couche supérieure de l'armature
2. Remplacement des maximum de réflexion sur la couche supérieure de l'armature ayant des valeurs inférieures à 100 par la valeur „100“. Justification: éviter des divisions par zéro et éviter des valeurs extrêmes pour le calcul de la moyenne.
3. Calcul du quotient sur la longueur totale pour chaque point de mesure (distance entre points de mesure 0.025m)

4. Calcul de la moyenne glissante (+/- 1.0m) pour chaque point de mesure
5. Sélection des domaines où le quotient est supérieur à 4 ou pour lesquels on n'a pas pu calculer de quotient et établissement d'un plan pour l'ensemble du pont.

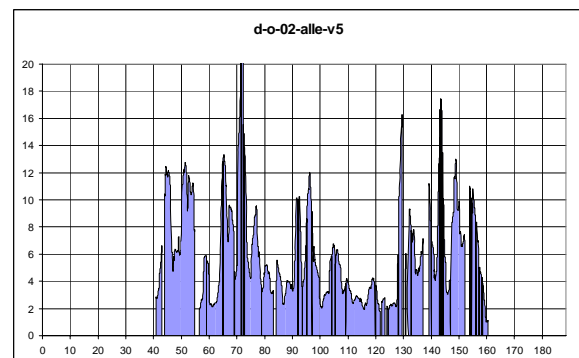
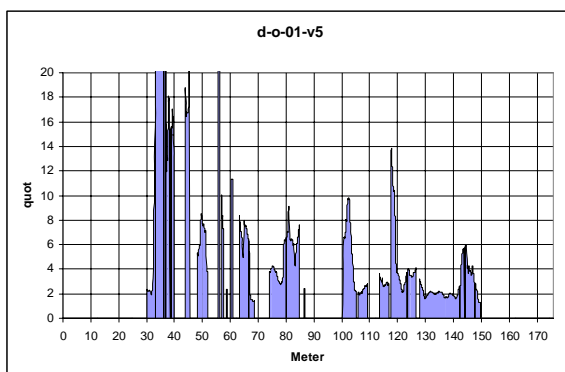
Sélection des domaines où le quotient est supérieur à 8 ou pour lesquels on n'a pas pu calculer de quotient et établissement d'un plan pour l'ensemble du pont.

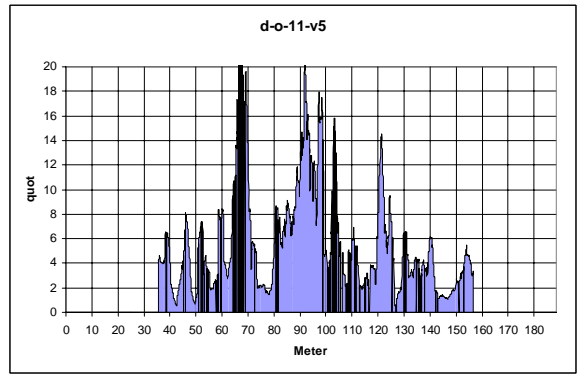
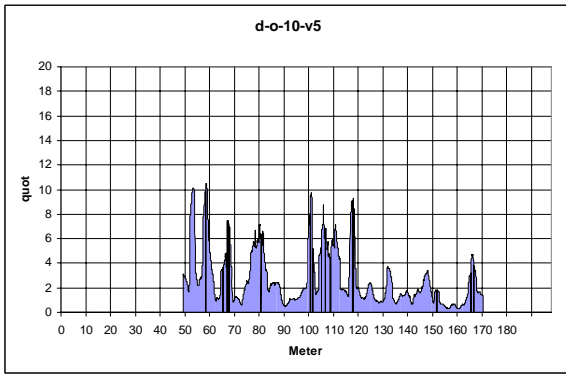
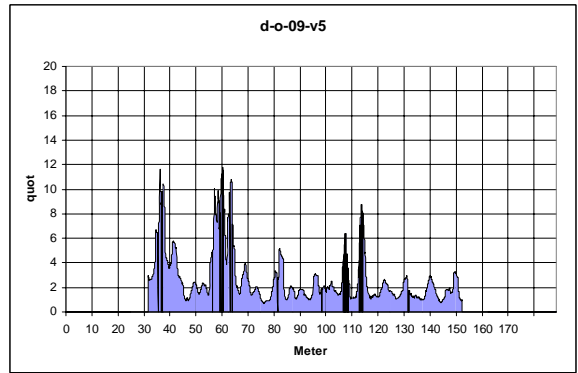
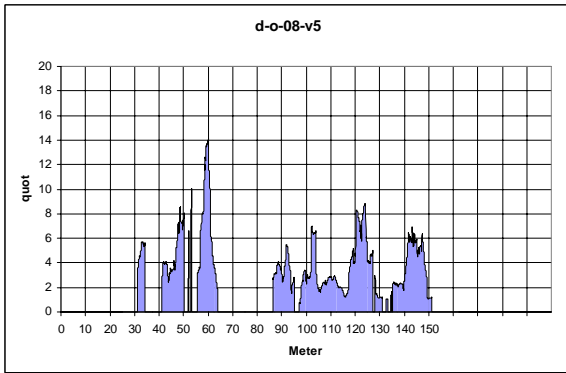
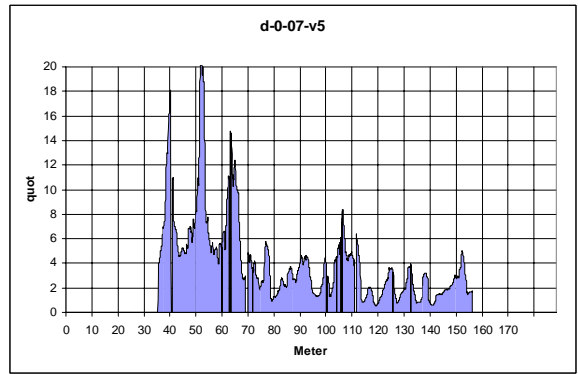
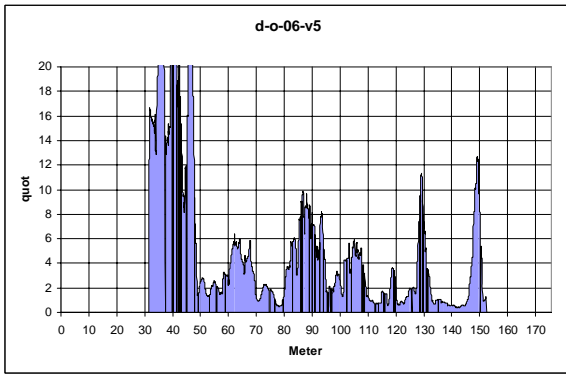
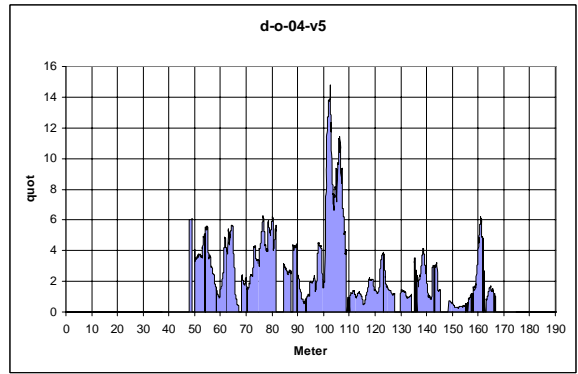
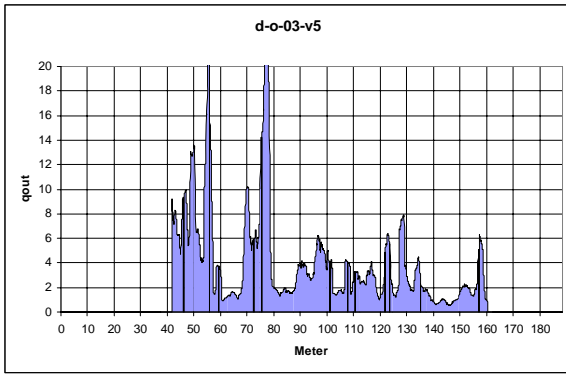
Sélection des domaines où le quotient est supérieur à 12 ou pour lesquels on n'a pas pu calculer de quotient et établissement d'un plan pour l'ensemble du pont.

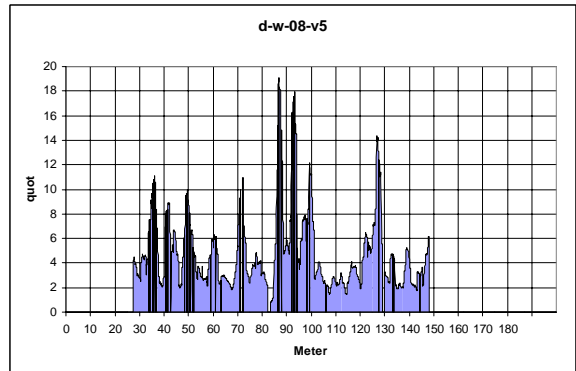
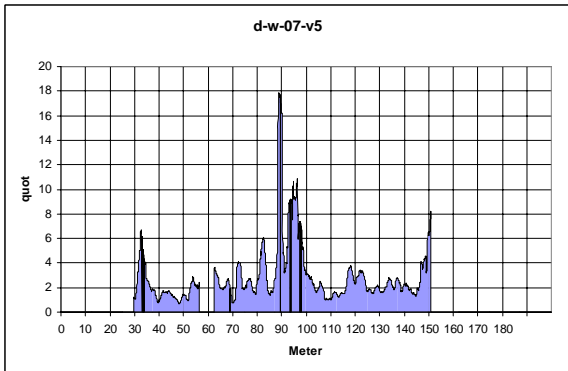
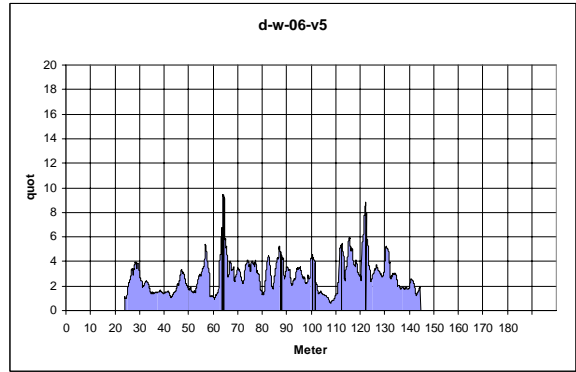
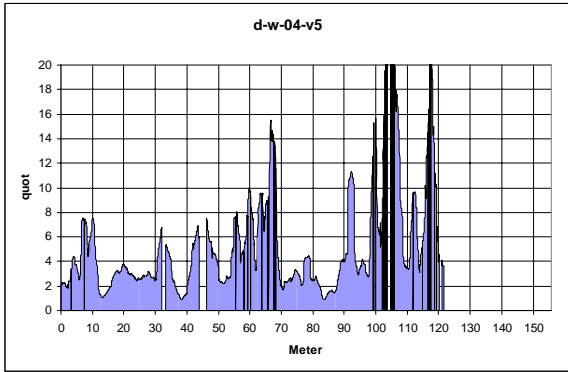
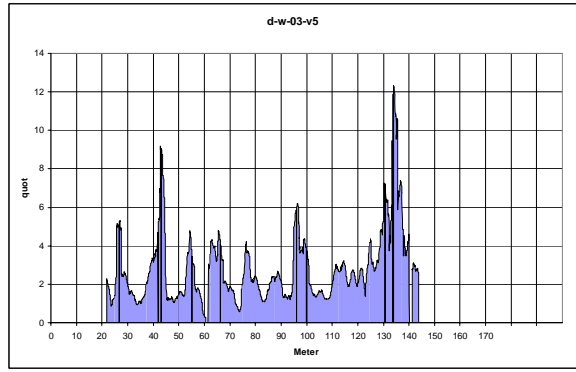
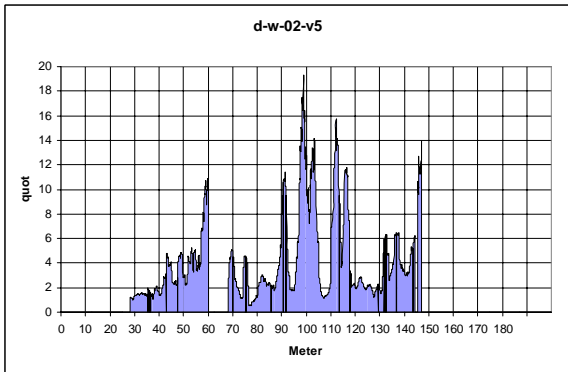
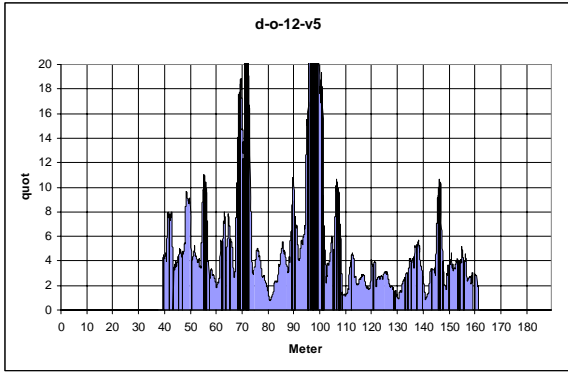
Justification pour la représentation des zones pour lesquelles le quotient n'a pas pu être calculé: très souvent on n'a pas pu calculer de quotient parce que l'atténuation dans le béton était à ce point élevée qu'aucune réflexion ne pouvait être déterminée sur la couche supérieure de l'armature.

6. Interprétation et délimitation des zones suspectes. Etablissement d'un plan pour l'ensemble du pont

La figure 9-11 montre les quotients calculés pour toutes les lignes de mesures sur la totalité de la longueur du pont. C'est à partir de ces valeurs que l'on a établi les plans reproduits sur les figures 9-13 à 9-16. La figure 9-12 montre un exemple sous forme agrandie du calcul des quotients pour la ligne 2-Est. Les zones situées avant et après le pont sont marquées en jaune et les joints de chaussée indiqués par une flèche bleue. Le sondage effectué sur cette ligne est marqué par une ligne en traitillé magenta. En quelques endroits il existe des lacunes dues au fait qu'il n'a pas été possible de calculer de quotient à ces endroits. Il existent plusieurs causes à cela, dont la plus fréquente est une couverture trop faible des fers d'armature est de sorte que la réflexion à la surface du béton n'est pas discernable de la réflexion sur la couche d'armature supérieure.







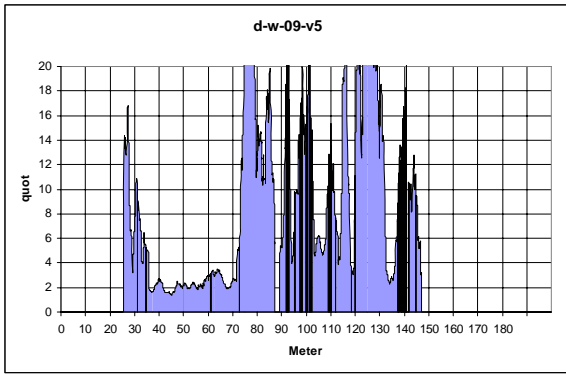
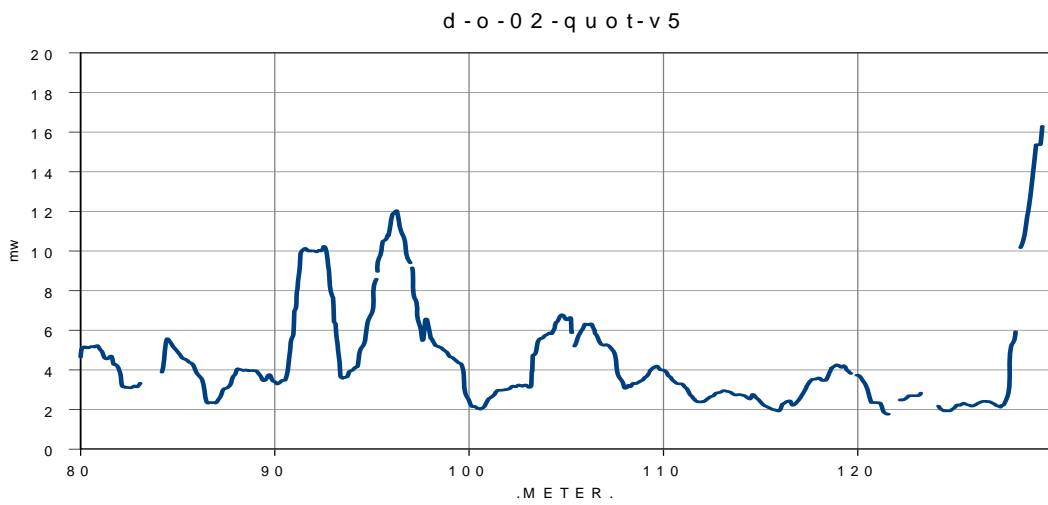
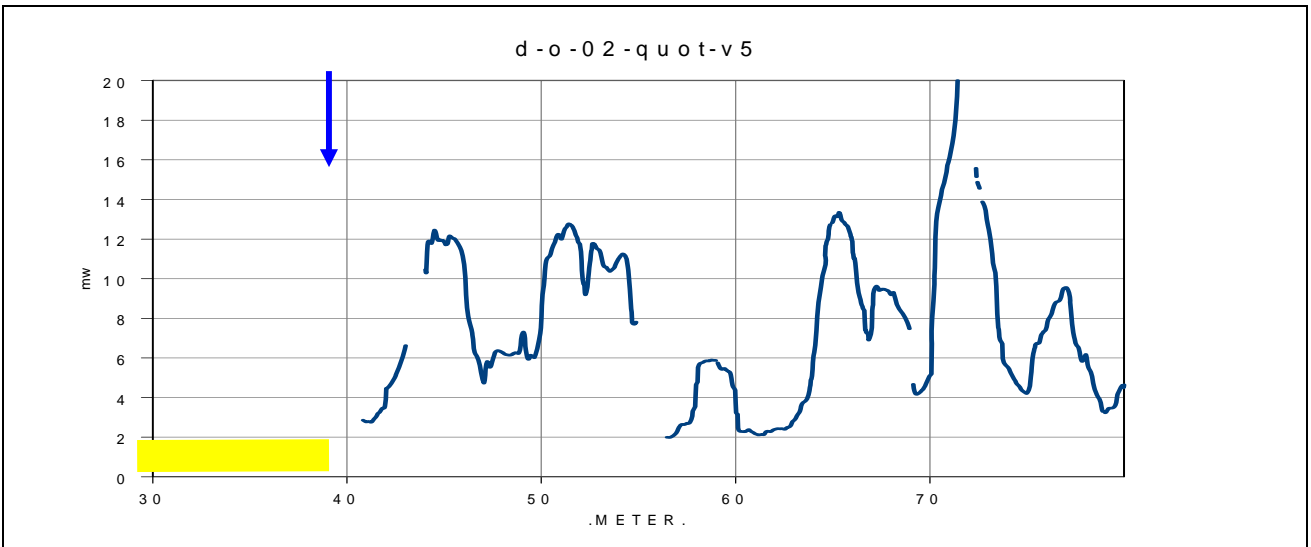


Figure 9-11: Quotients calculés pour l'ensemble des lignes de mesure



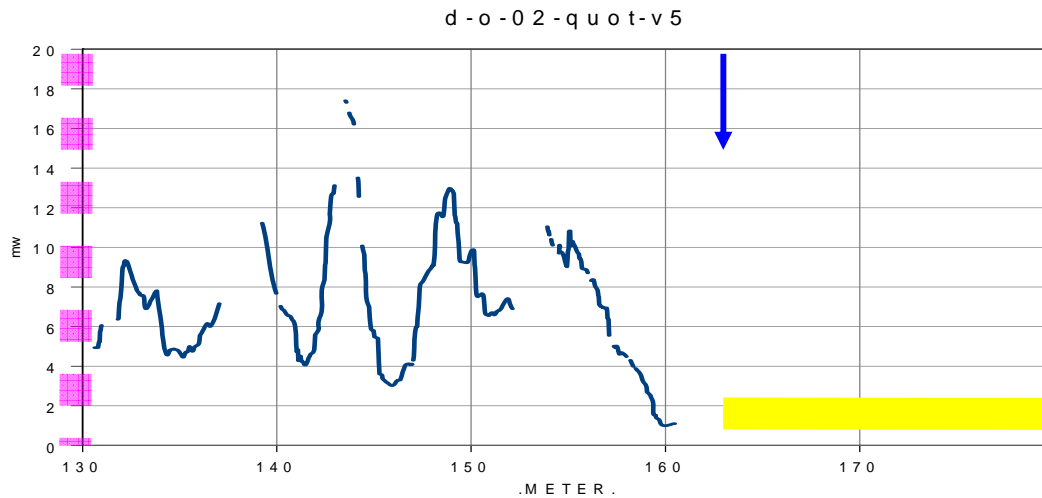


Figure 9-12: Quotient des amplitudes de réflexion surface du béton/couche supérieure de l'armature pour la ligne de mesures Est-02

9.7 Résultats

Les figures 9-13 à 9-16 montrent les résultats obtenus avec les différents quotients et sous forme interprétée. Les différentes couleurs ont les significations suivantes:

Tableau 9-1: Légende des figures 9-13 à 9-16

Couleur	Signification
noir	lignes de mesures prédéfinies
rouge	surfaces suspectes
vert	axe du pont
lila	pas de résultat pour les chlorures

Aucun résultat pour les chlorures n'a été obtenu en dehors du pont, au voisinage immédiat des joints de chaussée et en divers autres endroits. Dans ces derniers, ceci est à mettre au compte soit d'une trop faible couverture des aciers d'armature empêchant de discerner le signal de la couche supérieure de l'armature de celui de la surface du béton, soit à la mauvaise qualité du signal (signal non évaluable). Le résultat interprété (figure 9-16) repose sur le résultat avec une

valeur limite de 4 pour le quotient et diffère de ce dernier principalement parce que l'on a décidé pour les zones où aucun résultat n'avait pu être obtenu s'il s'agissait ou non d'une zone suspecte.

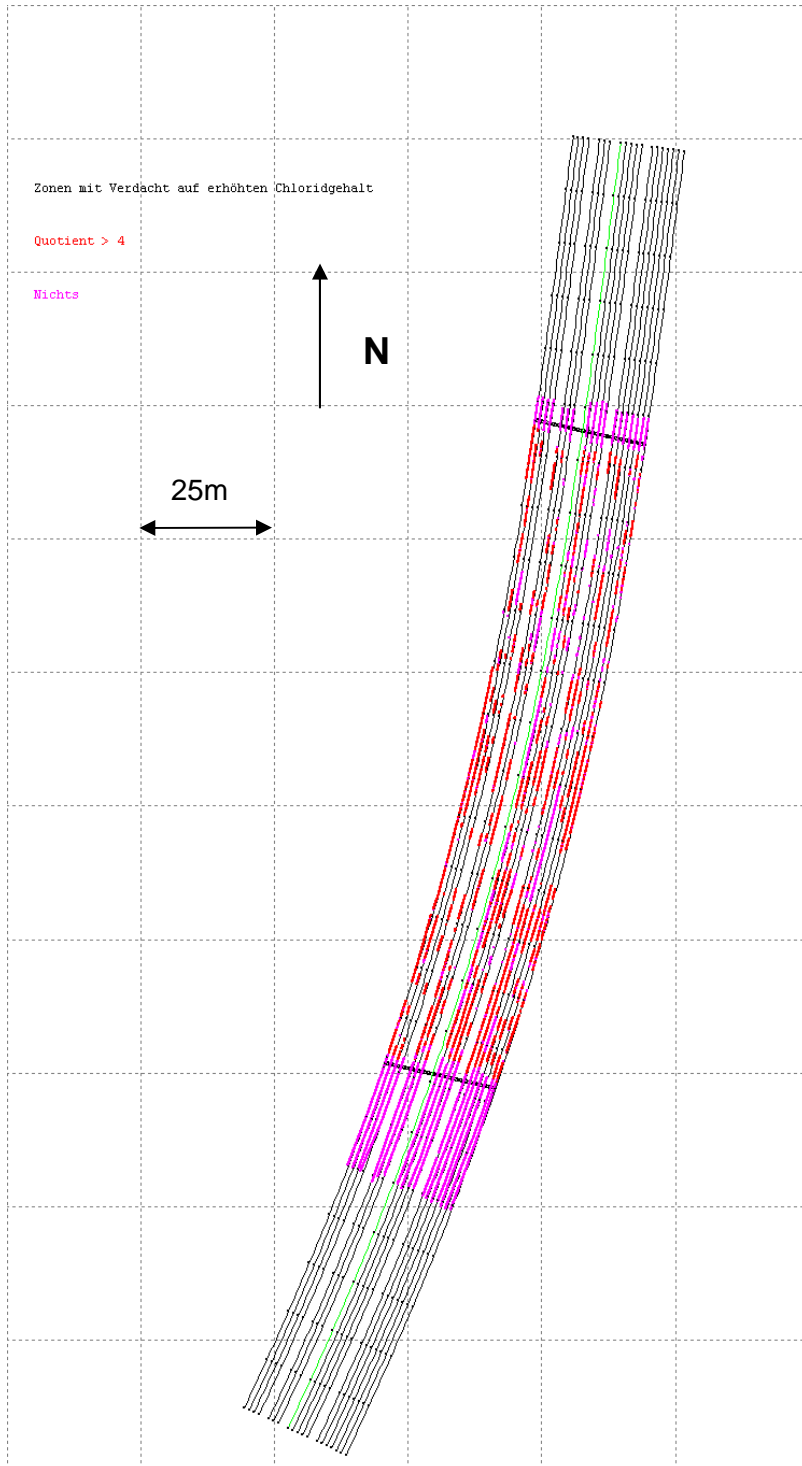


Figure 9-13: Résultat, radar, quotient ≥ 4 , sans interprétation

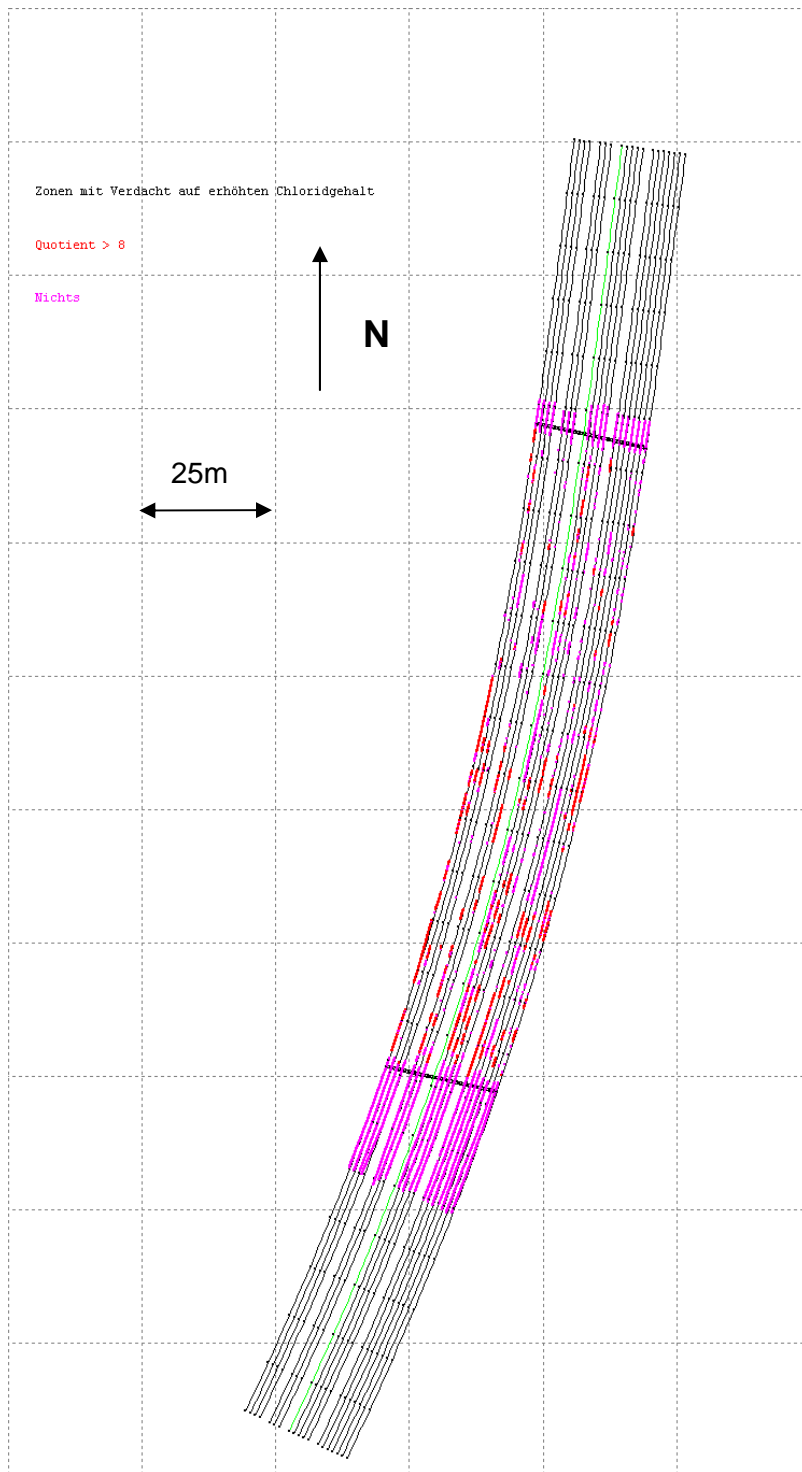


Figure 9-14: Résultat, radar, quotient = 8, sans interprétation

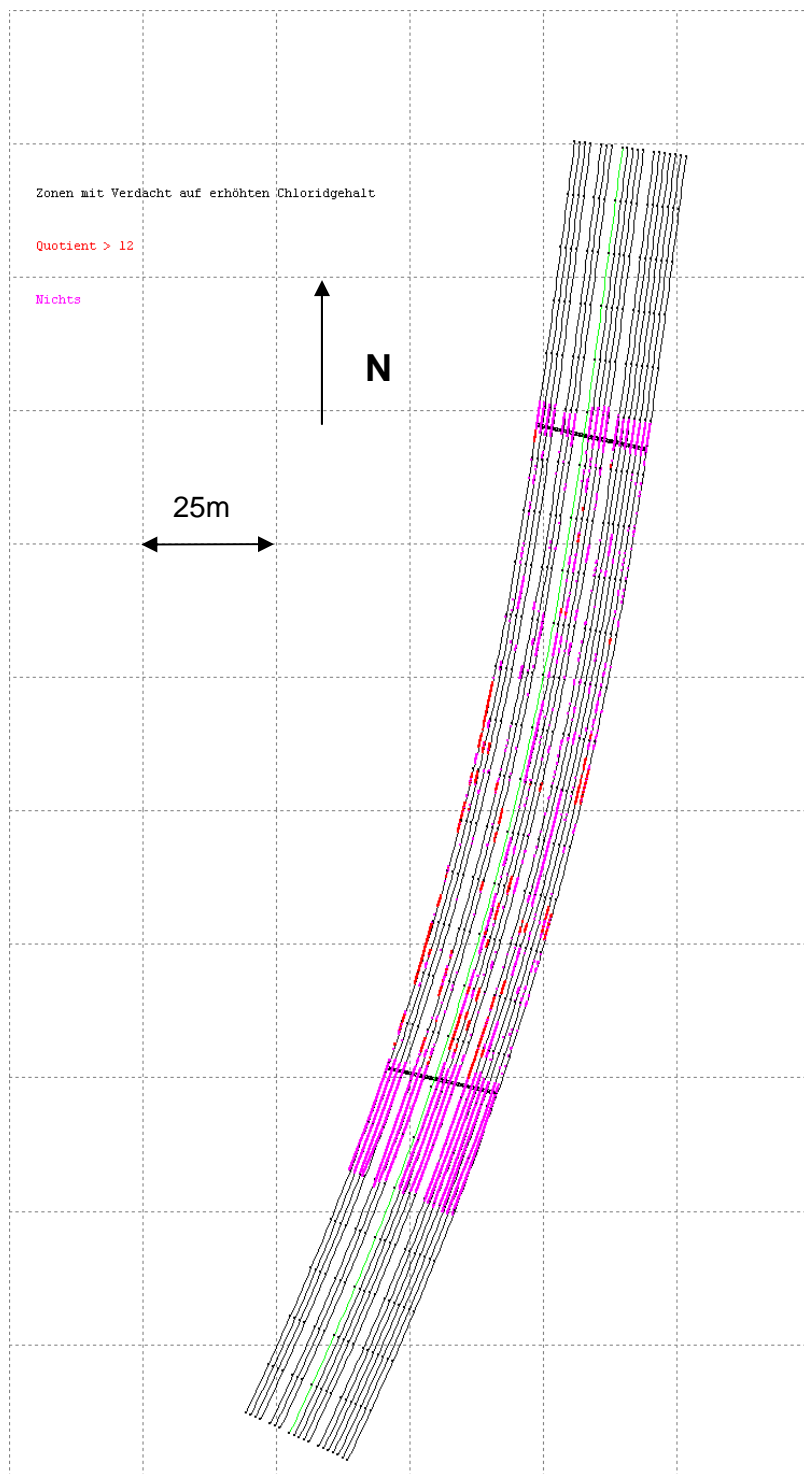


Figure 9-15: Résultat, radar, quotient ≥ 12 , sans interprétation

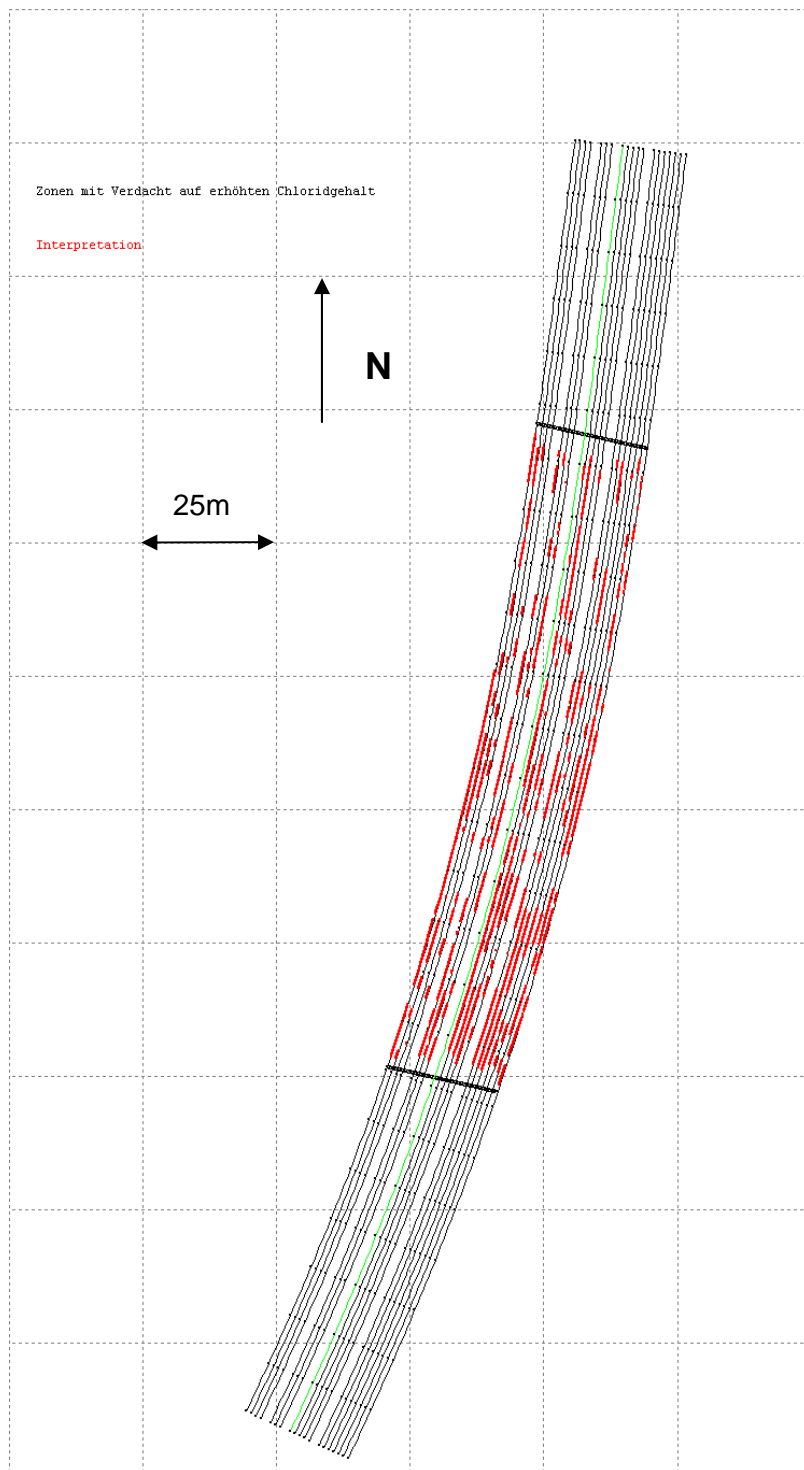


Figure 9-16: Résultat, radar, quotient ≥ 4 , avec interprétation

9.8 Comparaison entre résultats radar et réalité selon le relevé de l'état

Au cours du projet il est apparu qu'une campagne de sondages de grande envergure destinée à vérifier la qualité des résultats radar serait difficilement réalisable. La décision de modifier le plan du projet pour réaliser cette vérification à l'aide du **relevé de l'état** déjà existant (figure 9-17) ne s'est révélée que peu judicieuse. En effet, la majorité des sondages réalisés pour ce relevé avaient été effectués sur la face inférieure du pont. Seules 6 fenêtres de sondage avaient été pratiquées sur la face supérieure et de plus leur position n'était pas connue avec précision.

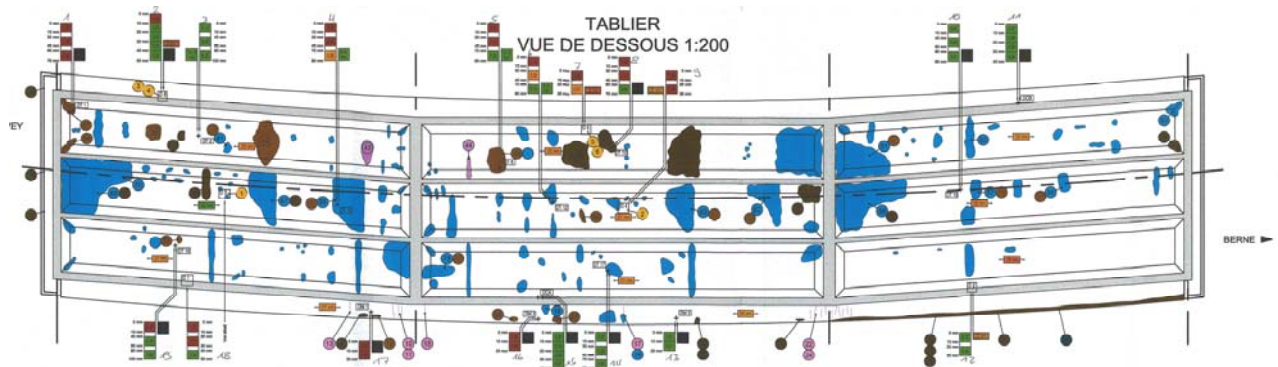


Figure 9-17: Relevé de l'état du Pont sur la Denève (pas à l'échelle)

La figure 9-18 montre une combinaison des résultats radar avec le relevé de l'état. Les 6 fenêtres de sondage sont indiquées par des carrés jaunes. Le problème posé par la localisation pas suffisamment précise est expliqué sur l'exemple de la fenêtre de sondage D2. Sur l'agrandissement de la figure 9-19, le sondage est à nouveau indiqué par un carré jaune. Ce sondage a révélé des teneurs en chlorures légèrement élevées (0.12%) mais qui demeurent sans risque. Il se situe selon le géoradar en dehors, mais toutefois à proximité immédiate, des surfaces suspectées de présenter de hautes teneurs en chlorures. Pour pouvoir réaliser dans une telle situation une comparaison valable entre les résultats des sondages et ceux du radar, il serait nécessaire de connaître la position exacte du sondage.

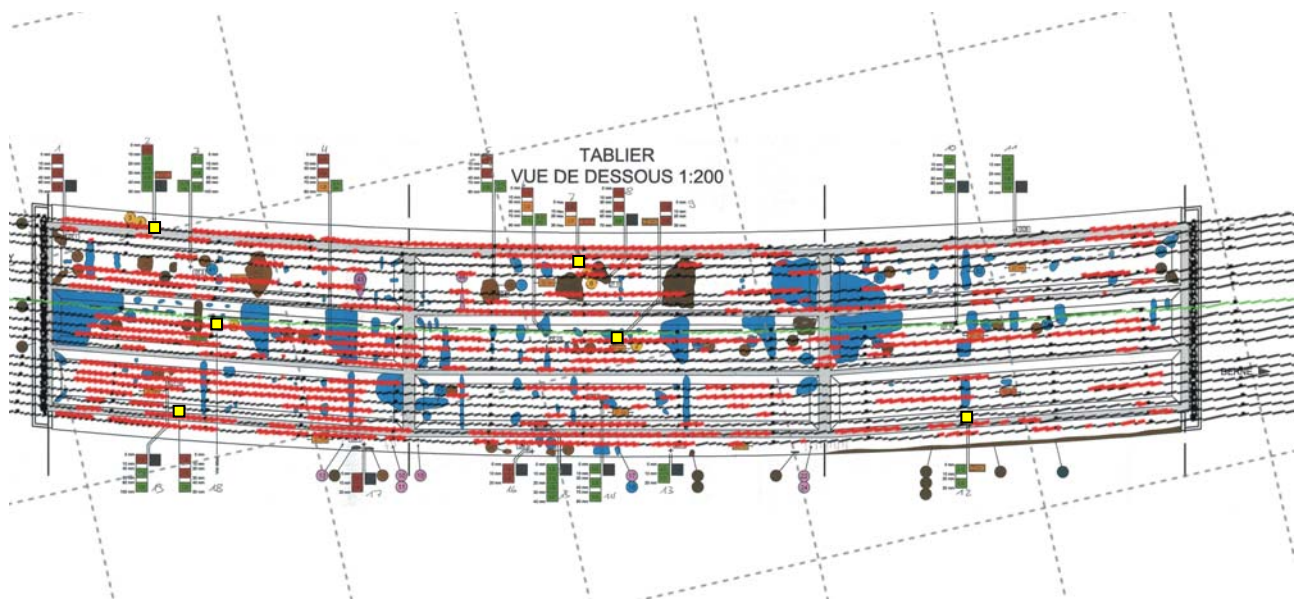


Figure 9-18: Comparaison des résultats radar interprétés avec le relevé d'état du Pont sur la Denève (pas à l'échelle)

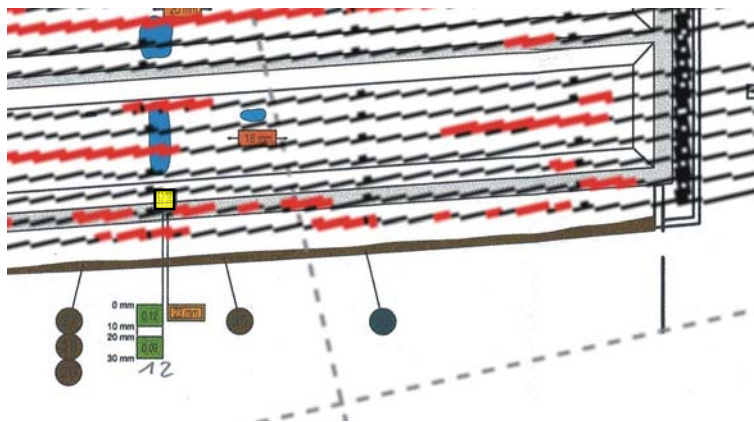


Figure 9-19: Détail des environs de la fenêtre de sondage D2

Si, malgré les défauts cités ci-dessus, on procède tout de même à la comparaison entre les résultats des sondages et les résultats radar interprétés (tableau 9-4), on obtient une concordance de 100%. En effet, la situation est correctement déterminée avec le radar pour toutes les fenêtres de sondage. Si l'on renonce à l'interprétation ou que l'on augmente la valeur limite pour les quotients, il y a alors une (quotients limites 4 et 8) ou deux (quotient limite 12) positions pour lesquelles les résultats radar et les résultats des sondages ne concordent pas.

Tableau 9-4: Comparaison résultats radar avec fenêtres de sondage selon relevé de l'état

Dés.	Fen.	Radar-int	Comp-int	Radar-4	Comp-4	Radar-8	Comp-8	Radar-12	Comp-12
D6	1	1		1		1		0	
D5	1	1		1		1		1	
D4	1	1		1		1		1	
D2	0	0		0		0		0	
D3	1	1		0		0		0	
D1	1	1		1		1		1	

Dés. = désignation du sondage, Fen.= résultats du sondage: 0 si teneur en chlorures < 0.3% et 1 si > 0.3%, Radar-int = résultat radar interprété, Comp-int= comparaison entre résultat radar interprété et fenêtre de sondage (vert si concordance, sinon rouge), Radar-4 = résultat radar avec valeur limite 4 sans interprétation, Comp-4 = comparaison entre résultat radar avec valeur limite 4 et fenêtre de sondage, etc.

Au mois de janvier 2007 il a été décidé de procéder à 12 sondages supplémentaires sur le pont avant sa réfection. Ces sondages devaient permettre de pallier aux insuffisances mentionnées ci-dessus. Malheureusement, ces sondages se sont révélés impossibles à réaliser dans la suite des travaux de sorte que la vérification de la qualité de l'information fournie par les mesures radar demeure limitée.

10 Pont de la Veveyse de Fégère

10.1 Indications fournies

- Plans du pont à diverses échelles
- Coordonnées des axes du pont
- Coordonnées de plusieurs points de mensuration pour la station de base GPS

10.2 Préparation des mesures

La préparation des mesures a été effectuée de manière analogue à celle des mesures sur le Pont sur la Denève.

10.3 Exécution des mesures

Les mesures radar ont été effectuées le 13 octobre 2005 entre 08.50 et 12.00 heures et le 14 octobre 2005 entre 08.40 et 12.00 heures par temps sec.

Lignes de mesures enregistrées:

- 16 lignes de mesures parallèles sur la totalité de la longueur du pont

Deux lignes de mesures prévues n'ont pas été mesurées car elles se trouvaient entre deux voies de circulation et auraient demandé un déplacement complet du dispositif de barrage de la circulation

10.4 Traitement des données

Le traitement des données a été effectué comme pour le Pont sur la Denève.

10.5 Propositions concernant les emplacements de sondage

Les positions des sondages pour le calibrage ont été fixées de manière analogue à celles sur le Pont sur la Denève:

Tableau 10-1: Position des sondages

Direction	Nom	Latitude	Longitude
Sud	Sfw-01	151347.105	559228.162
Sud	Sfw-02	151541.089	559302.164
Nord	Sfo-03	151564.292	559326.055
Nord	Sfo-04	151627.749	559344.474

Les résultats de ces sondages sont donnés en annexe.

10.6 Evaluation

L'évaluation a été effectuée de la même manière que pour le Pont sur la Denève.

10.7 Résultats

Les figures 10-1 à 10-4 donnent les résultats pour le Pont sur la Veveyse de Fégire. Toutes les désignations et les codes de couleurs sont les mêmes que pour les résultats du Pont sur la Denève.

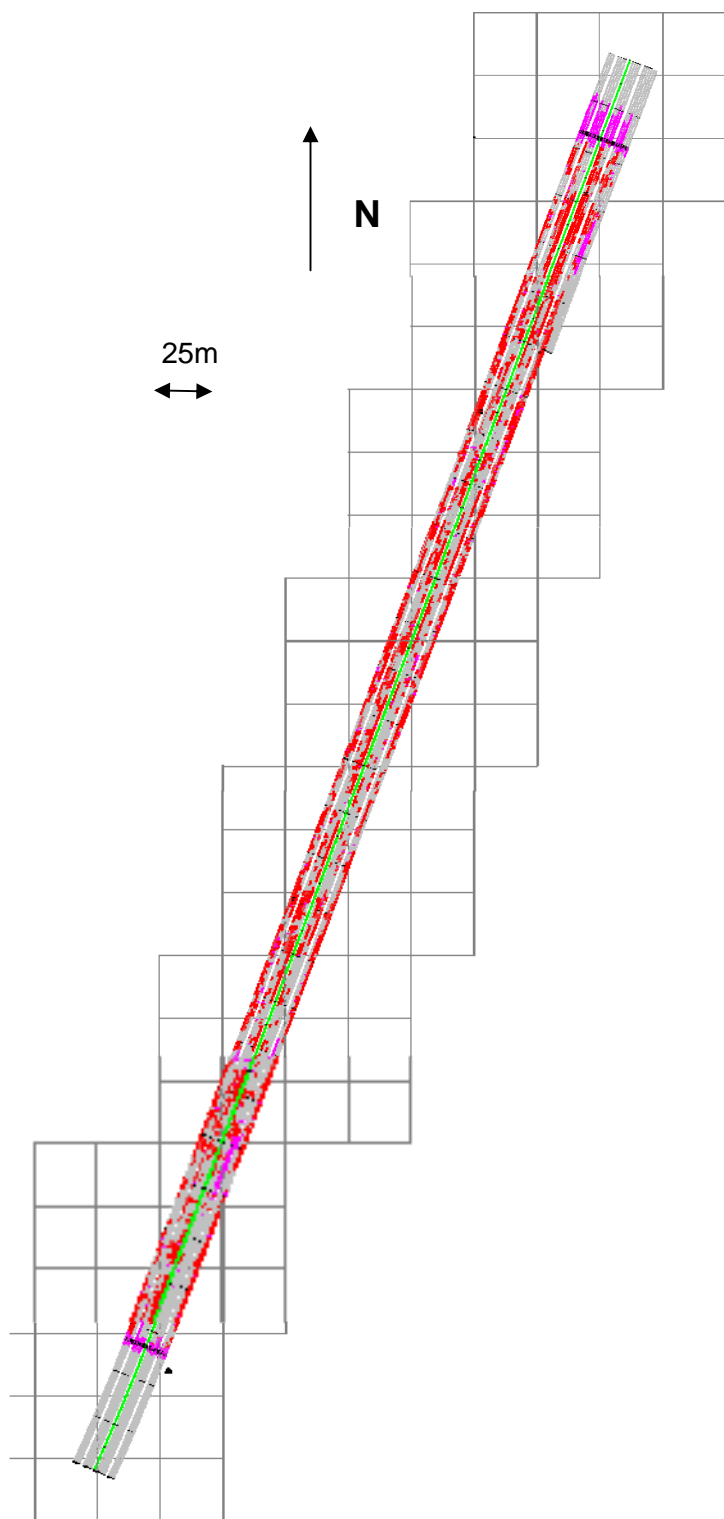


Figure 10-1: Quot ≥ 4 , sans interprétation

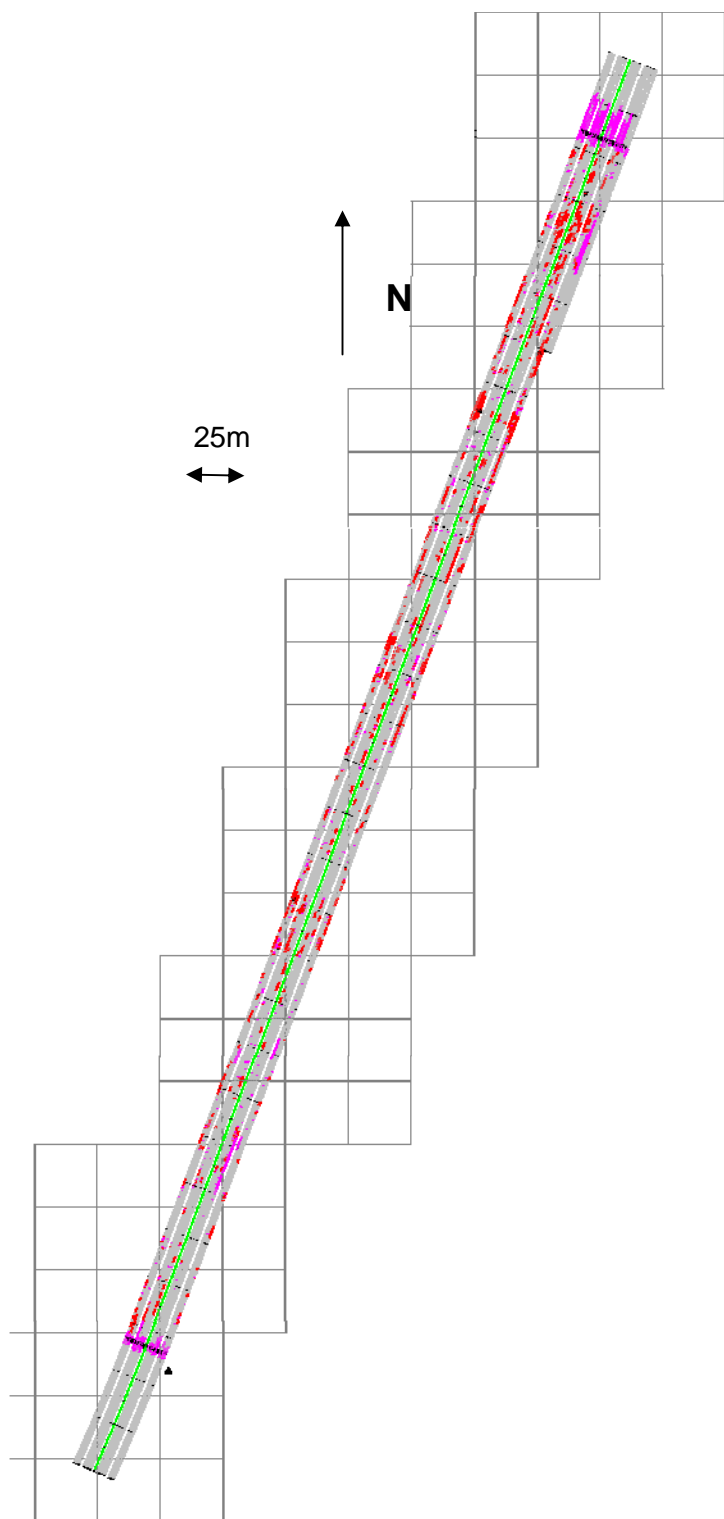


Figure 10-2: Quot ≥ 8 , sans interprétation

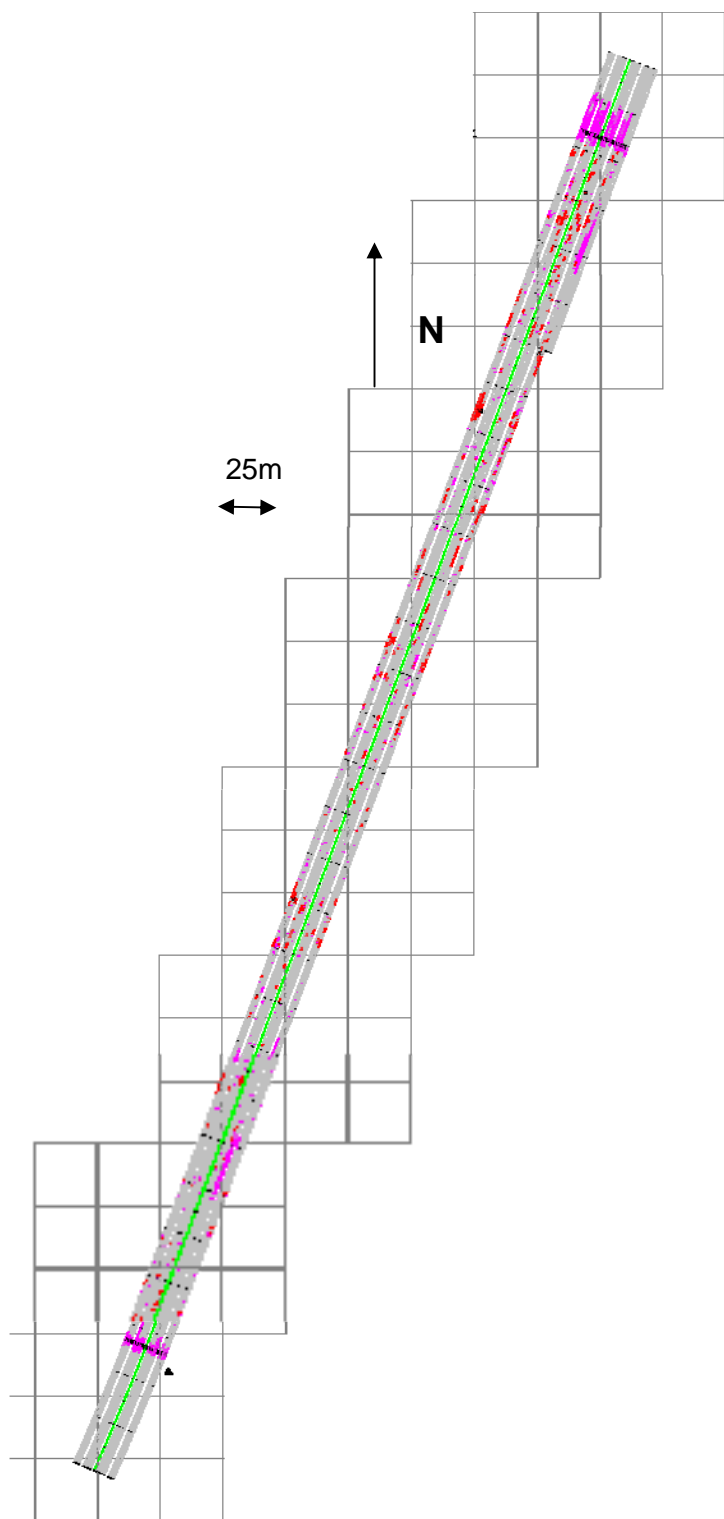


Figure 10-3: Quot ≥ 12 , sans interprétation

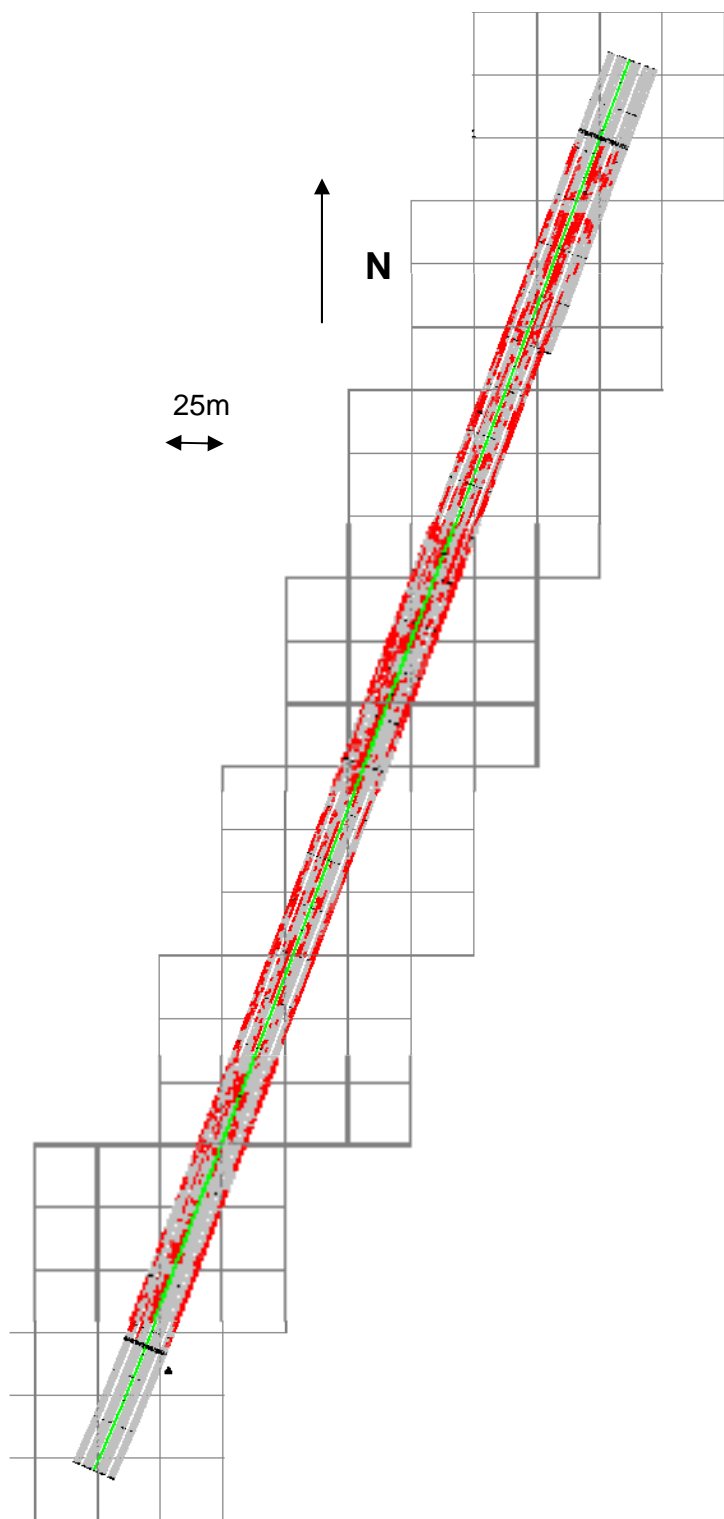


Figure 10-4: Résultats interprétés

10.8 Comparaison entre les résultats radar et la réalité

Comme déjà décrit pour le Pont sur La Denève, le relevé de l'état ne se prête que partiellement pour une vérification solide des résultats car la majorité des sondages ont été effectués sur la face inférieure du tablier du pont. De plus, la position des 5 fenêtres de sondage réalisées sur la face supérieure n'était pas connue avec suffisamment de précision. La figure 10-5 montre un détail de la comparaison entre mesure radar et réalité au voisinage de la fenêtre de sondage F4. Sur ce sondage, on a constaté une teneur élevée en chlorures confirmée par les résultats radar qui indiquent qu'il s'agit d'une surface suspecte. Toutefois, ce sondage se trouve au voisinage immédiat d'une zone que les résultats radar indiquent comme non suspecte. Nous constatons qu'une telle comparaison n'a de sens que si l'on connaît la position exacte des sondages, ce qui, selon les renseignements du Département des infrastructures du Canton de Vaud, n'est pas le cas. De plus, le nombre de seulement cinq sondages n'est pas suffisant pour une vérification. Ainsi, la comparaison des résultats radar et des résultats des sondages n'a qu'une valeur limitée. Cependant, elle est tout de même décrite ici. Le tableau 10-2 donne cette comparaison d'où il ressort que les résultats radar seraient insatisfaisants (2 résultats justes sur 5 sondages) et que c'est le résultat avec la valeur limite de 12 pour les quotients qui présente la meilleure concordance (3 résultats justes sur 5 sondages).

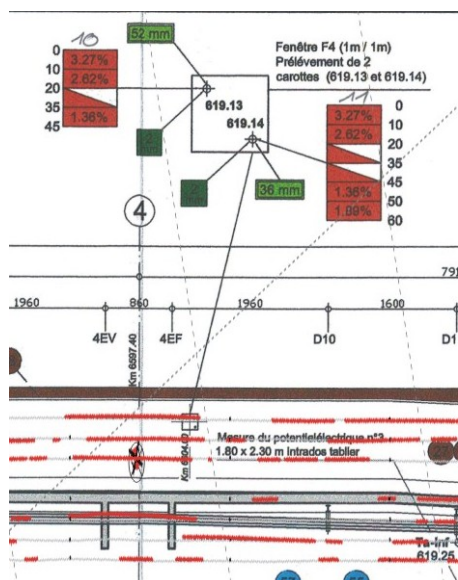


Figure 10-5: Comparaison résultats radar – réalité, détail

Tableau10-2: Comparaison résultats radar avec fenêtres de sondage selon relevé de l'état

Dés.	Fen.	Radar-int	Comp-int	Radar-4	Comp-4	Radar-8	Comp-8	Radar-12	Comp-12
F1	0	1		1		1		1	
F2	0	1		1		1		0	
F5	1	1		1		0		0	
F3	0	1		1		0		0	
F4	1	1		1		1		1	

Dés. = désignation du sondage, Fen.= résultats du sondage: 0 si teneur en chlorures < 0.3% et 1 si > 0.3%, Radar-int = résultat radar interprété, Comp-int= comparaison entre résultat radar interprété et fenêtre de sondage (vert si concordance, sinon rouge), Radar-4 = résultat radar avec valeur limite 4 sans interprétation, Comp-4 = comparaison entre résultat radar avec valeur limite 4 et fenêtre de sondage, etc...

11 Aspects économiques

L'énumération ci-après donne les heures de travail que nécessite l'examen d'un pont de petite taille tel que le Pont sur la Denève. Cette estimation part de la supposition que les mesures effectuées avec l'installation de mesure mobile sont réalisées sur des lignes de mesures espacées de 1 m s'étendant à toute la longueur du pont. Les frais de véhicule, d'appareil et les frais de déplacement du personnel n'ont pas été énumérés. Au total ce travail représente environ 90 heures. A cela viennent encore s'ajouter les dépenses du mandant lui-même p. ex. pour le barrage des voies de circulation durant les mesures radar. Si cette méthode radar arrivait à s'imposer pour devenir un examen de routine, il est certain qu'il existe un potentiel d'optimisation de certaines de ces différentes étapes de travail.

- Entretien préalable avec le mandant: 1 personne, 2 h
- Préparation des données digitales sur l'axe du pont: à charge du mandant
- Calcul des lignes de mesures et préparation du contrôleur GPS: 1 personne, 4 h
- Barrage des voies de circulation: par le mandant
- Exécution des mesures y compris déplacement: 2 personnes, 10h
- Traitement des données: 1 personne, 16h
- Examen des données radar et fixation de la position des sondages, 1 personne, 8h
- Exécution de 2 sondages et détermination de la teneur en chlorures: par le mandant
- Calcul des quotients des amplitudes de réflexion surface du béton/couche d'armature supérieure:
1 personne, 8h
- Report des zones avec quotients surélevés sur les plans du pont: 1 personne, 4h
- Apurement des zones suspectes: 1 personne, 8h
- Etablissement du rapport: 1 personne, 16h
- Divers: 1 personne, 4h

12 Travaux ultérieurs

Une inversion des mesures de laboratoire effectuées par l'Empa a été réalisée dans un travail de Bachelor à l'Institut de géophysique de l'EPF de Zürich (cf. chapitre 8 Expériences de laboratoire) [20]. Dans cette inversion, les paramètres du modèle ont été adaptés en plusieurs étapes jusqu'à ce qu'un critère décrivant la différence entre le résultat obtenu avec le modèle et le résultat de mesure de laboratoire devienne minimal. En plus de cela, les données de mesures ont été analysées. Les résultats montrent que l'atténuation du signal dans le béton est fonction de la fréquence. Selon cette inversion, les chlorures agissent essentiellement sur la conductibilité alors que l'humidité agit avant tout sur les propriétés diélectriques. L'approche choisie dans ce travail devrait encore être affinée; en particulier il faudrait tenir aussi compte des caractéristiques des antennes. Ce travail est cependant d'une grande valeur car il propose une approche possible pour différencier les chlorures de l'humidité

13 Conclusions

Les expériences de laboratoire réalisées montrent qu'il existe une nette relation entre la teneur en humidité et en chlorures du béton et les amplitudes de réflexion à la surface du béton et sur la feuille d'aluminium placée sous l'échantillon de béton. Pour un échantillon présentant une teneur en chlorures de 1% entreposé à une humidité relative de 90%, le quotient de ces deux amplitudes de réflexion est deux fois plus élevé que celui d'un échantillon sans adjonction de chlorures entreposé à une humidité relative de 35%.

Dans les expériences de laboratoire, les teneurs en chlorures et en humidité exercent aussi une influence sur la vitesse de propagation du signal radar dans le béton. Cette influence est toutefois notablement plus faible que l'influence sur les amplitudes de réflexion. De plus la détermination des vitesses de propagation est nettement plus complexe que celle des amplitudes de réflexion. L'utilisation des amplitudes de réflexion avec la «méthode des quotients» semble ainsi être une approche très prometteuse.

L'utilisation de cette méthode des quotients sur deux ponts (Pont sur la Denève et Pont sur la Veveyse de Fégire) fournit des résultats plausibles sur la teneur en chlorures du tablier. La vérification initialement prévue des résultats radar au moyen du prélèvement d'un grand nombre d'échantillons durant les travaux de réfection des ponts n'a pas pu être réalisée. Ainsi la vérification a dû être faite avec des sondages effectués antérieurement dont le positionnement n'était pas idéal, le nombre insuffisant et la position pas suffisamment connue avec précision. En conséquence, cette vérification des résultats radar fournit des résultats contradictoires. Ainsi, par exemple, la concordance entre les résultats radar interprétés et les résultats des sondages est de 100% pour le Pont sur la Denève alors qu'elle est notablement moins bonne sur le Pont sur la Veveyse de Fégire.

Un calcul d'inversion réalisé dans le cadre d'un travail de Bachelor à l'Institut de géophysique de l'EPFZ livre une approche possible pour la distinction entre l'influence radar due aux chlorures et à l'humidité.

Les résultats du présent travail de recherche sont très prometteurs. Une évaluation définitive de l'applicabilité dans la pratique n'a pas pu être réalisée du fait qu'il n'a pas été possible de procéder à des sondages de vérification sur ces deux ponts. Il serait sans aucun doute souhaitable de combler cette lacune.

14 Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu la Commission avec son Président Hermann Fleischer et ses membres Jean Brocard, Jacques Dobler, Michel Donzel, Martin Käser, Sébastien Nendaz, Jean-Christophe Putallaz, Eric Simond et Jean-Marc Waeber pour l'encadrement de ce projet et leurs conseils.

Nous adressons des remerciements particuliers à la Section des ponts et grands ouvrages du Département des infrastructures du Canton Vaud et son Directeur Sébastien Nendaz pour le mandat qu'ils nous ont attribué, leur soutien durant les mesures radar et pour la mise à disposition des résultats des sondages.

Sous la direction de Jan van der Kruk, Kaspar Merz (tous deux de l'EPF de Zurich) a procédé à une analyse des données radar et à une inversion de celles-ci qui viennent judicieusement compléter les travaux réalisés dans le cadre de ce projet.

Roman Mastrangelo de l'Empa a fourni une contribution importante à la préparation, à la réalisation et à l'évaluation des mesures radar. Nous le remercions vivement pour son précieux soutien.

15 Bibliographie

1. Pourbaix M (1966) Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions. Oxford, Pergamon Press
2. Neville AM (1995) *Properties of concrete*. 4th edition, Longman, Essex, pp. 277-284, 497-506 and 563-566
3. Montemor MF, Simões AMP, Ferreira MGS (2003) Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques. *Cement & Concrete Composites* 25: 491-502
4. Guettala A, Abisi A (2006) Corrosion degradation and repair of concrete bridge. *Materials and Structures* 39:471-478
5. Van Deveer JR (1975) Techniques for evaluating reinforced bridge decks. *ACI Journal* 12: 697-704
6. Elsener B, Wojtas H, Böhni H (1993) Inspection and monitoring of reinforced concrete structures – electrochemical methods to detect corrosion. In: Proc. 12th International Corrosion Congress, Houston, 20 – 24 september 1993, pp3260-3270
7. Daniels D.: *Ground Penetrating Radar*, 2nd edition, The Institution of Electrical Engineers, 2004
8. Cardimona S, Willeford B, Wenzlick J and Anderson N (2000) Investigation of Bridge Decks utilizing Ground Penetrating Radar. Int. Conf. on the Application of Geophysical Technologies to Planning, Design, Construction and Maintenance of Transportation Facilities, St. Louis/ USA
9. Scheff J, Chen R (2000) Bridge deck inspection using chain drag and ground penetrating radar. In: Ansari F. (ed) *Condition monitoring of materials and structures*, American Society of Civil Engineers
10. Roberts G (2002) Use of ground penetrating radar to delineate bridge deck repair areas. New Hampshire Department of Transportation, Report Nr. FHWA-NH-RD-12323S
11. Shin H, Grivas AD (2003) How accurate is Ground Penetrating radar (GPR) for Bridge Deck Condition Assessment?. *82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, January 12-16 2003, Washington DC/USA, CD-ROM

12. Barnes C, Trottier JF (2004) Effectiveness of Ground Penetrating Radar in Predicting Deck Repair Quantities. *Journal of infrastructure systems* 10(2):69-76
13. Hugenschmidt J (2005) Zuverlässigkeit und Genauigkeit von Georadar-Ergebnissen auf Betonbrücken. Federal Department of Environment, Transport, Energy and Communications, Swiss Federal Roads Authority, Report Nr. 582, March 2005 (in German)
14. Websites of GSSI (Geophysical Survey Systems Inc., Salem, NH., USA, www.gssi.com) and Sensors & Software (Sensors & Software Inc., Mississauga, Ont., Canada, www.sensoft.ca) accessed on December 6, 2006
15. ASTM Designation D 6087 – 03 (2005) Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar. *Annual Book of ASTM Standards*, 04.03, Am. Soc. Test.Mat., pp. 698-701
16. EN 12350-5 (2001) Testing fresh concrete – Part 5: Flow table test
17. EN 12350-7 (2001) Testing fresh concrete – Part 7: Air content – Pressure methods
18. EN 12390-3 (2002) Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens
19. Hugenschmidt J., Loser R. (2008) Detection of chlorides and moisture in concrete structures with Ground penetrating radar, *Materials and Structures* (2008) 41, pp. 785-792
20. Merz K. (2007) Full waveform inversion for chloride and moisture in concrete using ground-penetrating radar data, Bachelorarbeit, ETH Zürich, Departement Erdwissenschaften, Juli 2007

16 Annexes

16.1 Résultats des sondages de calibration sur le Pont sur la Denève

Von <willy.goyi@vd.ch>
An: <johannes.hugenschmidt@empa.ch>
Datum: 10.05.2006 16:54:56
Betreff: Sondages "A12 - Pont sur la Denève"

Monsieur,

A la suite de notre conversation téléphonique de ce jour, je vous communique pour l'objet ci-dessus mentionné les résultats suivants:

Point N°1 Sud X=149105.035 et Y=557934.789

1. Epaisseur enrobé: 118 mm
2. Profondeur de l'armature supérieure: 23 mm
3. Teneur en chlorures: en % M-Ciment
 - 0 - 10 mm : 0.92
 - 10 - 20 mm : 0.38
 - 20 - 30 mm: 0.25
 - 30 - 40 mm: ----
4. Teneur en eau : ---- (kein werte)

Point N°2 Nord X=149162.889 et Y=557954.458

1. Epaisseur enrobé: 67 mm
2. Profondeur de l'armature supérieure: 20 mm
3. Teneur en chlorures: en % M-Ciment
 - 0 - 10 mm : 0.38
 - 10 - 20 mm : 0.24
 - 20 - 30 mm: <0.08
 - 30 - 40 mm: ----
4. Teneur en eau : ---- (kein werte)

Mit freundlichen Grüßen von:

Willy Goyi - Ingénieur génie civil
Section Tunnels et grands ouvrages (TGO)
Etat de Vaud (<http://www.vd.ch>)
Département des infrastructures (<http://www.dinf.vd.ch>)
Tél. +41(0)21 316 70 88 Service des routes
Fax +41(0)21 316 72 62 Division routes nationales
Av. de L'Université 3 - 1014 LAUSANNE
mailto: willy.goyi@vd.ch

16.2 Résultats des sondages de calibration sur le Pont sur la Veveyse de Fégire

1000 [L299 RN M3/E3] 15:07 00 9002 60/91

LCBE
 LABORATOIRE DE CONTRÔLE BETONS ENROBES ET SOLS SA
 1673 BOSSONNENS
 ☎ 021 947 47 44 ☎ 021 947 47 44 info@cbe.ch

REÇU LE	
11 JUL. 2006	
DISTRIBUTION	
CS	
AD	
RN	X
RC	
ER	
TR	
COMPARABILITE	
Date:	
N°	

A. M. HUGENSCHMIDT

ETAT DE VAUD,
 Département des Infrastructures, Routes Nationales
 A l'at. De M. W. GOYI
 Avenue de l'université 3
 1014 LAUSANNE

Bossonnens, le 10 juillet 2006

N 12 - ASSAINISSEMENT PONT DE LA FEGIRE - LOT E07505
 Dossier 1119 PV 19630-1 FINAL
 Opérateur : Berney & Sonney Dates des prélèvements : 18, 21 avril, 29 mai, 1^{er}, 29 juin, 4 juillet 2006

RESULTATS DES MESURES

Echantillon n°	Epaisseur de l'enrobé (mm)	Profondeur de l'armature supérieure (mm)	profondeur de mesure (mm)	Chlorures par rapport au ciment (%) *	Teneur en eau (séchage à 110°C - comme demandé)	
					W (%)	W (%)
					Masse de l'échantillon prélevée humide (g)	W (%)
Sfw-01 Km 6.389.65 7.55 m. de l'axe	70	60	0-10	0.39	2379	5.18
			10-20	0.17		
			20-30	0.14		
			30-40	0.09		
Sfw-02 Km 6.597.27 6.64 m. de l'axe	62	47	0-10	1.78	3877	6.01
			10-20	1.81		
			20-30	1.47		
			30-40	1.54		
Sfo-03 Km 6.627.40 7.55 m. de l'axe	76	30	0-10	1.26	2624	5.30
			10-20	0.99		
			20-30	0.64		
			30-40	0.45		
Sfo-04 Km 6.693.28 2.43 m. de l'axe	90 à 100 **	53	0-10	1.16	2150	6.10
			10-20	0.58		
			20-30	0.25		
			30-40	0.19		

* Calculé avec MVA 2.400 kg/m³ et dosage en ciment 300 kg/m³ (supposé)

** La mesure a été effectuée sur des morceaux proches de la zone, car convoqué pour le lundi 29 mai (07h00), la démolition avait déjà commencé le 24 mai.

Les mesures de profondeur d'armature ont été effectuées avec profomètre 5 et vérifiées avec carottes.
 Annexe : rapports IMP teneur en chlorures

En restant à votre entière disposition, pour tous renseignements ou essais complémentaires, nous vous présentons, Monsieur, nos respectueuses salutations.


 J. Berney

1000/1001

Les valeurs obtenues ne concernent que les objets soumis aux essais
 La reproduction de ce P.V. n'est autorisée que sous la forme d'un fac-similé intégral.
 Sauf demande expresse, les échantillons sont éliminés après essais.

page 1/1

Ces contrôles n'engagent en rien notre responsabilité quant à la qualité de la construction de l'ouvrage.

1000/1001

RN RIPONNE 14/09 2006 15:10 FAX +41 21 316 72 62