

**Titre:** Contribution à l'auscultation des chaussées mixtes par méthodes GPR et électrique  
Title: GPR and electrical

**Auteur:** Carole Kaouane  
Author:

**Date:** 2010

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Kaouane, C. (2010). Contribution à l'auscultation des chaussées mixtes par méthodes GPR et électrique [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/403/>  
Citation:

## Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/403/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** Michel C. Chouteau  
Advisors:

**Programme:** Génie minéral  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONTRIBUTION À L'AUSCULTATION DES CHAUSSÉES MIXTES PAR  
MÉTHODES GPR ET ÉLECTRIQUE

CAROLE KAOUANE

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL GÉOLOGIQUE ET DES MINES  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE MINÉRAL)

AOÛT 2010

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

CONTRIBUTION À L'AUSCULTATION DES CHAUSSÉES MIXTES PAR MÉTHODES  
GPR ET ÉLECTRIQUE

présenté par : KAOUANE Carole

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

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

M. LAFLEUR Jean, Ph. D., président

M. CHOUTEAU Michel, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. FAUCHARD Cyril, Ph. D., membre

## DÉDICACE

*Ce travail est en l'honneur de tous ceux qui ont cru en moi et m'ont supportée et pour tous ceux qui vont continuer à croire en moi où qu'ils soient dans le monde.*

*À Simon qui m'a réconciliée avec Matlab,*

*à Myriam et son garçon à naître (en espérant qu'il puisse connaître de meilleures routes),*

*Et bien sûr à tous mes chums du Québec!*

**« Point n'est besoin d'espérer pour entreprendre ni de réussir pour persévérer. »**

***Guillaume le Taciturne.***

## REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord mon directeur de recherche, Michel Chouteau pour avoir accepté de me superviser,

Jean Lafleur en tant que professeur et Président du Jury,

Cyrille Fauchard, mon futur responsable et collaborateur,

Mon administration à l'ENTPE et en particulier Lionel Royer et Bernard Clément sans qui ces deux ans d'échange à Montréal n'auraient pas été possibles,

La Ville de Montréal et Alain de Vaudreuil de Cima pour l'accès aux chantiers,

Le laboratoire de Structures de l'École Polytechnique de Montréal et Guillaume Cossette,

Le laboratoire Polygrammes, Jules Gauthier et Tristan Dubois,

Manon Leduc,

Et tous les secrétaires et les techniciens qui permettent la fluidité du travail de recherche.

## RÉSUMÉ

Dans le contexte des infrastructures urbaines québécoises vieillissantes et dans un souci de planification des travaux, il faut pouvoir diagnostiquer de façon rapide, fiable et à moindre coût les chaussées urbaines. Ce mémoire de maîtrise s'intéresse à investiguer et à développer le potentiel du géoradar et des méthodes électriques pour l'auscultation des chaussées urbaines, soumises aux cycles de gel-degel et de saturation et désaturation. On souhaite détecter les défauts et estimer la teneur en eau dans les chaussées mixtes. Ces dernières consistent en une couche de surface asphaltée, une dalle de béton de ciment et une fondation. Des études antérieures basées en grande partie sur des modélisations et des études terrain, ont montré un potentiel certain de l'application conjointe du GPR et des méthodes électriques pour l'auscultation de ce type de chaussée. Toutefois, une meilleure évaluation du potentiel serait obtenue si on pouvait avoir accès aux propriétés physiques des matériaux de la chaussée et à des données géotechniques.

La mise en contexte permet tout d'abord de souligner le lien entre les variations de propriétés physiques des matériaux routiers, l'apparition des défauts structuraux et la teneur en eau. Après une brève étude par modélisation numérique, des mesures radar sont réalisées sur une chaussée montréalaise (Canada) avant sa réhabilitation complète. Lors de la destruction de la chaussée, on prélève des échantillons de sols dans les tranchées et des blocs de béton et d'asphalte sont récupérés pour étudier ensuite leurs propriétés physiques en laboratoire. La permittivité complexe du béton et de l'asphalte est mesurée avec une sonde à terminaison ouverte qui intègre sur un volume de  $30 \text{ cm}^3$  dans la plage de fréquence 50 MHz-900 MHz. Les mesures de résistivité électrique sont faites sur des carottes extraites des blocs de béton et d'asphalte avec un montage simple. Les mesures sont faites sur les échantillons secs et humides, ce qui permet d'obtenir une approximation des valeurs prises en fonction des changements climatiques sur une année. En parallèle, on mesure la teneur en eau sur les échantillons de sol. Les teneurs en eau sont élevées et le sol a une composition de silt argileux, ce qui justifie la forte conductivité obtenue avec les mesures électriques réalisées sur la fondation de la chaussée reconstruite. Les données géophysiques et géotechniques disponibles sont ensuite compilées. Des modélisations dites de vérification et de corrélation sont réalisées pour être comparées aux mesures réalisées sur le terrain. Finalement, on observe une bonne concordance. Ce travail fournit une base à des travaux futurs plus spécifiques.

## ABSTRACT

Quebec's infrastructures are ageing. A reliable, quick and economical assessment of the state of urban roads would help to plan civil engineering. This M.Sc. thesis aims to investigate and develop the potential of Ground Penetrating Radar (GPR) and electrical methods to assess pavement condition subject to wetting, freezing and drying cycles. The objectives are to display defects and estimate water content in the materials used for the mixed pavement construction; these consist in layers of asphalt (top), concrete (middle) and grade and sub-grade (bottom). Prior studies showed a valuable potential of joint application of GPR and electrical resistivity to assess mixed pavement condition. These studies were mainly based on numerical modeling and some site tests using both methods. It was concluded that a better evaluation of the potential of the coupled methods would come from the assessment of physical properties and validation from geotechnical evidences.

At first, we characterized the context. Structural defects and water content implied modification of physical properties of road materials. After running numerical modeling, we carried out an experiment in one of the streets in Montreal (Canada) where pavement needed complete rehabilitation. GPR surveys were carried out before the pavement was destroyed and removed, and subsequently a resistivity imaging was carried out on the subgrade layer. We also sampled blocks of asphalt and concrete along the street from the demolition rubble in order to study their physical properties in the lab. Soil samples were taken from trenches to measure water content. The grade and sub-grade were mainly a mix of clayey-silt and gravel, as the embedding ground is grey clay. We measured the complex dielectric constants of asphalt and concrete in the range 50 MHz-900 MHz with a recently developed dielectric probe sampling a volume of 30 cm<sup>3</sup>. Resistivity measurements were also performed on large cores of asphalt and concrete using an in-house system. Measurements were carried out on dry and wet samples, which provided a range of values encompassing the climatic conditions for the whole year. Finally the physical property and geotechnical data were used as input to numerical modeling and the modeled responses compared to the survey data. The predicted data fit nicely with the observed data. This work aims to provide further information for a better calibration of geophysical devices in pavement condition assessment. Moreover, it gives a wide range of information, which could become a base for further and more specific works.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE .....	III
REMERCIEMENTS.....	IV
RÉSUMÉ .....	V
ABSTRACT.....	VI
TABLE DES MATIÈRES .....	VII
LISTE DES TABLEAUX .....	XII
LISTE DES FIGURES .....	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XVIII
LISTE DES ANNEXES .....	XIX
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 CONTEXTE ET MÉTHODOLOGIE.....	3
1.1 Contexte.....	4
1.1.1 Un réseau routier complexe .....	4
1.1.2 Un climat versatile .....	6
1.1.3 Un besoin d'auscultation moderne .....	7
1.2 Méthodologie .....	8
1.2.1 Modélisation .....	9
1.2.2 Expérimentation terrain .....	9
1.2.3 Essais en laboratoire .....	10
1.2.4 Interprétation /corrélation .....	10
CHAPITRE 2 CADRAGE DU PROJET PAR LA LITTERATURE .....	11
2.1 GPR & CCR en auscultation routière .....	11
2.2 Défauts structuraux .....	12

2.3	La teneur en eau .....	14
2.4	Calibration .....	14
2.5	Actuel défi : l'auscultation conjointe.....	15
	CHAPITRE 3 GEOTECHNIQUE ROUTIÈRE ET AUSCULTATION .....	16
3.1	La chaussée .....	16
3.1.1	Généralités .....	16
3.1.2	Types de chaussées .....	17
3.1.3	Contraintes géotechniques .....	19
3.1.4	Les défauts de la chaussée .....	21
3.1.5	Auscultation et évaluation des chaussées .....	27
	CHAPITRE 4 MÉTHODES RADAR ET ÉLECTRIQUE.....	30
4.1	Définitions .....	30
4.1.1	Matériaux granulaires et composites .....	30
4.1.2	Propriétés diélectriques.....	30
4.2	Application au GPR .....	34
4.2.1	Généralités .....	34
4.2.2	Configurations .....	35
4.2.3	Systèmes .....	37
4.3	Application à l'électrique.....	40
4.3.1	Généralités .....	40
4.3.2	Application au terrain .....	41
4.3.3	Inconvénients en milieux urbains .....	43
4.4	Utilisation de systèmes capacitifs électriques (CCR) .....	44
4.4.1	Principe .....	44

4.4.2 Les systèmes .....	45
CHAPITRE 5 MODÉLISATION.....	48
5.1 Electrique.....	48
5.1.1 Principe .....	48
5.1.2 Res2DMod .....	49
5.1.3 Res2DInv .....	50
5.1.4 Réalisation .....	50
5.2 Radar.....	51
5.2.1 GprMax2D .....	51
5.2.2 ReflexW .....	51
5.3 Géométries et matériaux .....	52
5.3.1 Géométrie des défauts.....	52
5.3.2 Propriétés physiques des matériaux.....	54
5.4 Résultats.....	55
5.4.1 Observations .....	55
5.4.2 Limitations de la modélisation.....	56
CHAPITRE 6 TERRAIN.....	59
6.1 But.....	59
6.2 Situation .....	59
6.3 Informations externes .....	60
6.3.1 Données visuelles .....	61
6.3.2 Données géotechniques.....	62
6.3.3 Réseaux enfouis .....	63
6.4 Levé Radar.....	64

6.5	Traitement des données .....	65
6.6	Interprétation des mesures .....	67
6.6.1	Mesures en réflexion.....	67
6.6.2	WARR .....	70
6.6.3	Observations .....	71
6.7	Mesures électriques.....	72
6.8	Suivi du chantier .....	74
6.8.1	Objectifs.....	74
6.8.2	Tranchées .....	75
6.8.3	Destruction totale.....	76
6.8.4	Facteurs d'incertitude et inconvénients .....	77
	CHAPITRE 7 LABORATOIRE.....	79
7.1	But.....	79
7.2	Considérations préliminaires .....	79
7.3	Mesures de permittivité diélectrique.....	82
7.3.1	La sonde.....	82
7.3.2	Résultats.....	83
7.3.3	Remarques .....	92
7.4	Mesures de résistivité.....	93
7.4.1	Principe et montage .....	93
7.4.2	Résultats.....	95
7.5	Observations et analyses.....	97
7.6	Teneur en eau dans les échantillons de sol .....	98
	CHAPITRE 8 CORRÉLATIONS ET VÉRIFICATIONS .....	100

8.1	Matériaux et géométries.....	100
8.2	Corrélation GPR .....	102
8.3	Vérification électrique .....	105
	CHAPITRE 9 RECOMMANDATIONS TECHNIQUES.....	106
9.1	Avis et réserves.....	106
9.2	Proposition d'études complémentaires et réalisations pratiques .....	107
9.3	Recommandations techniques.....	109
9.3.1	Le système radar .....	109
9.3.2	Système électrostatique.....	110
9.3.3	Périodes de levés et calibration.....	110
	CONCLUSION.....	112
	BIBLIOGRAPHIE.....	115
	ANNEXES.....	121

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1: tableau indicatif sur les chaussées nationales (MTQ, 2004_ site internet).....	5
Tableau 2-1: Comparaison de méthodes géophysiques à la détection de la fracturation. Source: Lataste, 2003.....	13
Tableau 4-1: Propriétés diélectriques de quelques matériaux (Burger, <i>et al.</i> , 1992; Reynolds, 1997) : .....	32
Tableau 4-2: Différentes configurations et profondeurs d'investigation (Chouteau, site académique geo.polymtl.ca) .....	42
Tableau 5-1: Valeurs des propriétés physiques utilisées lors des modélisations.....	54
Tableau 6-1: Résumé des paramètres de mesures terrain.....	64
Tableau 7-1: Caractéristiques géométriques des montages.....	96
Tableau 7-2: Mesures pour les échantillons humides.....	96
Tableau 7-3: Mesures pour les échantillons secs.....	96
Tableau 7-4: Tableau comparatif de différents travaux - Asphalte.....	97
Tableau 7-5: Tableau comparatif des différents travaux - Béton.....	98
Tableau 8-1: Tableau des annotations utilisées au chapitre 8.....	100
Tableau 8-2: Valeurs des propriétés diélectriques choisies pour les modélisations de validation. ....	100
Tableau 8-3: Configurations matérielles pour les modélisations de validation.....	102

## LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Analyse du titre .....	3
Figure 1-2: Graphe de démarche. ....	4
Figure 1-3: Positionnement géographique du projet dans le monde (image Google Earth).....	7
Figure 1-4: Méthodologie détaillée des travaux. ....	9
Figure 3-1: Approche systémique de la chaussée.....	16
Figure 3-2: Schéma d'une chaussée rigide.....	17
Figure 3-3: Schéma d'une autoroute en chaussée souple. Source MTQ. <i>Note : le fossé est présent en contexte rural.</i> .....	18
Figure 3-4: Photo et schéma d'une chaussée mixte. ....	18
Figure 3-5: Exemples de répartition des charges dans les différentes couches d'une chaussée. a) chaussée mixte, b) chaussée souple. ....	19
Figure 3-6: Contraintes géotechniques dans un sol de nature homogène.....	20
Figure 3-7: Nid de Poule conséquent. Rue Christophe-Colomb, été 2009.....	21
Figure 3-8: Fissure dans un béton de chaussée.....	22
Figure 3-9: Écaillage transformé en fissure sur le haut de la photo et peu profond sur le bas. ....	23
Figure 3-10: Illustration phénomène de pompage (Ridgeway, 1987). .....	24
Figure 3-11: Déformation de la route sous l'effet du gel (MTQ) .....	25
Figure 3-12: Déformation de la route sous l'effet du dégel (MTQ).....	25
Figure 3-13: Défauts divers. Traces de chasse-neige à gauche et anciens rails de tramway enfouis à droite. ....	26
Figure 3-14: Camion MTQ équipé d'un niveau laser et d'une caméra (MTQ).....	28
Figure 4-1: Principe de mesure GPR en réflexion dans le cas d'une anomalie le long d'un profil (Huisman, <i>et al.</i> , 2003). .....	36
Figure 4-2: Levé GPR en réflexion avec modèle correspondant.....	36

Figure 4-3: Profilage en WARR (Burger, <i>et al.</i> , 1992). ....	37
Figure 4-4: Données obtenues pour la configuration fig.4-3 (Burger, <i>et al.</i> , 1992). ....	37
Figure 4-5: Pulse Ekko à l'arrière d'un véhicule et roue odomètre. ....	38
Figure 4-6: Noggin Smart Cart en utilisation. ....	39
Figure 4-7: "Air-coupled antennas" développées par GSSI. ....	39
Figure 4-8: Schéma électrique d'illustration de la loi d'Ohm. ....	40
Figure 4-9: Configuration dipôle-dipôle utilisée en mesure de terrain (www.microgeo.com consulté le 22 Juin 2010) ....	41
Figure 4-10: Modèle et pseudo section en résistivité apparente correspondante pour un dispositif dipôle-dipôle aligné avec un espacement d'électrode de 25cm. ....	43
Figure 4-11: Schéma d'équivalence en impédance électrique d'un dipôle-dipôle classique ....	44
Figure 4-12: Possibilités d'interprétation d'un schéma électrique (a) en impédance réelles (b) en impédances imaginaires (c) (Kuras, 2006) ....	45
Figure 4-13: Schéma d'équivalence électrique pour un dipôle-dipôle capacitif. (Kuras, 2002)....	45
Figure 4-14: Système du BGS basé sur le CORIM en utilisation (Kuras, 2002). ....	46
Figure 4-15: Schéma MPU (Olivier Antérrieu, rapport de stage, 2004). ....	46
Figure 4-16: Deux systèmes line-antenna.....	47
Figure 5-1: Pseudo-section de résistivité apparente (en haut) et modèle correspondant par blocs (en bas) sous Res2DMod. ....	49
Figure 5-2: Pseudo-sections et modèle calculé par Res2DInv. ....	50
Figure 5-3: Image de la réponse radar 1GHz d'une chaussée sans défauts calculée par GprMax2D et imagée avec ReflexW. ....	51
Figure 5-4: Modèle géométrique de la chaussée sans défaut.....	52
Figure 5-5: Géométrie des modèles ( <i>dimensions variables détaillées dans l'annexe 1</i> ). ....	53
Figure 6-1: Emplacement du site de mesures sur l'île de Montréal (Google Maps).....	59

Figure 6-2: a) Photo de la portion de rue étudiée; b) avec le tracé des lignes de levé GPR.....	60
Figure 6-3: Correspondance entre les numéros civiques et les lignes de levés GPR.....	61
Figure 6-4: Schéma d'observation visuelle et photos correspondantes.....	62
Figure 6-5 : Structure de la chaussée d'après les rapports de la ville de Montréal.....	63
Figure 6-6: Schéma récapitulatif du réseau enfoui.....	63
Figure 6-7: Dispositif et matériel en utilisation. a) vue d'ensemble, b) antenne et ruban-mètre, c) installation de contrôle.....	65
Figure 6-8: Mesures sur L1. 900 MHz.....	68
Figure 6-9: Mesures sur L1. 450 MHz.....	68
Figure 6-10: correspondances entre L1 et L2 à 450 MHz.....	69
Figure 6-11: Correspondance entre les lignes L1 et L2 à 900 MHz.....	70
Figure 6-12: Schéma de la prise de mesure WARR.....	71
Figure 6-13: Mesures WARR à 450MHz.....	71
Figure 6-14: Schéma des éléments sur la composition de la chaussée le long du profil de mesure électrique. <i>Note: le schéma n'est pas à l'échelle et la position des conduites d'eau est uniquement indicative.</i> .....	72
Figure 6-15: Photos de la ligne d'électrodes ( <i>gauche</i> : vue d'ensemble; <i>droite</i> : implantation des électrodes).....	73
Figure 6-16: Mesures électriques après inversion.....	73
Figure 6-17: Photos de la surface cassée ( <i>à gauche</i> : vue d'ensemble; <i>à droite</i> : vision spécifique de la dalle de béton cassée).....	75
Figure 6-18: Vues d'une tranchée.....	76
Figure 6-19: Photo de la dalle de béton et de la couche d'asphalte en train d'être enlevées.....	77
Figure 6-20: Conduite d'aqueduc percée lors de la coupe d'une tranchée.....	78
Figure 6-21: Conduite d'eau particulière percée lors de travaux dans une tranchée.....	78

Figure 7-1: Blocs récupérés stockés en vrac.....	80
Figure 7-2: Coupe de béton avec évaluation de la taille des agrégats. ....	80
Figure 7-3: Scie à béton (à gauche) et carotteuse (à droite) .....	81
Figure 7-4: Blocs de béton plongés dans de l'eau. Sous la forme de blocs (à gauche) et sous forme de carottes (à droite). .....	81
Figure 7-5: Dispositif pour mesures de permittivité complexe. De gauche à droite: VNA, sonde, bloc à ausculter. ....	82
Figure 7-6: Schémas des dimensions de la sonde en millimètres (à gauche) et de son fonctionnement (à droite) (Filali, 2006, 2008). ....	83
Figure 7-7: Mesures de vérification de la calibration sur du plexiglas. <i>A gauche</i> : partie réelle; <i>à droite</i> : partie imaginaire. ....	84
Figure 7-8: Photos de la prise de mesures. ....	85
Figure 7-9: Exemple de traitement et présentation des mesures. ....	86
Figure 7-10: Moyennes pour le matériau "Asphalte" humide. ....	87
Figure 7-11: Moyennes pour le matériau "Asphalte" à sec. ....	88
Figure 7-12: Comparaison pour le matériau Asphalte humide et à sec. ....	89
Figure 7-13: Moyennes pour le matériau Béton humide. ....	90
Figure 7-14: Moyennes pour le matériau Béton à sec. ....	91
Figure 7-15: Comparaison des moyennes de béton humide et sec. ....	92
Figure 7-16: Comparaison des moyennes de constante diélectrique pour chaque matériau (à gauche) et évaluation des coefficients de réflexion en situation humide et sèche (à droite). 93	93
Figure 7-17: Photo du montage expérimental avec schéma de mesure du potentiel et d'injection de courant.....	94
Figure 7-18: A gauche, montage général et à droite, asphalte dans l'étau.....	94
Figure 7-19: Teneur en eau massique mesurée en fonction de la position du prélèvement sur le profil.....	99

Figure 8-1: Modèles choisis pour les modélisations de validation.....	101
Figure 8-2: Comparaison des traces obtenues par modélisations à 550 MHz (a,d) et des traces de terrain (b,c) avec l'antenne 450MHz. ....	103
Figure 8-3: Comparaison des traces obtenues par modélisations à 700 MHz (a,d) et des traces de terrain (b,c) avec l'antenne 900MHz. ....	104
Figure 9-1: Variations saisonnières de certaines caractéristiques (D'après Kestler, 2003; modifié par Saarenketo, 2006). ....	111

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Material.
CCR	Capacitively Coupled Resistivity
CERIU	Centre d'Etudes et de Recherches sur les Infrastructures Urbaines.
CMP	Common Mid-Point
EM	Électromagnétique
ERI	Electrical Resistivity Imaging
ERT	Electrical Resistivity Tomography
GPR	Ground Penetrating Radar
MTQ	Ministère des Transports Québec
TDR	Time Domain Reflectometry
WARR	Wide Angle Reflection and Refraction.

## **LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE 1 – Modélisations .....	119
ANNEXE 2 – Chronologie des travaux .....	175
ANNEXE 3 – Données techniques .....	176
ANNEXE 4 - Validation .....	183

## INTRODUCTION

Ce mémoire, présenté en vue de l'obtention d'une maîtrise recherche en Géophysique Appliquée, porte sur l'auscultation non destructive des chaussées urbaines. Ceci comprend l'analyse des défauts structuraux et du profil de la teneur en eau dans la chaussée et leurs acquisitions par les méthodes de résistivité électrique et le géoradar.

Le Québec est un territoire vaste dont seule une faible partie est peuplée ; le réseau routier, principal moyen de communication, est étendu et soumis à des conditions climatiques extrêmes. Le budget de gestion et d'entretien de la voirie urbaine est géré par les villes qui possèdent encore peu d'expérience dans ce domaine. La plupart des infrastructures arrivant à la fin de leur durée de vie, les opérations de réhabilitation complète deviennent de plus en plus fréquentes. Il devient difficile de retrouver l'historique des travaux réalisés. Avec les méthodes conventionnelles d'auscultation des chaussées, dresser un bilan rapide de l'état des chaussées afin de planifier les travaux et d'éviter la reconstruction complète à certains endroits est un défi quotidien. Ce projet a pour but de fournir un nouvel outil d'auscultation non destructive, rapide et fiable qui pourrait permettre aux collectivités de dresser une planification des travaux et ainsi obtenir une meilleure visibilité dans leurs décisions. Ceci pourrait permettre une meilleure utilisation du budget alloué aux infrastructures routières dans un souci de sécurité et d'économie. Cette maîtrise se situe dans une continuité des activités du Laboratoire de Géophysique Appliquée de l'École Polytechnique de Montréal qui s'intéresse depuis une dizaine d'années à la problématique de l'auscultation des chaussées urbaines et des structures en béton par méthodes radar et électrique en continu (Chouteau, 2008; Chouteau & Beaulieu, 2002; Chouteau, *et al.*, 2000; Chouteau, *et al.*, 2009; Chouteau, *et al.*, 2003).

La géophysique possède le grand avantage de permettre l'auscultation non-destructive des structures et des sols par la détection des variations des propriétés physiques des matériaux. Néanmoins l'unicité de l'interprétation de mesures indépendantes n'existe pas. Il existe toujours une incertitude à moins de pouvoir corrélérer les mesures avec une référence sûre. C'est pourquoi à travers des étapes successives de modélisation, travaux terrains et en laboratoire, ce mémoire s'intéresse principalement à la problématique de la calibration pour favoriser le passage de

l’interprétation qualitative à l’interprétation quantitative dans le cadre de l’auscultation des chaussées.

Les premiers chapitres du mémoire sont consacrés à la mise en contexte du projet et l’apport des données théoriques pour la compréhension des travaux. Les travaux en tant que tels sont constitués d’une série de modélisations ayant servi à justifier le potentiel des méthodes pour la détection des défauts structuraux des chaussées et du profil de la teneur en eau. On en tire des conclusions permettant de mettre en place les mesures de terrains. Grace à la participation du service de gestion des actifs de voiries de la Ville de Montréal, les mesures terrains ont pu être réalisées sur une chaussée vouée à la destruction. Les mesures ainsi que des éléments sur l’application de la géophysique sur les chantiers de construction sont exposés au chapitre Travaux de terrain. Durant la destruction de la chaussée, des échantillons sont récupérés puis analysés dans le chapitre Laboratoire. Les résultats des analyses servent ensuite à corréler les mesures non-destructives réalisées sur le terrain avec des valeurs supposées réelles dans le chapitre Vérifications et corrélations. On conclut ce travail par des recommandations techniques et des remarques critiques.

Bien que réalisée dans le contexte des infrastructures québécoises vieillissantes, l’utilisation des méthodes employées et développées dans ce rapport se veut adaptable à l’international. L’auscultation routière non-destructive est de plus en plus sollicitée depuis les années 70 et seulement depuis les années 80 pour les structures en génie civil. Ce travail tente de rester dans l’optique géophysicienne d’auscultation qui se veut très critique envers elle-même et, en tant que science appliquée, très dépendante du contexte et des paramètres initiaux.

## CHAPITRE 1 CONTEXTE ET MÉTHODOLOGIE

Le projet a été abordé suivant une méthode de recherche qui consiste tout d'abord à analyser le sujet et le contexte en détail pour pouvoir ensuite établir la méthodologie des travaux. Tout d'abord, nous avons analysé le thème du projet en tant que tel. La figure 1-1 explique cette analyse.

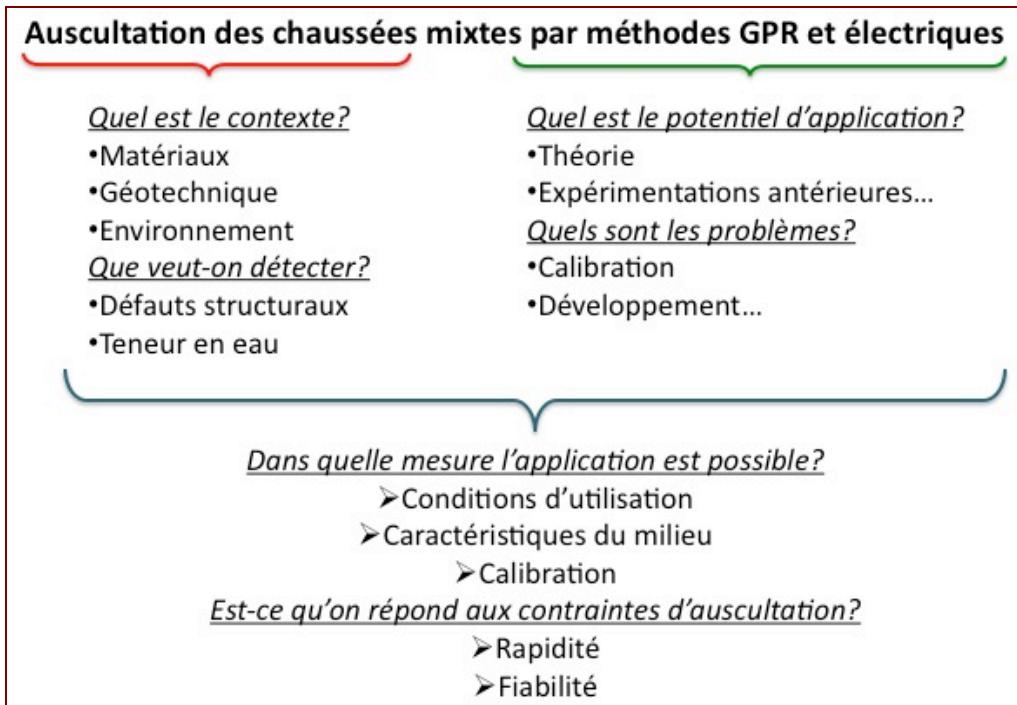


Figure 1-1 : Analyse du titre

La démarche générale d'un tel projet de son initiation à son application peut se résumer comme montré à la figure 1-2. Le domaine de la recherche s'arrête à l'optimisation, la partie analyse coût-avantage correspond à la partie développement en vue d'une commercialisation ou d'une utilisation à grande échelle (stade post-prototype). En définissant chacune des étapes à partir de notre sujet, on obtient la méthodologie associée à notre projet. On remarquera que le graphe fait une boucle, en effet, l'arrivée de toute nouvelle méthode viendra modifier le contexte (environnement, social, économique,...). Ceci est un principe d'évolution technologique.

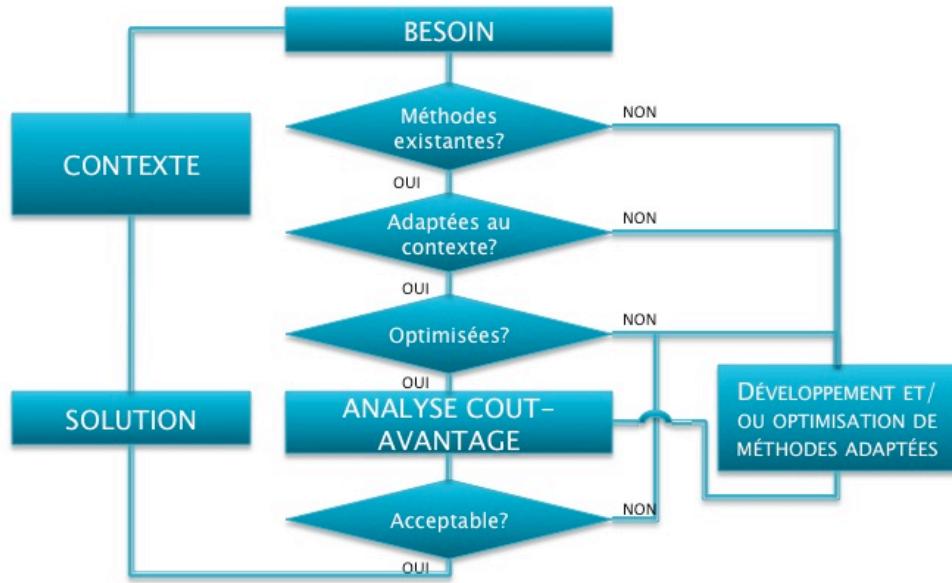


Figure 1-2: Graphe de démarche.

## 1.1 Contexte

Les institutions publiques commencent à adopter des principes d'optimisation et clore l'époque du « tout-jetable ». Au niveau scientifique, la compréhension et la création des structures a fait de grandes avancées ces 30 dernières années. En planifiant correctement l'entretien et la réparation des infrastructures et en adoptant des méthodes adéquates, les institutions pourraient réaliser une meilleure gestion des budgets et augmenter la durabilité dans le domaine du génie civil. On définit ici le contexte au niveau québécois.

### 1.1.1 Un réseau routier complexe

Le réseau routier québécois se définit sur plusieurs niveaux :

- sa conception
- sa gestion administrative

#### 1.1.1.1 Un réseau très étalé

Les chaussées pavées et délimitées ne commencent à exister au Québec qu'au début du 18<sup>ème</sup> siècle lors de la colonisation du territoire par les Français. Comparativement au réseau européen,

le réseau québécois est particulièrement jeune. N'ayant pas connu la même logique de développement du territoire que les contrées européennes, notamment à cause du vaste territoire peu peuplé, les villes et le réseau routier s'étendent sans limites. Influencés par le modèle américain, à partir du début du 20<sup>ème</sup> siècle, ces derniers se développent pour faciliter l'utilisation de la voiture. De nos jours les municipalités québécoises se retrouvent en charge de nombreux kilomètres de chaussées comparativement au nombre d'habitants.

Tableau 1-1: tableau indicatif sur les chaussées nationales (MTQ, 2004 \_ site internet)

	Québec	Ontario	New York	France
<b>Longueur (km)</b>	29 600	16 500	24 200	30 400
<b>Nombre d'habitants (millions)</b>	7,5	12,4	19,2	61,4
<b>Précipitations annuelles moyennes (mm)</b>	1 000	500 à 900	750	800
<b>Durée de gel (jours/an)</b>	147 à 218	100 à 200	10 à 100	0 à 90
<b>Profondeur de gel (m)</b>	1,2 à 3	1 à 3,2	Moins de 1,4	0 à 0,8

Le tableau 1-1 ci-dessus montre le nombre de kilomètres de chaussées nationales au Québec comparé à d'autres États. Concernant les chaussées municipales, l'arrondissement de Ville Marie sur l'île de Montréal a à charge environ 200km de chaussées pour une superficie de 19.5 km<sup>2</sup>. Si on extrapole un peu (sachant que l'arrondissement Ville-Marie est un des plus denses de l'île de Montréal et un des plus petits en superficie), il y a 19 arrondissements qui composent la Ville de Montréal, soit autour de 4 000 km de chaussée à charge de la Ville de Montréal pour une superficie d'environ 500 km<sup>2</sup> et presque 1,8 million d'habitants.

### 1.1.1.2 Une administration à plusieurs échelles

L'entretien, la réhabilitation et la construction des chaussées au Canada se font à plusieurs niveaux :

**Fédéral** : l'infrastructure dépend du gouvernement d'Ottawa, c'est-à-dire du ministère des transports du Canada, Transports Canada.

**Provincial** : dépend des provinces. Au Québec, cela revient au MTQ (Ministère des Transports du Québec).

**Municipal** : dépend des villes. Pour la ville de Montréal, la gestion globale est faite au Service des Infrastructures, Transport et Environnement, Direction des Transports et gestion des actifs de voirie, ceci en collaboration avec les gestionnaires des arrondissements.

Cette gestion pose certains problèmes pour l'organisation des travaux et l'uniformité du réseau. En effet il y a une faible communication entre les différents niveaux et une grande différence de budgets. De plus, même si une chaussée se situe sur un territoire géographique, il se peut que sa gestion ne soit pas assurée par le niveau le plus évident. De la sorte, le MTQ gère environ 140km de routes sur le territoire de la Ville de Montréal alors que les ponts Champlain, Jacques Cartier et Mercier dépendent au niveau budgétaire du gouvernement fédéral.

### 1.1.2 Un climat versatile

Situé entre le 45<sup>ème</sup> parallèle jusqu'au delà du 62<sup>ème</sup> (fig. 1-3), le Québec possède un climat continental humide en général. L'île de Montréal est située à peu près à la même latitude que Paris (France) dans la partie du Québec appelé Québec Méridional. Malgré ces considérations géographiques, le climat est extrêmement varié (probablement du à la proximité du fleuve Saint-Laurent). Les températures peuvent osciller au cours de l'année entre -20°C en hiver et +30°C en été. Dans la région de Montréal, la pluviométrie est en moyenne de 1500 mm annuellement, le gel dure environ 150 à 200 jours par année et le sol peut geler jusqu'à 3m de profondeur. A Montréal, le front de gel ne descend généralement pas en dessous de 1,50m.

Ces conditions climatiques imposent des contraintes au niveau de la gestion des infrastructures telles que :

- la pose fréquente (quasi-journalière) de sels déglaçants en hiver.
- Des installations électriques spécifiques sur les conduites d'aqueduc enfouies dans la chaussée pour éviter le gel des conduites si le front de gel descend trop profond.
- Des périodes restreintes de travaux possibles (entre mai et novembre généralement).

- Des réglementations de circulation spécifiques lors de la période de dégel (pas toujours respectées).

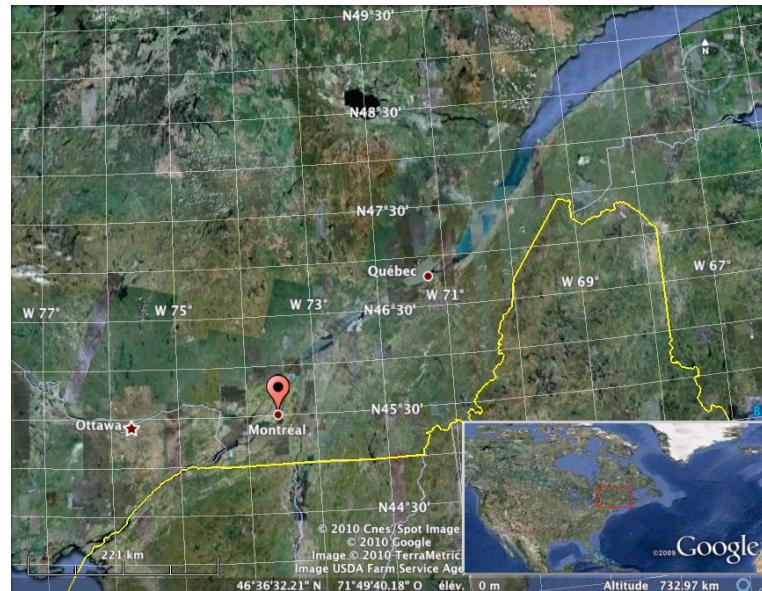


Figure 1-3: Positionnement géographique du projet dans le monde (image Google Earth)

### 1.1.3 Un besoin d'auscultation moderne

Pendant longtemps, la décision de réparation d'une chaussée était prise sans considérations budgétaires ou environnementales. Les deux méthodes principales étaient :

- la destruction et la reconstruction complète.
- des réparations locales et provisoires.

Ces opérations étaient effectuées sans études préalables de l'état de la chaussée. De nos jours, la plupart des infrastructures arrivent à la fin de leur durée de vie. On ne peut pas tout remplacer en une fois pour des raisons de conservation du trafic, de budgets, de main d'œuvre et technologiques. On constate un réel besoin d'établissement rapide de diagnostics pour améliorer la planification et la gestion des travaux. Pour cela, il faut développer un moyen d'auscultation qui répondrait à deux critères majeurs :

- Rapidité,
- Fiabilité des mesures et des interprétations.

La méthode moderne essaie d'intégrer la notion de planification. La planification consiste à ordonner sur du moyen ou long terme les actions à effectuer en fonction des ressources disponibles et dans un but d'optimisation. Appliquée à la maintenance et la rénovation d'une chaussée, la planification consiste à décider par ordre de priorité des travaux à effectuer prenant en compte le budget disponible. Cet ordre de priorité est décidé en fonction de plusieurs facteurs dont:

- l'état physique de la chaussée,
- l'influence sur le trafic,
- l'insécurité engendrée par les dégradations,
- la durée de vie estimée avant l'apparition de dégradations majeures.

Évaluer ces différents facteurs implique la réalisation d'un diagnostic. Ce processus consiste principalement à déterminer l'état de la structure, évaluer les causes de cet état ainsi que l'occurrence des causes et enfin de décider des actions à réaliser pour retrouver l'état de référence. L'établissement d'un diagnostic nécessite deux éléments :

- Une auscultation adaptée aux anomalies que l'on souhaite détecter,
- la connaissance de l'état de référence.

Les méthodes d'auscultation doivent être adaptées à ce qu'on veut détecter et à l'environnement dans lequel elles sont utilisées.

## 1.2 Méthodologie

Pour ce projet, on étudie le potentiel et la calibration des méthodes d'auscultation non destructive appelées géoradar ou Ground Penetrating Radar (GPR) et de résistivité électrique capacitive (CCR pour Capacitively-Coupled Resistivity). La littérature (chapitre 2) et les travaux antérieurs réalisés au Laboratoire de Géophysique Appliquée de l'École Polytechnique de Montréal montrent que ces deux méthodes peuvent s'avérer capables de répondre aux besoins du contexte. Pour déterminer plus en détails les paramètres nécessaires à leur optimisation, le présent projet suit une méthodologie telle qu'exposée à la figure 1-4 :

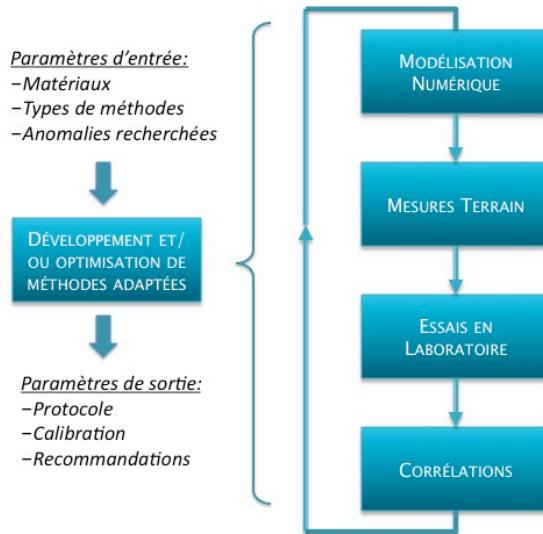


Figure 1-4: Méthodologie détaillée des travaux.

### 1.2.1 Modélisation

La modélisation permet de façon simple, rapide et peu couteuse une appropriation du sujet et une aide à la détermination des paramètres d'acquisition nécessaires lors de futurs levés. Cette partie permet de varier aisément les différents paramètres et de déterminer leurs influences respectives.

Considérant la théorie associée aux méthodes et le contexte, on choisit des défauts types et des géométries simplifiées représentatives. Les réponses géophysiques des défauts sont alors modélisées pour les méthodes GPR et CCR. On recherche les limites de résolution et l'influence de certains paramètres.

### 1.2.2 Expérimentation terrain

On réalise des levés radar et de résistivité électrique sur des chaussées dont on possède des données externes : géotechniques, matériaux, réparations antérieures, etc. Les levés sont faits avec plusieurs configurations différentes. Dans le cas de ce projet, on choisit en plus une chaussée destinée à une destruction complète. Cette étape nous permet à la fois de faire des premières comparaisons entre la modélisation et les mesures ainsi que de récupérer des matériaux de la chaussée pour en étudier les propriétés en laboratoire.

### **1.2.3 Essais en laboratoire**

On analyse les échantillons de matériaux récupérés lors de la destruction de la chaussée :

- échantillons de sol : analyse de la teneur en eau et la granulométrie,
- échantillons de béton : mesure de la permittivité complexe, la résistivité complexe et du coefficient de compression,
- échantillons d'asphalte : mesure de la permittivité complexe et de la résistivité complexe.

Les mesures de permittivité et résistivité sur les échantillons d'asphalte se font alors que les échantillons sont secs et saturés. Ceci permet d'obtenir des valeurs qui fournissent une estimation des valeurs pouvant être prise au cours de l'année par ces matériaux.

### **1.2.4 Interprétation /corrélation**

Cette dernière partie permet de faire le lien entre toutes les données obtenues à travers les différentes étapes. On réalise des modélisations avec les valeurs « réelles » obtenues lors des essais en laboratoire. On compare ensuite avec les levés terrains.

Cette partie est la dernière partie d'un processus itératif dans lequel se place cette méthodologie.

## CHAPITRE 2 CADRAGE DU PROJET PAR LA LITTERATURE

### 2.1 GPR & CCR en auscultation routière

Le Génie Civil peut être séparé en deux domaines : l'étude des contraintes mécaniques dans les matériaux (Structures) et l'étude des fondations et des sols (géotechnique). En Structures, le béton est un des principaux matériaux utilisés. Lors de l'auscultation, on cherche principalement à caractériser les défauts structuraux : fissurations, altérations et cavités. En géotechnique, les modifications de teneur en eau régissent la plupart des phénomènes que ce soit l'apparition de cavités, de fissures et la modification de capacité portante. L'études des chaussées regroupent ces deux domaines et en particulier les chaussées mixtes avec la présence de la dalle de béton. La plupart des études présentes dans la littérature s'intéressent aux chaussées souples, plus communes et plus répandues dans le monde. Il est reconnu depuis longtemps que le principal problème des chaussées souples sont des problèmes liés à la fondation et aux problèmes de drainage (Cedergren, 1988; Cedergren & Godfrey Jr, 1974; Ridgeway, 1982). On sait depuis longtemps que la géophysique à travers la méthode résistive électrique peut déterminer les contrastes de résistivité dans les sols dus à des variations de la teneur en eau. Elle est utilisée surtout pour la recherche d'aquifère et les suivis d'infiltration (Samouelian, *et al.*, 2005). Toutefois, la présence de la couche d'asphalte, très résistante électriquement et mécaniquement, est difficilement pénétrable par la méthode de résistivité en courant continu. Ceci rend cette méthode inutilisable pour l'auscultation des chaussées (Geraads, *et al.*, 1992). La méthode CCR (Capacitively Coupled Resistivity), exposée en détails par Kuras (2002), peut être imagée et interprétée de la même façon que la méthode électrique (Benderitter, *et al.*, 1994) et permet de pallier à ce problème (Tabbagh, *et al.*, 1993). L'apparition de cette méthode relance donc le débat sur l'utilisation de l'électrique dans le cadre de l'auscultation routière. En parallèle, compte tenu des propriétés diélectriques des matériaux de la chaussée et de la facilité d'utilisation du GPR, il est normal que de nos jours, le GPR connaisse un certain succès dans la détection du profil de la teneur en eau dans les chaussées (Benedetto & Pensa, 2007). Dans le cas d'une chaussée souple, Loizos & Plati (2007) montrent que l'évaluation de l'épaisseur d'asphalte par l'étude du

coefficient de réflexion par GPR donne des résultats très proches de la mesure sur prélèvements en forage. Concernant la détermination des défauts structuraux des chaussées souples et des ponts routiers par GPR, beaucoup de travaux ont été publiés et un récapitulatif est proposé par Saarenketo (2009). Pour l'auscultation des chaussées mixtes par GPR et CCR, bien que peu de travaux soient disponibles sur le sujet, on peut investiguer le potentiel de ces méthodes en considérant les applications déjà disponibles pour l'évaluation de la teneur en eau dans les sols, de la fracturation et les tests non-destructifs pour l'auscultation des bétons. Par ailleurs, une des grandes lacunes de la géophysique étant l'incertitude associée aux interprétations et son aspect très qualitatif, les travaux actuels portent en grande partie sur la quantification des images obtenues par GPR et par l'électrique à travers la calibration des appareils et la détermination des propriétés physiques des matériaux (Evans, *et al.*, 2007; Fauchard, *et al.*, 2000; Saarenketo, 2010).

Cette courte revue s'intéresse donc dans un premier temps au potentiel des différentes méthodes pour la détection des défauts structuraux et de la teneur en eau ainsi que sur les problèmes liés à la calibration pour l'auscultation routière. Elle conclut sur l'enjeu représenté par l'utilisation conjointe GPR-CCR.

## 2.2 Défauts structuraux

L'apparition de défauts structuraux implique soit une présence plus importante d'air (cas de fissures sèches) soit d'eau (cas de fissures ou cavité en milieu saturé). Ceci donne naissance principalement à des contrastes de résistivité et de permittivité, qui favorise les méthodes électriques et les méthodes radar qui sont sensibles à ces variations.

La détection des fissures par méthodes géophysique est utilisée dans de nombreuses situations comme en hydrogéologie pour les réservoirs naturels en Afrique ou pour la présence de défaillance dans les structures de ponts. Dans le cas de structures en béton en génie civil, une étude précédente (Lataste, *et al.*, 2003b) donne un tableau récapitulatif (tab. 2-1) sur la sensibilité de certaines méthodes à la détection de la fracturation :

Tableau 2-1: Comparaison de méthodes géophysiques à la détection de la fracturation. Source: Lataste, 2003.

Method	Detection	Sitting	Type of crack	Characterisation	Commentaries
Visual/video inspection	Partial	Partial	Emergent crack only superficial	Orientation Moisture condition Opening Following in time (video)	Not adapted to delamination
Interferometry (holography, speckle)	Yes	Yes	Emergent crack	Orientation	Interf. speckle adapted for large surface sounding
Acoustic (surface waves impact echo)	Yes	Yes	Delamination Emergent crack	Depth of delamination Evolution following *	Sensitive to crack depth Acoustic emission
Ultrasonic	Yes	Yes	Delamination Emergent crack	Emergent crack depth Crack density	
Infrared thermography	Yes	Yes	Emergent active crack		Adapted to detect disorders for large surface auscultation
Electrical resistivity	Yes	Yes	Delamination Emergent crack Delamination	Orientation Moisture condition	Sensitive to crack depth Sensitive to crack opening (bridge density)

La méthode de résistivité électrique apparaît comme très compétente dans la détection de fissures. L'utilisation de la méthode électrique pour l'étude de la fracturation a fait l'objet dans de nombreux travaux publiés. En particulier on retrouve l'étude de l'évolution de fissures en milieu sec (Samouelian, *et al.*, 2003) et la caractérisation des fissures par modélisation (Tabbagh, *et al.*, 2007). L'utilisation du GPR pour la détection de la fracturation a déjà été étudiée dans les carrières (Porsani, *et al.*, 2006), sur les massifs rocheux (Toshioka, *et al.*, 1995) et entre mais aussi spécifiquement sur les chaussées (Forest & Utsi, 2004). Tous les travaux cités ici confirment la possibilité de détection de fissures d'au moins l'ordre du centimètre avec les méthodes GPR et électrique. De plus, de nombreuses études de cas (Annan, 2001) montrent la capacité du GPR à détecter des cavités sous les dalles de béton ou des fissures dans les fondations routières. Divers exemples montrant l'utilisation fréquente du GPR et de l'électrique pour la localisation de réseaux karstiques (Pellerin, 2002) appuie le potentiel de ces méthodes à détecter des cavités saturées ou vides.

En particulier pour la détermination des défauts du béton, on retrouve des tests en laboratoire avec la méthode électrique pour la détection de la fissuration (Ai, *et al.*, 2008; Lataste, *et al.*, 2003a). La délamination, qui est un phénomène de dégradation dont un des effets est d'augmenter la porosité, est aussi détectable par méthode électrique et GPR (Halabe, *et al.*, 1996; Sbartaï, *et al.*, 2007).

Spécifiquement en auscultation routière au niveau de la détection des défauts structuraux, on retrouve principalement des travaux avec la méthode GPR sur chaussées souples.

## 2.3 La teneur en eau

Les méthodes électriques sont utilisées depuis de nombreuses années en hydrogéologie et particulièrement pour l'étude des zones non saturées et les fluctuations de nappes (Kean, *et al.*, 1987; Michot, *et al.*, 2003), l'utilisation du quadripôle électrostatique montre une possibilité d'évaluation de la teneur en eau à un niveau de précision assez élevé (Fechant, *et al.*, 1999). Le GPR se révèle tout aussi efficace surtout pour la détection du niveau de la nappe (profil de la teneur en eau) (Van Overmeeren, *et al.*, 1997) et il a déjà été utilisé dans l'étude d'infiltration d'eau dans les chaussées avec des résultats concluants (Grote, *et al.*, 2002). Un des domaines très actif dans l'auscultation non destructive est la caractérisation de l'état des bétons par suivi de la teneur en eau (Laurens, *et al.*, 2005; Sbartaï, *et al.*, 2007).

La variation de teneur en eau dans les matériaux de la chaussée peut être due à des changements saisonniers. Un changement de la teneur en eau n'annonce donc pas nécessairement une défectuosité. Une étude plus approfondie de la façon dont les propriétés physiques varient avec la teneur en eau peut aider à une meilleure interprétation (Saarenketo & Scullion, 2000; Scullion & Saarenketo, 1997) .

## 2.4 Calibration

Le GPR comme l'électrique sont des méthodes affectées par les contrastes et les valeurs absolues des propriétés physiques. Cela reste une analyse qualitative malgré les développements des méthodes d'inversion. Pour que les contrastes soient analysés de façon quantitative, il faut une référence, c'est à dire une calibration des appareils par rapport à ce que l'on souhaite observer. Pour chacune des méthodes proposées ici, il y a un conflit entre la profondeur de pénétration et la résolution souhaitée. De nombreux travaux portent sur la calibration du GPR pour l'auscultation des chaussées (Fauchard, *et al.*, 2003) en particulier pour la détection de l'épaisseur des couches (Choubane, *et al.*, 2003; Evans, *et al.*, 2006; Lenngren, *et al.*, 2000; Sener, *et al.*, 1998; Sonyok & Zhang, 2008). Par exemple, en étant la surface directement liée à la sécurité routière, l'épaisseur est un indicateur pour la planification de travaux de maintenance. Une variation d'épaisseur peut signifier que des défauts structuraux sont présents (Loulizi, *et al.*, 2003). On remarque à travers ces différents travaux que l'on revient souvent au problème de la détermination exacte des propriétés diélectriques des matériaux de la chaussée. En effet, la connaissance des valeurs des

propriétés diélectriques permettrait des interprétations exactes des mesures. Une interprétation totalement automatisée de l'auscultation routière ne pourrait pas fonctionner du à la variabilité de ces propriétés (Saarenketo & Scullion, 2000).

## 2.5 Actuel défi : l'auscultation conjointe

Une des premières propositions de faire de l'auscultation conjointe CCR et GPR pour les sols urbains a été faite dans les années 90 (Geraads, *et al.*, 1992). Les méthodes radar et capacitive réagissent au même paramètre (permittivité) mais dans des bandes de fréquences différentes ce qui peut les rendre complémentaires (Derobert, *et al.*, 2008). Derobert *et al* (2008) propose aussi une utilisation complémentaire de ces méthodes au niveau de leur vitesse d'utilisation : le géoradar étant un outil rapide mais l'utilisation parallèle d'une méthode capacitive permettrait une précision plus grande et éliminerait la nécessité d'une calibration destructive. Différentes façon de considérer la complémentarité existent (Breysse, *et al.*, 2008). Plusieurs articles comparent les résultats du GPR et de la méthode CCR ou électrique dans des circonstances différentes : détection des variations de la teneur en eau (Binley, *et al.*, 2002), détection du permafrost et des lentilles de glace (De Pascale, *et al.*, 2008), détection des mines anti personnelles (Metwaly, 2007). En particulier dans le cas de la mesure de la teneur en eau, ces méthodes donnent des résultats cohérents et elles sont en générale proposées pour être utilisées en complémentarité. L'utilisation des méthodes GPR et CCR est même considérée pour effectuer une cartographie de la glace souterraine sur Mars : le GPR possédant une capacité certaine pour la détection des interfaces et des structures alors que le CCR fournit des informations plus précises sur les propriétés des matériaux (Wainstein, *et al.*, 2008). Des projets de plus en plus diversifiés sur l'utilisation conjointe de ces méthodes voient le jour mais on constate deux grands axes de recherche : la recherche de l'eau/glace et l'auscultation des structures entre autre la détection de l'humidité et des chlorures dans les bétons (Sbartaï, *et al.*, 2007). On constate une forte augmentation de l'utilisation de ces méthodes dans cette dernière décennie. Néanmoins, en auscultation routière, on préfère encore combiner le GPR avec le FWD (Falling Weight Deflectometer), une méthode reconnue pour déterminer la portance des chaussées (Scullion & Saarenketo, 1999).

## CHAPITRE 3 GEOTECHNIQUE ROUTIÈRE ET AUSCULTATION

La géotechnique correspond à l'étude des interactions sol/structures humaines. Pour adapter nos méthodes d'auscultation, on explicite les causes et les conséquences des divers phénomènes mécaniques auxquels sont soumises les structures routières.

### 3.1 La chaussée

#### 3.1.1 Généralités

Une chaussée est une construction extérieure comportant une base, usuellement appelée fondation, et une surface aménagée essentiellement destinées à l'usage de véhicules. Une approche systémique de la chaussée est montrée à la figure 3-1.

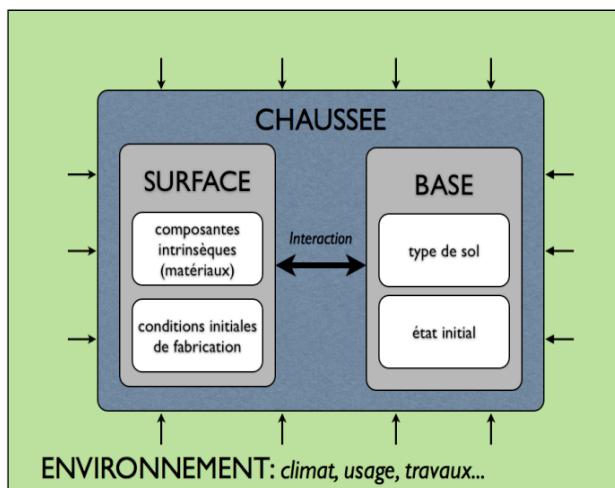


Figure 3-1: Approche systémique de la chaussée.

L'environnement de la chaussée est caractérisé par tout élément extérieur agissant sur la chaussée. Les principaux sont : les conditions climatiques (intempéries, variations de température), l'action des véhicules, les travaux venant modifier l'état initial de la structure (tranchée de réparation d'aqueduc, remplissage de nids de poule, pose de sels déglaçant). L'environnement extérieur est aussi composé du sol naturel sur lequel a été posée la chaussée. Dans certains cas, ce sol est de même nature que la fondation.

Généralement la « surface » est composée d'asphalte ou de béton (ou les deux) et la fondation est faite en matériaux granulaires. Ces deux parties interagissent entre elles, entre autres par transmission de contraintes mécaniques.

### 3.1.2 Types de chaussées

On considère 3 types de chaussées : les chaussées souples, les chaussées rigides et enfin les chaussées mixtes. Les chaussées urbaines montréalaises sont encore majoritairement des chaussées mixtes. On notera que le mot « béton » est utilisé pour désigner le béton de ciment et le mot « asphalte » pour désigner le béton bitumineux.

#### 3.1.2.1 Chaussées rigides



Figure 3-2: Schéma d'une chaussée rigide.

Les chaussées rigides (fig. 3-2) sont principalement présentes au niveau des grands axes urbains. Par exemple, la plupart des parties d'autoroutes présentes sur l'île de Montréal sont des chaussées rigides. La surface de roulement est constituée uniquement de la dalle de béton. Ce type de chaussée est facile à mettre en place. Elles sont aussi plus résistantes au gel. Dans l'absolu, on peut aussi considérer les ponts routiers comme des chaussées rigides.

#### 3.1.2.2 Chaussées souples

Les chaussées souples au Québec sont généralement réalisées pour des autoroutes ou des routes hors secteurs urbanisés. Elles consistent en une fondation faite de différentes couches granulaires et une couche d'asphalte en tant que surface de roulement pour les véhicules (fig. 3-3). Elles ne sont pas rigidifiées par la dalle de béton ce qui peut permettre une meilleure absorption des déformations. La principale contrainte de construction est le drainage qui doit être d'autant mieux réalisé qu'il assure l'état durable de la chaussée. La tendance actuelle pour la Ville de Montréal est de réhabiliter la majorité des chaussées mixtes en chaussées souples.

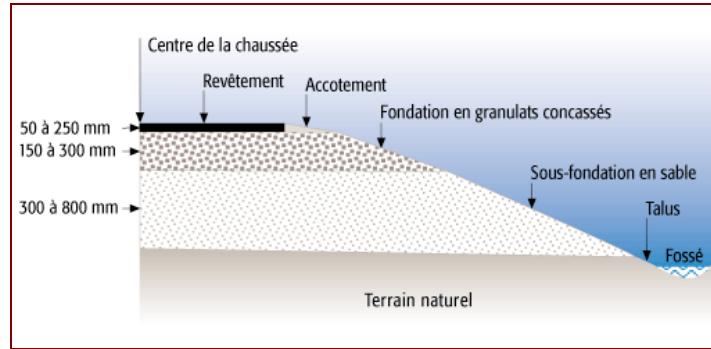


Figure 3-3: Schéma d'une autoroute en chaussée souple. Source MTQ. *Note : le fossé est présent en contexte rural.*

### 3.1.2.3 Chaussées mixtes

Les chaussées mixtes (fig. 3-4) sont plutôt présentes en milieu urbain. La dalle de béton peut comporter des armatures mais elle ne l'est pas dans la majorité des cas. Pour ce type de chaussée la fondation est souvent composée du sol déjà présent avant la construction de la chaussée et la présence de la dalle de béton pallie aux problèmes de compactage de la fondation.

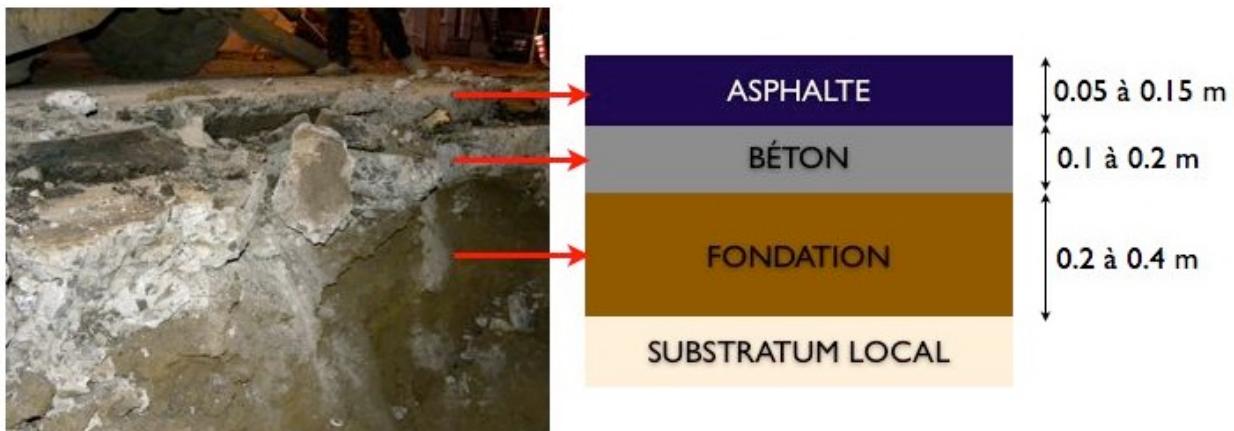


Figure 3-4: Photo et schéma d'une chaussée mixte.

À Montréal, le béton de ciment a été coulé sur le sol naturel après planage. Plus tard, la couche d'asphalte est mise en place pour corriger les imperfections de la dalle de béton. Avec l'effet du cycle de gel et degel, les défauts réapparaissent en surface.

### 3.1.3 Contraintes géotechniques

Pour permettre aux véhicules d'atteindre une certaine vitesse en toute sécurité, la chaussée doit avoir une certaine capacité portante. On définit cette dernière par la charge maximale que la chaussée peut supporter sans subir de déformations. Tout objet présent sur la couche de surface de la chaussée crée un effort sur cette dernière. Cet effort est transformé en contraintes internes dans les matériaux de la chaussée. La figure 3-5 montre des exemples de répartitions des efforts dans une chaussée mixte et une chaussée souple. La charge représentée par le véhicule se transmet dans les différentes couches.

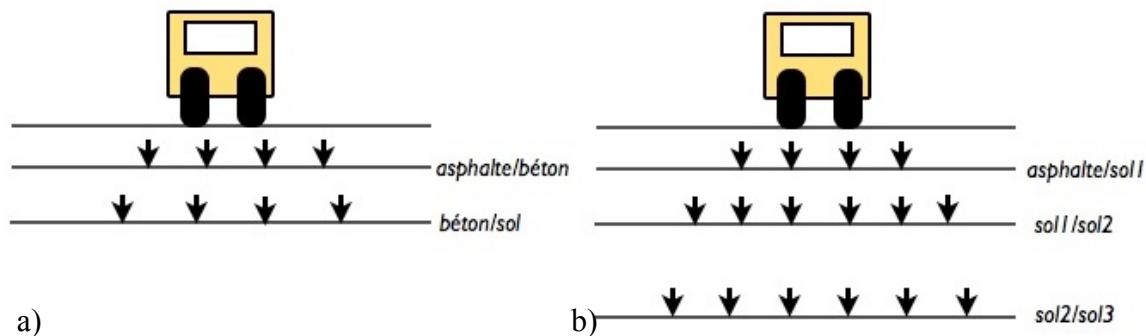


Figure 3-5: Exemples de répartition des charges dans les différentes couches d'une chaussée. a) chaussée mixte, b) chaussée souple.

La capacité portante de la chaussée est directement reliée à la façon dont les contraintes se répartissent dans les différentes couches de la chaussée. Pour un sol au repos, on définit les contraintes en fonction de paramètres intrinsèques (fig. 3-6).

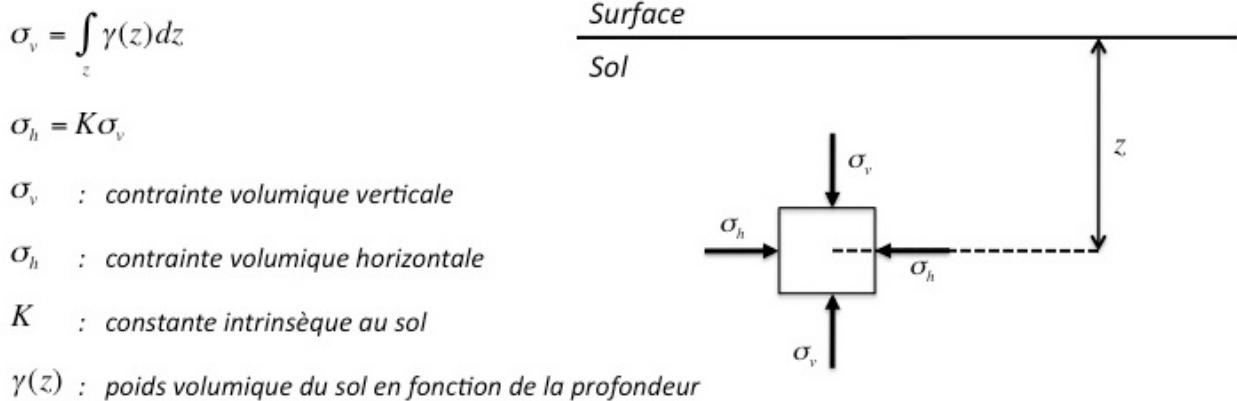


Figure 3-6: Contraintes géotechniques dans un sol de nature homogène.

Les contraintes (et la capacité portante) sont dépendantes du poids volumique du sol en fonction de sa profondeur et par conséquent de la saturation en eau. En fonction du type de sol, de la compaction, de la consolidation et du profil de la teneur en eau, la capacité portante peut grandement varier. Dans le cas d'une chaussée mixte, l'analyse se complique. Les éléments supplémentaires à prendre en compte sont (liste non-exhaustive):

- le module de compression de l'asphalte
- le module en compression du béton
- le degré de fissuration
- la continuité des interfaces
- le compactage de la fondation

La capacité portante et la qualité de la chaussée dépendent principalement de trois conditions :

- La construction initiale : Une mauvaise construction initiale entraîne des caractéristiques intrinsèques des matériaux non optimales avec un plus fort potentiel de dégradation.
- L'usure: Les charges et décharges successives dues au passage des véhicules usent la chaussée et la dégradent.

- Le climat : En fonction des conditions climatiques, les infiltrations d'eau varient, ou il y a le phénomène de gel/dégel (matériaux gonflent) et on pose des sels déglaçants...

### 3.1.4 Les défauts de la chaussée

On dresse une liste non-exhaustive des défauts des chaussées mixtes. Pour une liste plus détaillée et avec des explications concernant les méthodes de réparations, le lecteur est invité à consulter les publications du MTQ (MTQ, 1997, 2007)

#### 3.1.4.1 Défauts de surface

Ils sont observables visuellement (fig. 3-7). Ils sont reliés directement à l'adhérence des pneus, la sécurité routière et le confort. On y retrouve les ornières, les bourrelets, les nids de poules, la disparition d'asphalte et les ondulations du bitume, le ressuage (remontée bitumineuse à la surface de l'asphalte) et les surfaces glissantes.



Figure 3-7: Nid de Poule conséquent. Rue Christophe-Colomb, été 2009.

#### 3.1.4.2 Dégradation des joints

Les joints sont souvent des éléments qui apparaissent lors des réparations de voirie, ou bien parfois (souvent dans le cas de chaussées rigides) dès la construction de la chaussée. Toute discontinuité présente dans une couche de la chaussée sensibilise cette dernière. Les défauts au niveau des joints entre dalles de béton se caractérisent le plus souvent pas des déplacements différentiels et entraînent des fortes pertes d'étanchéité.

### 3.1.4.3 Fissurations



Figure 3-8: Fissure dans un béton de chaussée.

La fissuration (fig. 3-8) est le défaut le plus courant et un des plus nocifs car une fois entamée, la fissure ne fait que s'agrandir<sup>1</sup>. On différencie la fissuration de l'asphalte et celle du béton. Les fissurations sont principalement dues à l'action conjointe de l'eau et des contraintes auxquelles les matériaux de la chaussée sont soumis. Elles sont de toutes sortes, transversales, longitudinales (Ministère des Transports du Québec, 1997, 2007).

On considère peu la fissuration dans les fondations à cause de leur nature granulaire. Toutefois dans le cas de fondations à forte teneur en argile et soumises à des fortes variations de la teneur en eau des fissures peuvent apparaître.

### 3.1.4.4 Défauts spécifiques aux bétons

Dans les chaussées mixtes, la dalle de béton assure principalement la cohésion de la chaussée. Elle est fortement sollicitée et les défauts liés aux bétons sont importants à prendre en compte. De par la position des dalles au milieu de la chaussée, on peut rarement observer les dégradations sans méthodes destructives. De nos jours, le béton et le ciment sont utilisés presque systématiquement en génie civil et leurs défauts sont bien connus dans l'ensemble. On retrouve dans les défauts les plus communs pour les structures du génie civil:

---

<sup>1</sup> Il existe un phénomène d'autocicatrisation du béton mais il est encore mal connu et pourrait difficilement se produire dans le cas d'une chaussée.

**La délamination :** dégradation du béton en feuillets en surface de la dalle. Ceci peut apparaître lorsqu'il y a un phénomène d'érosion en surface de la dalle comme des frottements solides ou un écoulement.

**Les défauts de coulis :** le béton est un matériau granulaire sous sa phase solide, liquide lors de sa mise en place et qui se solidifie après la pose. Il faut assurer une certaine viscosité ou liquéfaction lors de sa mise en place, ainsi qu'une certaine cohésion entre le ciment (liant) et les granulats. Les défauts engendrés par une mauvaise gestion de ces paramètres sont appelés les défauts de coulis : apparition de vides, mauvais placement...

**L'écaillage :** Le phénomène d'écaillage est la formation en surface d'un réseau de fissures plus ou moins profonde (fig. 3-9). L'écaillage conduit souvent à un détachement de plaques de béton en surface de la dalle.



Figure 3-9: Écaillage transformé en fissure sur le haut de la photo et peu profond sur le bas.

**L'oxydation des bétons :** l'utilisation de sels déglaçants vient oxyder les bétons en se propageant dans la matrice cimentaire. Les réactions chimiques en jeu sont diverses et complexes mais fragilisent la matrice cimentaire et sa cohésion.

On peut aussi parfois retrouver des cavités dans le béton possiblement dues au gel-dégel ou à des défauts inhérents au béton dès sa mise en place. Certains défauts énoncés plus haut peuvent donner suite à ces cavités ou aux fissurations plus profondes.

### 3.1.4.5 Problèmes principalement liés à la fondation

La fondation de part sa caractéristique granulaire a un comportement mécanique très influencé par le degré de saturation en eau et les cycles de gel-dégel (variation de teneur en eau). Ces derniers peuvent entraîner la formation de cavités. Les cavités font grandement diminuer la capacité portante, ce qui peut provoquer une rupture de la dalle de béton. Ce défaut est très pernicieux car il n'est pas identifiable visuellement et il s'aggrave rapidement.

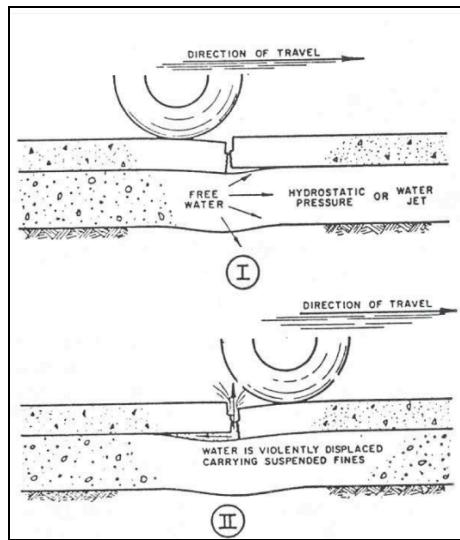


Figure 3-10: Illustration phénomène de pompage (Ridgeway, 1987).

#### 3.1.4.5.1 saturation/désaturation :

##### Pompage:

Lorsqu'un véhicule passe sur une chaussée saturée en eau avec une certaine vitesse, il se crée une augmentation de pression interstitielle principalement dans la fondation. Cette vague induit une érosion aux interfaces des différents milieux. De plus, s'il existe déjà de la fissuration dans la dalle de béton ou dans l'asphalte, il apparaît un phénomène de pompage (fig. 3-10) qui entraîne des particules des matériaux des chaussées vers la surface.

##### Lessivation :

Une forte saturation ou une fuite des conduites d'aqueduc peuvent créer un gradient hydraulique dans la fondation. Ce dernier entraîne les particules fines. Lors de la désaturation, le volume de

matériau granulaire a été modifié et il peut y avoir apparition de cavités. On appelle ce phénomène la lessivation.

### 3.1.4.5.2 Phénomène de gel et dégel

L'eau contenue dans les chaussées gèle lors de la période hivernale (entre novembre et mai environ). Comme le volume de l'eau augmente lors de son passage de l'état liquide à l'état solide, la pression dans les pores augmente. Ceci peut avoir pour effet d'augmenter le volume des pores. En revenant à son état liquide l'eau ne remplit plus tout le volume des pores et l'état de la fondation a été modifié. Les images issues du MTQ (fig. 3-11 et 3-12) décrivent bien le phénomène observable dans le cas d'une chaussée souple.

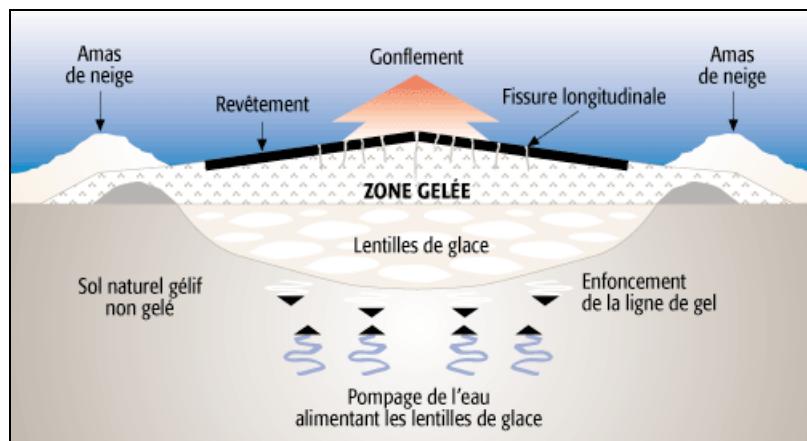


Figure 3-11: Déformation de la route sous l'effet du gel (MTQ)

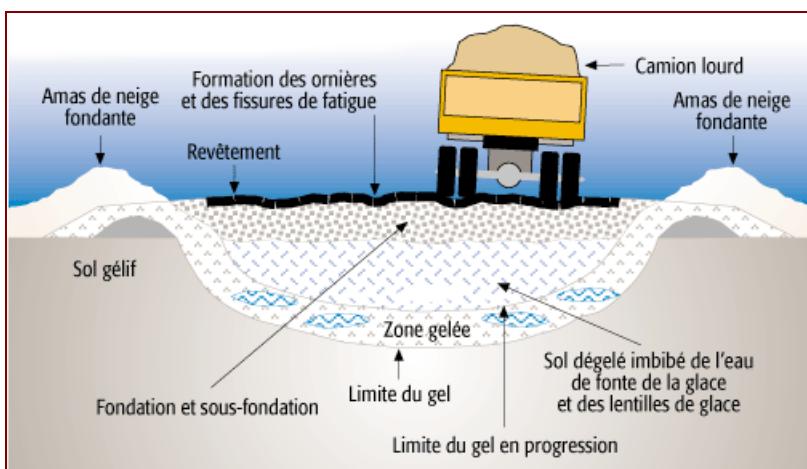


Figure 3-12: Déformation de la route sous l'effet du dégel (MTQ).

#### 3.1.4.5.3 *Compactage déficient :*

Si le compactage initial de la fondation n'a pas été fait correctement alors le volume des vides initial peut être trop important dans la fondation. La présence de ces vides (remplis d'eau ou non) amplifie tous les phénomènes décrits précédemment.

Tout défaut dans la fondation peut être une cause indirecte ou directe d'apparition de défauts dans la couche de surface (asphalte et béton).

#### 3.1.4.6 Divers

On retrouve dans les défauts divers, les trainées laissées par le chasse-neige (raclage du véhicule de déneigement) en hiver, des rails de tram (fig. 3-13) qui ont juste été recouverts par l'asphalte au lieu d'être démontés, oxydation des dalles en béton armé...



Figure 3-13: Défauts divers. Traces de chasse-neige à gauche et anciens rails de tramway enfouis à droite.

### 3.1.5 Auscultation et évaluation des chaussées

#### 3.1.5.1 Indicateurs

On distingue plusieurs indicateurs concernant l'état des chaussées. Ils servent généralement à évaluer la sécurité et le confort de la route. Quelques uns sont :

**L'IRI** (*Indice de Rugosité Internationale* ou *International Roughness Index*) : caractérise le confort, grâce au principe de l'uni d'une chaussée (MTQ, 2008). L'uni d'une chaussée étant l'irrégularité du profil longitudinal à l'emplacement des traces de roues par rapport à une surface de référence plane.

**Skid Number** : coefficient directement lié à l'adhérence de pneus standardisés lors d'un dérapage sur la chaussée (Bazlamit & Reza, 2005).

**La profondeur des ornières** : les ornières sont les déformations de l'asphalte à la hauteur des traces de roues (en rapport aux ornières des anciens chemins de terre).

**La présence de fissuration** : on considère ici la présence de fissuration au niveau de l'asphalte.

**Le PCI** (Pavement Condition Index) : indexation descriptive de l'état de la chaussée. Cela consiste à remplir une liste de plusieurs critères en les notant sur une échelle de 1 à 10. Le PCI est parfois considéré comme une norme (par exemple, la norme américaine ASTM D5340-10 pour les pistes d'aéroport).

**L'IP** (indice de performance) : correspond à la prise en compte de l'IRI et de l'orniérage.

Le PCI fait l'unanimité dans la communauté internationale (Cuviller, *et al.*, 1987) ; toutefois il est fortement critiqué par Benedetto (2007) pour son manque de prise en compte de la sécurité et il n'est pas associé à des protocoles de réhabilitation. Cet indice est un exemple type d'approche purement mécanique. L'association de l'IRI et du Skid Number donnerait une meilleure estimation de l'état de la chaussée d'un point de vue utilisation (Benedetto, 2007).

Au Québec, le Ministère du Transport du Québec (MTQ) considère principalement l'IRI et l'orniérage (MTQ, 2008). Pour réaliser ces bilans en fonction de ces deux indicateurs, on utilise un camion équipé (fig. 3-14) de caméras qui enregistrent l'état de la route, et de niveaux qui calculent les dénivélés par rapport à la surface globale de la route (variations locale du niveau de l'asphalte).



Figure 3-14: Camion MTQ équipé d'un niveau laser et d'une caméra (MTQ)

On peut aussi définir l'état d'une chaussée par la moyenne des défauts et leur importance (MTQ, 2007).

### 3.1.5.2 Techniques d'auscultation

A ce jour, les techniques d'auscultation de l'état des chaussées sont de diverses sortes. On peut toutefois distinguer quatre grands types de méthodes.

#### Visuelles

Ces techniques consistent principalement à parcourir la chaussée sur un appareil muni d'un odomètre et de noter à chaque kilométrage les problèmes observés et leurs caractéristiques. Parfois, on fixe une caméra sur un véhicule et enregistre l'image de la route. L'avantage du véhicule est que parfois on fixe un niveau « laser » à l'avant qui permet de calculer en même temps si la route présente des déformations de surface. Les auscultations visuelles sont très instructives mais ne présentent pas une finalité et nécessitent des tests plus approfondis. Les techniques visuelles sont aussi très sensibles à l'interprétation. Ces techniques servent beaucoup pour l'indexation de la chaussée (voir paragraphe 3.1.5.1).

#### Géomécaniques

Les principaux tests géomécaniques sont appelés tests de déflexion ou Falling Weight Deflectometer (FWD). Ils servent à déterminer la capacité de la chaussée à supporter le trafic lourd. Ces tests se font généralement avec du matériel lourd et encombrant bien que des équivalents plus maniables existent. Ils nécessitent une chaussée libérée ce qui n'est pas très

pratique et il faut en plus prendre note de l'environnement extérieur au moment des tests (température, humidité, etc). Toutefois, le FWD est une méthode non destructive donnant directement accès aux données mécaniques de la chaussée et à la capacité portante.

### **Destructives**

Les tests destructifs désignent des sondages, souvent l'extraction d'une carotte de terrain ou bien même l'ouverture de la chaussée. Cette méthode laisse peu de place à l'interprétation mais elle est ponctuelle spatialement et temporellement et elle entraîne des frais de matériels, de restauration de la chaussée et aussi une interruption de trafic.

### **Géophysiques**

On entend par méthodes géophysiques, des méthodes d'auscultation non destructives et qui font appel aux propriétés physiques des matériaux terrestres. De l'utilisation de ces méthodes résultent des données le plus souvent affichées sous forme d'images qu'il faut alors interpréter. Les principales utilisées pour les chaussées et en génie civil ou en étude à ce jour sont la méthode thermique infrarouge, les méthodes électriques et le géoradar ou radar géologique (Ground Penetrating Radar ou GPR en anglais).

La méthode infrarouge permet de mesurer les variations de température de l'asphalte grâce à son rayonnement infrarouge. Détecter les variations dans le rayonnement infrarouge de l'asphalte revient à réaliser le même type de mesures que lors d'une radioskopie humaine. On peut alors repérer les mini fissures dans l'asphalte et le décollement entre l'asphalte et la dalle de béton sous-jacente, même si la chaussée est recouverte d'une couche de glace ou d'eau. Le principal problème de cette méthode est que la profondeur d'auscultation reste limitée à la surface d'asphalte et les conditions d'application sont plutôt restrictives car il ne faut pas que la chaussée soit trop chaude ou trop froide.

Les techniques du radar géologique et de résistivité électrique sont des techniques d'auscultation qui peuvent être réalisées en continu (au moyen d'un chariot à l'arrière d'un véhicule par exemple). Le radar permet de déterminer les différentes épaisseurs de la chaussée et la méthode résistive est très sensible à la teneur en eau. Indépendamment l'une de l'autre, elles sont sensibles aux hétérogénéités qui représentent les défauts des chaussées. Utilisées couplées, elles se complètent et cela facilite l'interprétation des mesures. Ce sont ces méthodes qui sont étudiées dans ce mémoire.

## CHAPITRE 4 MÉTHODES RADAR ET ÉLECTRIQUE

Ce chapitre se veut un survol de ces deux méthodes et l'essentiel nécessaire à la compréhension du projet sera présenté. Pour des présentations plus approfondies et complètes, le lecteur est invité à consulter des ouvrages généraux (Burger, *et al.*, 1992; Reynolds, 1997; Telford, 1990).

### 4.1 Définitions

#### 4.1.1 Matériaux granulaires et composites.

Un matériau est considéré comme granulaire à partir du moment où il est composé de grains (liés ou non) et de vides. Les sables et les sols sont des matériaux granulaires. Plus généralement, on appelle un matériau composite un matériau composé de grains et d'une matrice plus ou moins poreuse. Les vides présents dans les matériaux composites sont appelés les pores. On définit la porosité par :

$$\phi = \frac{\text{VolumeVides}}{\text{VolumeTotal}}$$

Les pores peuvent être remplis par de l'eau ou un liquide, on définit alors la saturation (S) par le pourcentage de pores remplis par la phase liquide (l'eau dans le domaine d'étude).

$$S = \frac{\text{VolumeEau}}{\text{VolumeVides}}$$

Un matériau est complètement saturé (S=1) en eau quand le fluide remplit la totalité de ses pores.

En fonction de la porosité ( $\phi$ ) et de la saturation (S) d'un matériau, on obtient sa teneur en eau volumique  $\theta$  :

$$\theta = \frac{\text{VolumeEau}}{\text{VolumeTotal}} = \phi \times S$$

#### 4.1.2 Propriétés diélectriques

Les propriétés diélectriques d'un matériau influencent la propagation et la diffusion des ondes électromagnétiques dans ce matériau. Elles sont dépendantes des caractéristiques intrinsèques des matériaux et de la proportion de constituants.

### **Conductivité électrique:**

On définit la conductivité électrique par la capacité d'un matériau à laisser passer un courant électrique. On la note  $\sigma$ . Son unité est le Siemens par mètre (S/m). La conductivité dépend principalement de la présence de métaux et/ou de la présence d'ions. A l'inverse la résistivité notée  $\rho$  est la capacité d'un matériau à empêcher le passage du courant (en  $\Omega \cdot \text{m}$ ).

### **Permittivité et constante diélectrique :**

La permittivité  $\epsilon$  d'un matériau caractérise la capacité de polarisation des charges sous l'effet d'un champ électrique appliqué. On l'exprime en  $\text{A.s.V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  (Ampère-secondes par volts par mètres). Lorsque le champ électrique imposé disparaît, il y a relaxation de l'énergie emmagasinée. La variation de permittivité des milieux cause des réflexions, des transmissions et des réfractions aux interfaces lors de la propagation d'ondes EM. La constante diélectrique, aussi appelée permittivité relative  $\epsilon_r$  (sans unité) est le rapport de la permittivité d'un milieu sur la permittivité du vide  $\epsilon_0$ .

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi 10^{-9}} \quad \text{A.s.V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

Pour les matériaux à pertes diélectriques (atténuation d'énergie lors de la propagation de l'onde EM), on définit la conductivité complexe  $\sigma^*$ , la permittivité complexe  $\epsilon^*$ , la permittivité réelle effective  $\epsilon^e$  et la conductivité réelle effective  $\sigma^e$  (Cassidy, 2009; King & Smith, 1981).

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$$

$$\sigma^* = \sigma' + \sigma''$$

$$\epsilon^e = \epsilon' - \frac{\sigma'}{\omega}$$

$$\sigma^e = \sigma' + \epsilon'' \omega$$

On en déduit la permittivité complexe effective (Reynolds, 1997) :

$$\epsilon_e^* = \epsilon' - j \left( \epsilon'' + \frac{\sigma_s}{\omega \epsilon_0} \right)$$

Avec  $\epsilon' = \epsilon$ , permittivité réelle;  $\sigma_s$ , la conductivité électrique (définie plus haut) du matériau.

Plus la conductivité du matériau est élevée, plus la partie imaginaire de la permittivité complexe est élevée. Lorsque le rapport de la partie imaginaire de la permittivité sur la partie réelle n'est pas négligeable par rapport à 1, alors on dit que le matériau est un matériau à pertes diélectriques.

Le tableau 4-1 montre quelques exemples de valeurs, tirées de la littérature, de ces propriétés physiques pour certains matériaux.

Tableau 4-1: Propriétés diélectriques de quelques matériaux (Burger, *et al.*, 1992; Reynolds, 1997) :

matériau	$\sigma$ (mS/m)	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\epsilon_r$ (sans unité)
air	0	$\infty$	1
eau	0.5	2000	81
eau de mer	3000	0.33	81
glace	0.01	100000	3-4
eau de mer glacée			2-8
sable sec	0.01	100000	3-6
sable humide	0.1-10	10000-100	25-30
asphalte	.1-1	1000-10000	3-5
béton	1-3	300-600	6-30

### ***Influence de la constitution :***

Les propriétés diélectriques et la conductivité électrique sont dépendantes de la constitution des matériaux. Pour les matériaux composites, il existe des relations impliquant la porosité et la saturation et par conséquent la teneur en eau.

Pour les sols, la loi semi-empirique d'Archie (Archie, 1941) est fréquemment utilisée :

$$\sigma = a \sigma_w \phi^n S^m$$

avec a, n et m des facteurs intrinsèques au sol étudié,  $\sigma_w$  la conductivité électrique de l'eau présente dans les pores.

Cette loi donne généralement une bonne approximation pour les sols granulaires avec une faible teneur en argile. Elle nécessite toutefois une première calibration à chaque nouveau sol étudié. Généralement pour des sables, on utilise  $a=1$ ,  $n=m=1.5$ .

Pour lien entre la permittivité ( $\epsilon$ ) et la teneur en eau volumique ( $\theta$ ), deux relations sont régulièrement utilisées ou référencées :

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_r - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_r^3 \quad (\text{Topp, et al., 1980})$$

$$\sqrt{\epsilon_r} = \phi S \sqrt{\epsilon_w} + (1 - \phi) \sqrt{\epsilon_m} + \phi (1 - S) \sqrt{\epsilon_a} \quad (\text{CRIM})$$

Avec :

$\epsilon_r$  permittivité relative du matériau,  $\epsilon_w$  permittivité relative de l'eau,  $\epsilon_m$  permittivité relative de la matrice,  $\epsilon_a$  permittivité relative de l'air.

La formule CRIM (Complex Refraction Index Method) est une adaptation de la loi généralisée des mélanges (Chouteau, 2009). Cette loi montre qu'une propriété d'un matériau peut être obtenue à partir d'une somme pondérée de la propriété des constituants.

$$A^n = \sum_i p_i A_i^n$$

Avec  $A$ , la propriété cherchée;  $p_i$  la proportion du constituant  $i$  et  $A_i$  la propriété du constituant  $i$ .

Comme la permittivité relative de l'eau est très élevée (81), on tend souvent à interpréter les variations de la permittivité d'un matériau granulaire par des variations de sa teneur en eau. De même pour un milieu conducteur, le courant se transmet souvent de façon ionique, c'est pourquoi la conductivité électrique de l'eau régit principalement la formule d'Archie. On retiendra que l'étude des variations des propriétés diélectriques des matériaux considérés pour ce projet est très proche de l'étude des variations de teneur en eau.

### ***Champ électromagnétique :***

Un champ électromagnétique est défini par la propagation couplée d'un champ électrique  $\vec{E}$  et un champ magnétique  $\vec{B}$ . Les relations qui régissent la propagation des ondes EM sont les quatre équations de Maxwell. Ces dernières décrivent les interdépendances entre ces deux champs.

Lorsqu'une onde se propage, les milieux réagissent en fonction de leurs propriétés électriques et diélectriques, cela crée ce qu'on appelle les courants de déplacements  $\vec{J}_D$  et les courants de conduction  $\vec{J}_C$  :

$$\vec{J}_C = \sigma \vec{E}$$

$$\vec{J}_D = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Dépendamment de la fréquence de l'onde EM, on aura soit une prédominance des courants de conduction ou des courants de déplacements :

- En haute fréquence, prédominance des courants de déplacements (Cas du GPR)
- En basse fréquence, prédominance des courants de conduction (cas de la résistivité électrique capacitive).

### **Remarques**

Les équations de Maxwell décrivent la propagation d'une onde EM en fonction des propriétés du milieu : la conductivité, la permittivité et la perméabilité magnétique  $\mu$ . Pour la majorité des matériaux de la chaussée, on constate qu'ils sont non magnétiques et leur perméabilité magnétique est considérée constante et égale à celle du vide.

## **4.2 Application au GPR**

### **4.2.1 Généralités**

Le géoradar est constitué d'un émetteur (ou transmetteur : Tx) et d'un récepteur (Rx). Il émet et reçoit des impulsions électromagnétiques hautes fréquences, dont la fréquence centrale est généralement comprise entre 100 MHz et 3GHz (domaine des micro-ondes). À ces fréquences, on considère que l'on est en mode propagatif, c'est à dire que les courants de conduction sont négligeables. Dans ces conditions, on approxime le trajet des ondes par des rais comme en optique géométrique (loi de Snell-Descartes). On la caractérise par les éléments suivants:

- **vitesse de phase** :  $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$  (m.s<sup>-1</sup>) où c est la vitesse de la lumière  $3.10^8$  m/s

- **l'atténuation** :  $\alpha = \frac{60\pi\sigma}{\sqrt{\epsilon_r}}$  (dB.m<sup>-1</sup>) avec  $\sigma$  en mS.m<sup>-1</sup>.
- **le coefficient de réflexion** : soit 2 milieux caractérisés respectivement par  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$ . Si l'onde traverse du milieu 1 vers le milieu 2 avec une incidence normale, le coefficient de réflexion à l'interface est défini par :

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

Dépendant du contraste entre les milieux, l'amplitude de l'onde réfléchie sera plus ou moins forte.

Il existe plusieurs façons de réaliser des mesures GPR, dépendamment de la configuration Tx-Rx et de la position du radar par rapport au sol. La mesure en réflexion, qui consiste à enregistrer l'onde réfléchie par le sol, est probablement une des plus utilisée.

#### 4.2.2 Configurations

Reflection Profiling (levé en réflexion): le transmetteur et le récepteur sont fixes l'un par rapport à l'autre, c'est le système entier qui se déplace le long du profil (fig. 4-1). Dans cette configuration, on mesure l'onde réfléchie à chaque interface du sol (fig. 4-2). Les informations pouvant être exploitées sont le temps de parcours entre Rx et Tx et l'amplitude de l'onde. Si on possède une information externe telle que la stratification exacte à un emplacement du profil alors on peut théoriquement déterminer les caractéristiques des matériaux et quantifier les informations du levé. Cette technique est particulièrement utilisée pour la détection d'objets enfouis, de cavités, d'anomalies localisées ou de variations le long du profil.

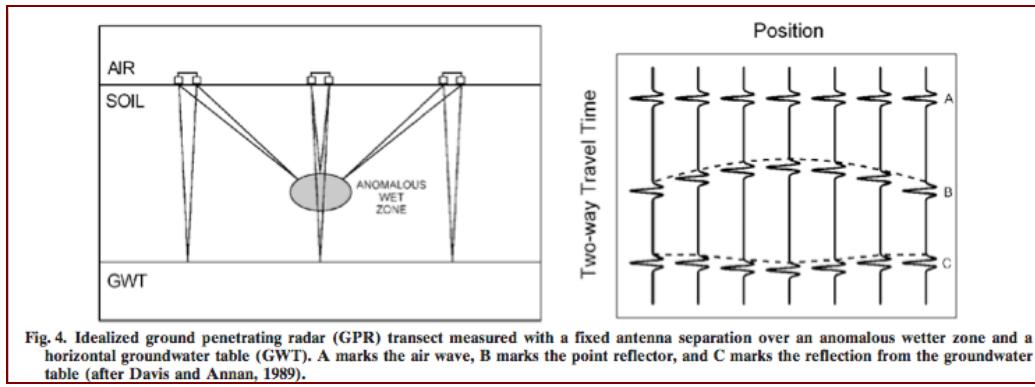


Figure 4-1: Principe de mesure GPR en réflexion dans le cas d'une anomalie le long d'un profil (Huisman, *et al.*, 2003).

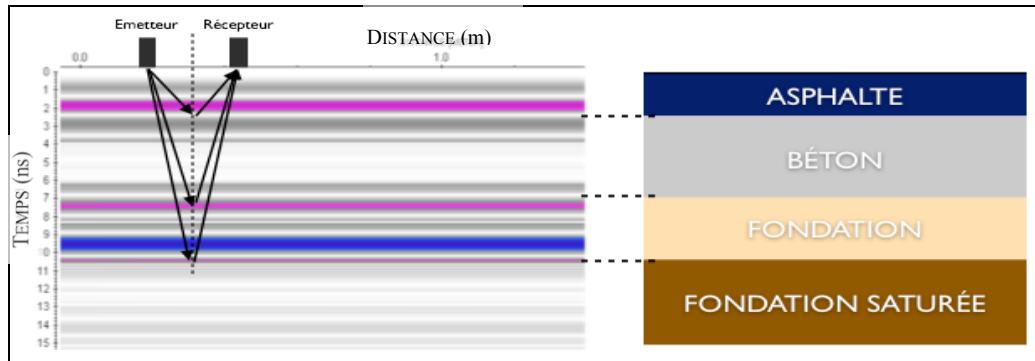


Figure 4-2: Levé GPR en réflexion avec modèle correspondant.

Wide Angle Reflection and Refraction (WARR) : L'émetteur est fixe, c'est le récepteur qui se déplace. On peut alors recevoir aussi bien les signaux réfléchis que réfractés à partir d'un certain angle (fig. 4-3 et 4-4). Les informations pouvant être théoriquement obtenues directement grâce à cette technique sont les vitesses de l'onde électromagnétique dans les différentes épaisseurs. Cette configuration est utilisée principalement pour les analyses de vitesses et parfois pour la détection du profil de la teneur en eau dans les sols.

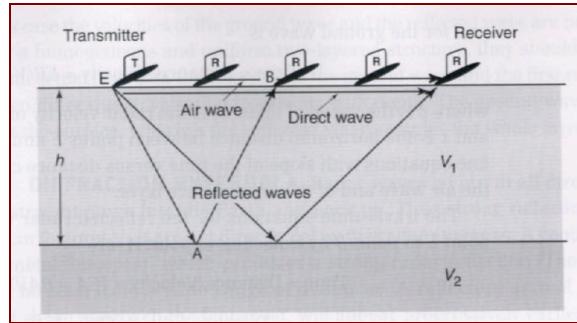


Figure 4-3: Profilage en WARR (Burger, *et al.*, 1992).

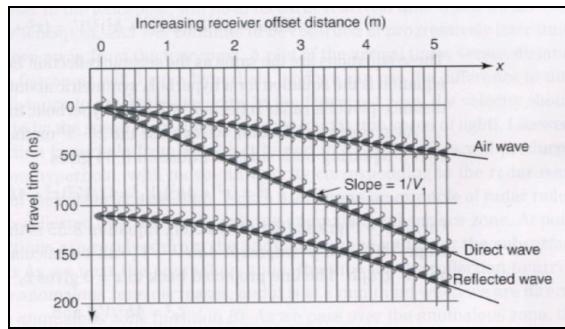


Figure 4-4: Données obtenues pour la configuration fig.4-3 (Burger, *et al.*, 1992).

## 4.2.3 Systèmes

### 4.2.3.1 Antennes radar

D'une façon générale, les GPR sont conçus pour que la distance antenne-sol (soit la tranche d'air) soit telle que la transmission d'énergie dans le sol soit maximale, c'est à dire, que le couplage soit optimal. En fonction des GPR, on distingue deux types distincts d'antennes : les antennes en contact avec le sol ou situées très proches du sol dites « ground-coupled antennas » et celles positionnées en hauteur (donc avec une tranche d'air entre le sol et le dispositif émetteur-recepteur) « air-coupled antennas ».

- **Ground-coupled antennas** : ces antennes sont celles qui possèdent généralement la meilleure profondeur d'investigation. Toutefois, parce que leur utilisation implique un contact constant ou une distance faible et constante avec le sol, on ne peut pas dans la plupart des cas atteindre des vitesses d'auscultation très élevées (maximum 30km/h).

- Air-coupled antennas : de part leur position élevée, ces antennes permettent des levés à vitesse du trafic (jusqu'à 100km/h). Néanmoins, leur profondeur d'investigation est limitée aux couches supérieures de la chaussée.

#### 4.2.3.2 Exemples de GPR

*Le PulseEkko 1000 :*

Développé par la compagnie Sensors & Software le PulseEKKO 1000 peut être utilisé avec plusieurs antennes. Dans notre cas, on considère principalement l'antenne de 900MHz. Ce GPR est ici (fig. 4-5) tracté à l'arrière d'une voiture associé avec un odomètre (la roue sur la photo) qui permet de faire des mesures à pas constant. Il a été utilisé pour la partie terrain de ce projet équipé avec les antennes 900MHz et 450MHz.



Figure 4-5: Pulse Ekko à l'arrière d'un véhicule et roue odomètre.

*Le Noggin Smart Cart :*

Ce radar géologique est aussi développé par Sensors & Software. Dans le cas de son utilisation dans les projets précédents, il était équipé d'une antenne 1GHz. Il est poussé par l'utilisateur; un odomètre situé dans une des roues permet l'échantillonnage à pas constant et une console de contrôle permet à l'utilisation de contrôler les paramètres d'acquisition (fig. 4-6).



Figure 4-6: Noggin Smart Cart en utilisation.

*Autres systèmes :*

Il existe aussi sur le marché des systèmes pouvant associer plusieurs antennes de différentes fréquences à condition que leurs fréquences centrales soient suffisamment dissociées l'une de l'autre. Le système ci-contre dit horn-antenna est un exemple type de air-coupled antenna et développé par GSSI (fig. 4-7).

Jusqu'à présent les radars utilisés au Laboratoire de Géophysique Appliquée dans les projets précédents sur l'auscultation des chaussées urbaines sont le PulseEkko 1000 et le Noggin Smart Cart.



Figure 4-7: "Air-coupled antennas" développées par GSSI.

## 4.3 Application à l'électrique

### 4.3.1 Généralités

La méthode de résistivité électrique permet de remonter à la résistivité (ou conductivité) des matériaux par injection de courant et mesure du potentiel résultant. Le concept théorique qui régit cette méthode est exactement la définition des courants de conduction écrite précédemment et appelée loi d'Ohm sous sa forme simple:

$$\Delta V = R \times I$$

La loi d'Ohm dit que la différence de potentiel  $\Delta V$  (en Volts) mesurée aux bornes d'un objet est égale au produit du courant  $I$  (en Ampères) auquel est soumis l'objet de résistance  $R$  (en Ohm). La figure 4-8 illustre ce principe.

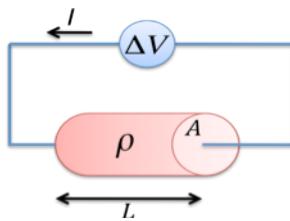


Figure 4-8: Schéma électrique d'illustration de la loi d'Ohm.

On définit alors la résistance  $R$  d'un objet cylindrique et homogène par :  $R = \rho \frac{L}{A}$

Où  $\rho$  est la résistivité du matériau en  $\Omega \cdot \text{m}$ ,  $L$  la longueur du matériau en mètres et  $A$ , sa section en mètres carrés.

On a donc la relation :

$$\rho = \frac{A \Delta V}{L I}$$

$$\rho = K \times \frac{\Delta V}{I}$$

On appelle  $K$  le facteur géométrique. Dans le cas des mesures de résistivités des sols,  $K$  est dépendant de la géométrie formée par les électrodes et de la topographie du sol.

### 4.3.2 Application au terrain

La méthode de résistivité électrique consiste à mesurer la réponse en potentiel d'un milieu suite à une injection de courant. On injecte du courant dans le sol via des électrodes appelées électrodes de courant et dénommées souvent A et B ou C1 et C2. On mesure le potentiel aux bornes d'un autre dipôle. Ce dipôle est constitué des électrodes de potentiel dénommées M et N ou P1 et P2. Suivant la position du dipôle de potentiel par rapport au dipôle de courant, on attribue la résistivité mesurée à un point situé entre les deux dipôles à une pseudo-profondeur estimée fonction de la séparation des dipôles comme sur la figure 4-9. Comme il y a des hétérogénéités dans le sol, la résistivité mesurée sera une résistivité apparente que l'on nommera  $\rho_a$ .

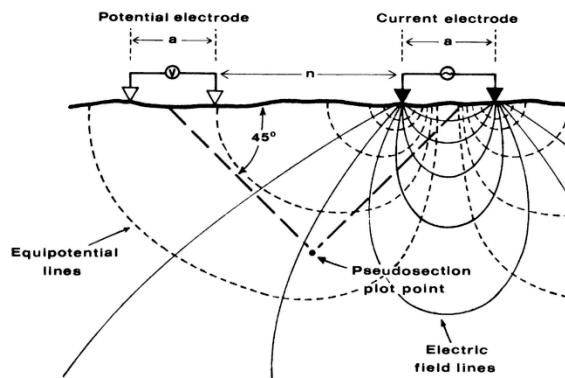
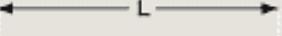
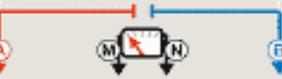
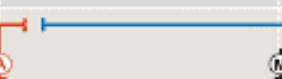


Figure 4-9: Configuration dipôle-dipôle utilisée en mesure de terrain ([www.microgeo.com](http://www.microgeo.com) consulté le 22 Juin 2010)

La profondeur d'investigation, la résolution du système et la sensibilité varient en fonction des espacements entre les électrodes et la configuration. Le tableau suivant montre la profondeur d'investigation théorique en fonction de la longueur L du dispositif suivant les différentes configurations et d'après la littérature.

Tableau 4-2: Différentes configurations et profondeurs d'investigation (Chouteau, site académique geo.polymtl.ca)

Dispositifs		Prof. d'investigation	
		Roy (1971)	Barker (1989)
Wenner		0.11L	0.17L
Schlumberger		0.125L	0.19L
Dipôle-Dipôle		0.195L	0.25L
Pôle-Pôle		0.35L	

Chaque configuration possède une sensibilité différente qui permettra de mieux observer soit les variations latérales soit les variations en profondeur. En plus d'adapter le dispositif à la profondeur d'investigation, il faut aussi l'adapter à la structure observée. Dans le cas de notre étude on considérera principalement les configurations dipôle-dipôle (nommé plus loin dipôle dipôle aligné) et dipôle-dipôle équatorial qui sont les configurations des systèmes de mesures de terrain utilisés dans les travaux précédents et celles actuellement disponibles avec les systèmes existants.

Un sondage est l'action qui consiste en un même point central à faire varier l'espacement entre les dipôles. Ceci permet d'obtenir une variation de la résistivité en fonction de la profondeur auscultée. Le profilage consiste à réaliser une ligne des mesures avec les mêmes espacements mais en des points différents d'une ligne. Si on allie le profilage et le sondage, on réalise de l'imagerie électrique aussi appelée tomographie électrique (ERT : electrical resistivity tomography ou ERI : electrical resistivity Imaging). L'image correspondante à un profilage-sondage est appelée une pseudo section en résistivité apparente (fig. 4-10).

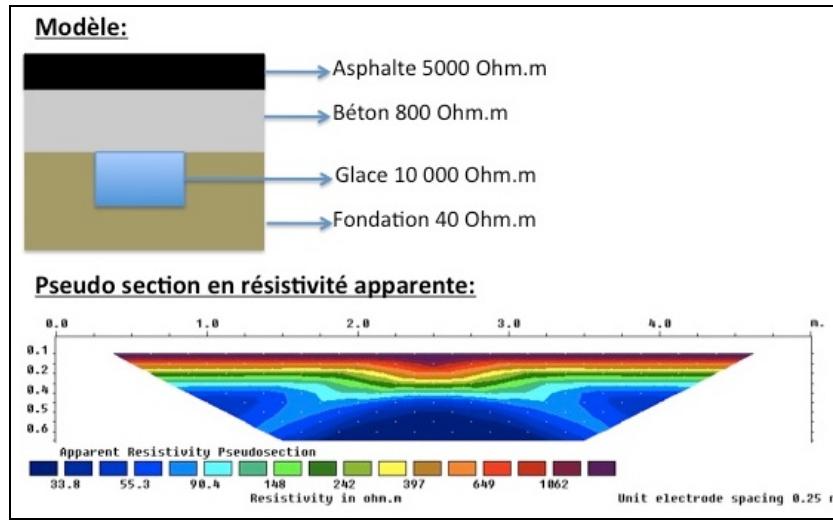


Figure 4-10: Modèle et pseudo section en résistivité apparente correspondante pour un dispositif dipôle-dipôle aligné avec un espacement d'électrode de 25cm.

### 4.3.3 Inconvénients en milieux urbains

Pour réaliser un profilage électrique, on plante une ligne d'électrodes dans le sol puis l'appareillage réalise un protocole qui détermine quels sont les dipôles d'injection et quels sont les dipôles de courant en fonction de la configuration désirée. En fonction des configurations et de la résistivité du sol, le temps de réalisation du protocole pour une ligne d'électrodes dépend du système utilisé. À titre d'exemple, avec l'équipement utilisé dans ce travail, le SAS4000 d'ABEM couplé au Lund Imaging ES464 et 41 électrodes, la durée d'enregistrement est d'environ 90 minutes pour 385 lectures. La méthode resistive électrique sous cette forme pose 2 problèmes majeurs en milieux urbains et dans le cadre de notre projet :

- problème pour fixer les électrodes qui nécessitent un bon contact galvanique avec le sol.
- méthode statique, nécessite de s'arrêter un temps considérable au même endroit.

Le premier implique une destruction partielle de l'asphalte voire du béton pour permettre un bon contact entre le sol et les électrodes, le second implique le blocage de la chaussée le temps des mesures ainsi que des levés très étalés sur l'échelle du temps.

Malgré ces inconvénients, grâce aux caractéristiques physiques des matériaux de la chaussée, la méthode électrique apparaît comme une méthode recommandée pour une auscultation non

destructive. Des systèmes ont été développés pour permettre l'utilisation de cette méthode en milieu urbain.

## 4.4 Utilisation de systèmes capacitifs électriques (CCR)

### 4.4.1 Principe

Dans certaines situations, bien que le milieu à ausculter présente les caractéristiques nécessaires pour l'utilisation de la méthode de résistivité électrique, la couche supérieure est trop résistive pour permettre l'injection de courant et/ou trop dure pour pouvoir planter les électrodes. Les systèmes dits « à électrodes capacitatives » permettent dans la plupart des cas de pallier à ces problèmes.

Le principe consiste à dire que si on se place à très basses fréquences alors les courants de conductions sont prépondérants sur les courant de déplacements. Les électrodes vont agir comme des capacités c'est à dire qu'en fonction de la fréquence du dispositif, elles vont, par cycles, se charger en courant et le décharger dans le sol. Pour une explication détaillée le lecteur est invité à se référer à la thèse de doctorat de Kuras (2002). On y trouve en autre des équivalences de schémas électriques entre les deux systèmes (fig. 4-11, 4-12, 4-13). Sous réserve de calibrer les systèmes de telle sorte que l'on reste dans l'approximation quasi-statique de l'électromagnétisme, l'imagerie et l'interprétation de l'électrique capacitif est similaire à l'imagerie et l'interprétation de l'électrique résistif (Benderitter, *et al.*, 1994; Tabbagh, *et al.*, 1993).

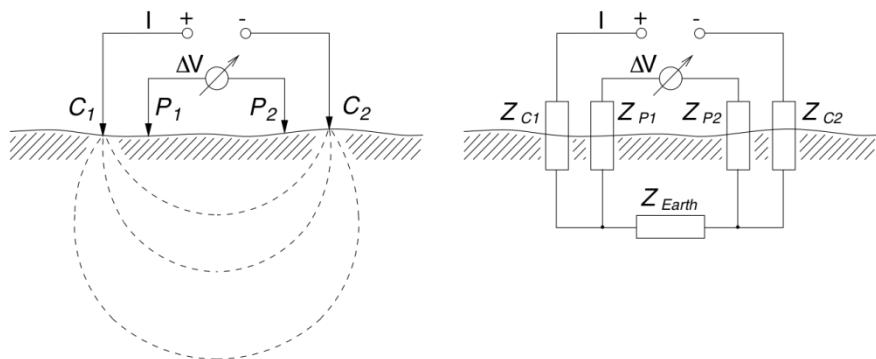


Figure 4-11: Schéma d'équivalence en impédance électrique d'un dipôle-dipôle classique (Kuras, 2002).

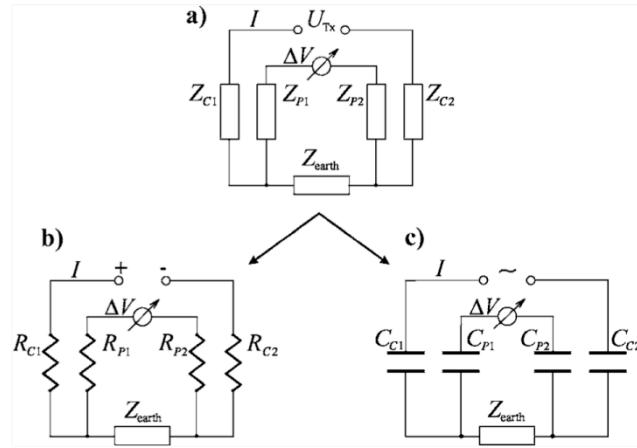


Figure 4-12: Possibilités d'interprétation d'un schéma électrique (a) en impédance réelles (b) en impédances imaginaires (c) (Kuras, 2006)

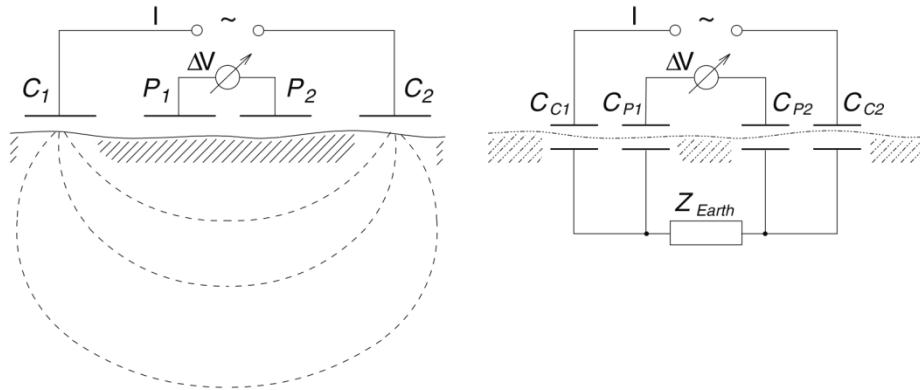


Figure 4-13: Schéma d'équivalence électrique pour un dipôle-dipôle capacitif. (Kuras, 2002).

#### 4.4.2 Les systèmes

Les systèmes CCR se divisent en deux familles différentes par le type et la configuration des électrodes :

- les « plate wire » ou à plaques
- les « line antennas » ou antennes coaxiales

#### 4.4.2.1 « plate wire »

Pour ce système, les électrodes consistent principalement en des plaques métalliques souvent positionnées sur un tapis isolant (néoprène). De la sorte le système peut être déplacé en restant au sol. De plus, la configuration des électrodes est souvent une configuration équatoriale. On retrouve parmi ces systèmes celui commercialisé par Iris Instrument (CORIM : Continuous Resistivity Imaging), celui du British Geological Survey (fig. 4-14 d'après Kuras et al, 2000) ainsi que ceux développés par le centre de recherche Sysiphe (Université Pierre et Marie Curie, Paris, France) le MPU (Multi Pole Urbain, fig. 4-15) et Shima (1996).



Figure 4-14: Système du BGS basé sur le CORIM en utilisation (Kuras, 2002).

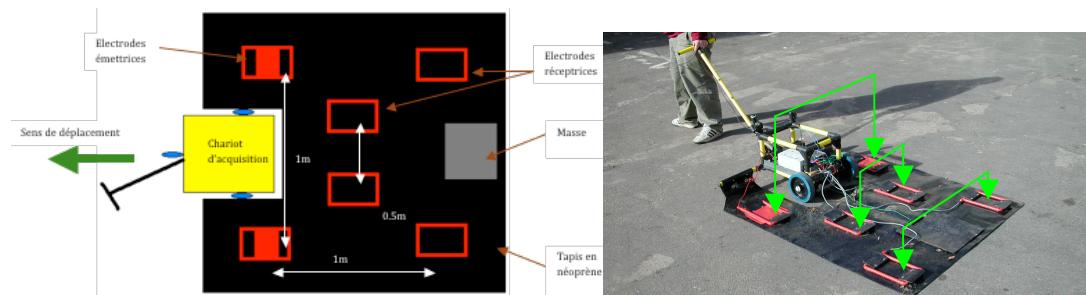


Figure 4-15: Schéma MPU (Olivier Antérrieu, rapport de stage, 2004).

Développé par l'université Paris VI, le MPU consiste en plusieurs plaques constituant les électrodes capacitatives de courant et de potentiel posées sur un tapis néoprène qui permet un contact à plat avec le sol. Le MPU est tiré par un opérateur.

#### 4.4.2.2 « line antenna »

On retrouve ce système dans la littérature dans les années 70 (Timofeev, 1973). Ces systèmes consistent en un câble dont certaines parties sont isolées les unes des autres pour être les électrodes (fig. 4-16). Le courant se distribue sur la longueur du dipôle d'injection. Ces systèmes ne permettent que la configuration dipôle-dipôle alignée. Parmi eux, il y a l'OhmMapper commercialisé par Geometrics, utilisé dans de nombreux travaux (De Pascale, *et al.*, 2008; Wainstein, *et al.*, 2008) et le système norvégien PACEP (Sorensen, 1996). Ces systèmes sont de plus en plus utilisés car souvent plus stables et plus résistants que les systèmes « plate wire ».

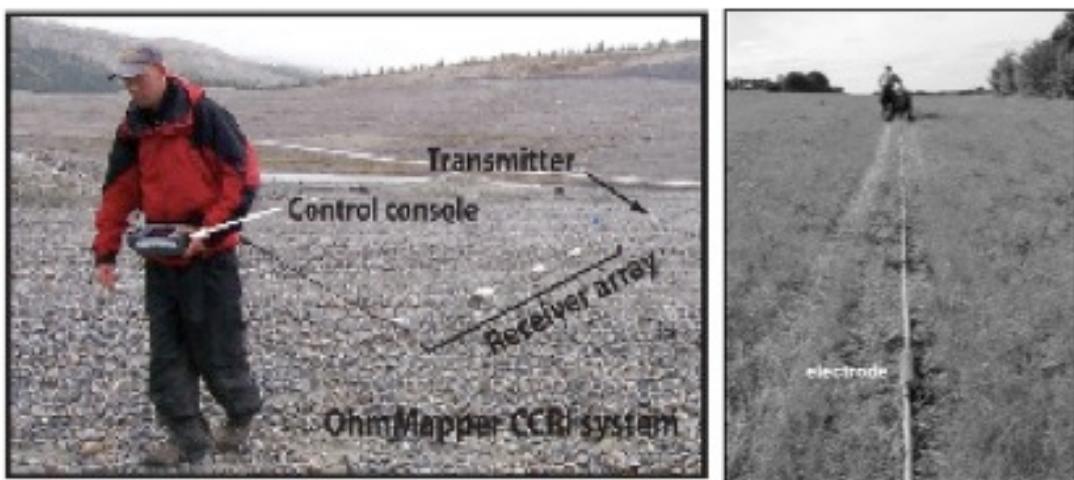


Figure 4-16: Deux systèmes line-antenna

(Pellerin, 2002 -à droite- ; Wainstein et al, 2008 -à gauche-)

## CHAPITRE 5 MODÉLISATION

La modélisation sert à (1) étudier et analyser les possibilités d'interprétation des mesures réelles par le calcul de la réponse géophysique de modèles simplifiés dans des conditions aussi proches de la réalité que possible, et (2) définir les paramètres d'influence des mesures. A partir de la connaissance des défauts que l'on souhaite mettre en évidence au sein de la chaussée (voir chapitre 2), on fixe les caractéristiques des matériaux et les géométries. Puis on réalise la modélisation avec chacune des méthodes.

Dans un premier temps, on réalise les modélisations avec des modèles de géométries identiques pour l'électrique et le radar pour des défauts isolés sur la chaussée. Dans un second temps, on détermine la grandeur de défauts minimale qui engendre une anomalie mesurable dans la réponse de chaque méthode, et les limitations de ces dernières. En troisième et dernier point, on dresse le bilan de l'influence de différents paramètres étudiés en tenant compte des différentes limitations de notre étude.

### 5.1 Electrique

On a vu précédemment que bien que le système utilisé sur le terrain soit un système électromagnétique à basse fréquence, son interprétation peut se faire de façon identique à celle de la méthode électrique en courant continu (Tabbagh, 1993; Kuras, 2002). On utilise donc pour la modélisation et pour le traitement des données les mêmes logiciels que ceux utilisés pour la méthode de résistivité classique.

#### 5.1.1 Principe

La modélisation électrique se fait en 2 étapes majeures. La première consiste à la création du modèle et l'obtention de la pseudo-section de résistivité apparente correspondante au modèle créé. La seconde étape est l'inversion des données obtenues. L'inversion de données consiste à calculer un modèle à partir de données (réelles ou modélisées) dont la réponse est la plus proche possible de celle obtenue par modélisation ou par mesures sur le terrain.

Réaliser l'inversion de données avec des données obtenues par modélisation permet de vérifier si on peut effectivement retrouver notre modèle ou un modèle similaire à partir des résistivités apparentes modélisées. Deux éléments sont principalement observés :

- **la correspondance des contrastes de résistivité** entre les valeurs obtenues après inversion et les valeurs du modèle d'origine (i.e. si le modèle obtenu au final possède des contrastes de résistivité aux mêmes emplacements que dans le modèle d'origine et de même valeur).
- **La stabilité du modèle** : si lorsqu'on ajoute du « bruit » à la pseudo section modélisée on peut tout de même retrouver un modèle similaire après inversion.

### 5.1.2 Res2DMod

Le logiciel Res2DMod (Loke, 2002) est utilisé pour calculer la réponse d'un modèle en deux dimensions; le résultat est représenté par une pseudo section de résistivité apparente. On définit un modèle par blocs avec une certaine configuration d'électrodes. A chaque bloc est associée une valeur de résistivité. Le logiciel calcule la réponse en résistivité apparente mesurée par la configuration d'électrodes demandée en réalisant une intégration par volumes finis et permet l'affichage de la pseudo section (fig. 5-1).

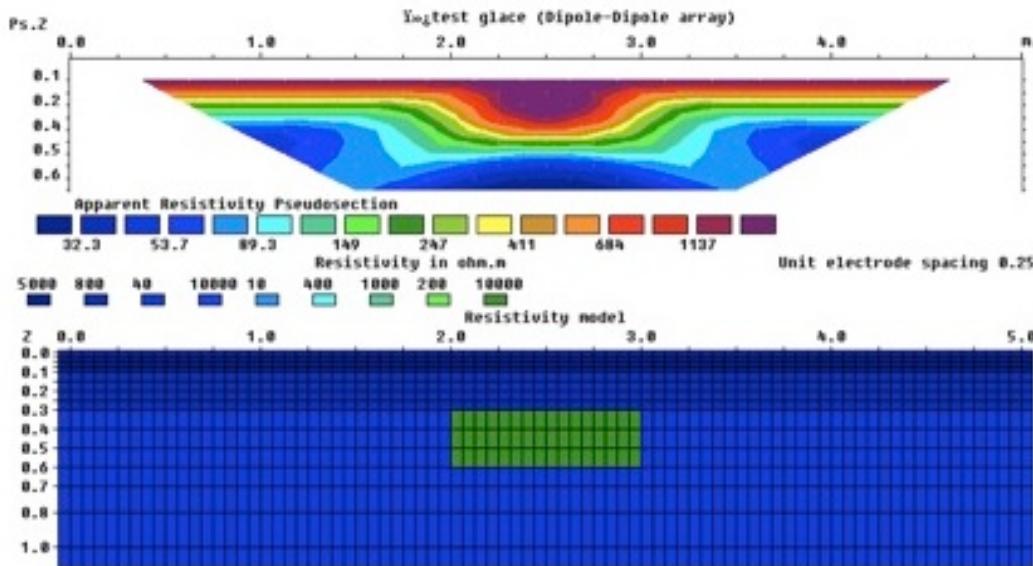


Figure 5-1: Pseudo-section de résistivité apparente (en haut) et modèle correspondant par blocs (en bas) sous Res2DMod.

### 5.1.3 Res2DInv

Le logiciel Res2DInv (Loke, 2007) réalise l'inversion des données. Il génère un modèle bidimensionnel dont la réponse en résistivité apparente est comparée aux observations. Il procède ainsi par itérations jusqu'à qu'un ajustement « satisfaisant » soit atteint (fig. 5-2). Cette erreur est calculée par la méthode des moindres carrés définie comme paramètre de l'inversion.

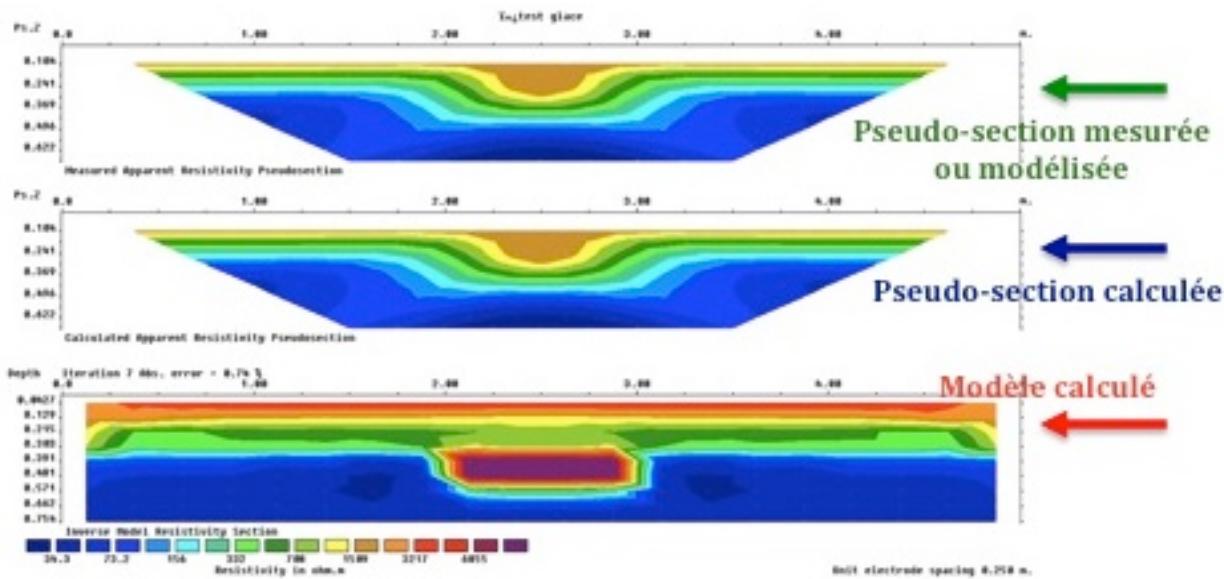


Figure 5-2: Pseudo-sections et modèle calculé par Res2DInv.

### 5.1.4 Réalisation

Dans le but de se rapprocher le plus possible d'une modélisation liée aux paramètres des systèmes réels, on choisit un écartement d'électrodes de 25 centimètres. A partir de là, la profondeur de la chaussée que l'on souhaite ausculter régit la longueur totale du dispositif et le nombre d'électrodes nécessaires. Dans notre cas, on choisit une longueur totale de dispositif de 5m, ce qui permet d'ausculter au moins 0,7 m à 1 m de profondeur en configuration dipôle-dipôle alignée.

La taille minimale d'un défaut étant la taille d'un bloc, les plus petits blocs faisant  $\frac{1}{4}$  de l'écartement, on pourra donc simuler des fissures d'ouverture minimale de 60 mm environ.

On réalise chaque modélisation en fonction de deux configurations d'électrodes : dipôle-dipôle alignée et dipôle-dipôle équatoriale. On souhaite ainsi observer l'influence de la configuration.

## 5.2 Radar

La modélisation radar se fait aussi en 2 étapes. On calcule la réponse radar à un modèle donné puis on l'image et on traite l'image.

### 5.2.1 GprMax2D

Le calculateur de réponses radar GprMax2D (Giannopoulos, 2005) est basé sur la théorie des différences finies. Le modèle prend en compte les valeurs des constantes diélectriques, de conductivité et de susceptibilité magnétique (s'il y a lieu). La géométrie complète doit être définie ainsi que la fréquence de l'impulsion, sa durée et sa forme (pic de Dirac, sinusoïde...). L'espace occupé par les matériaux peut être une composition de formes géométriques simples (rectangle, triangle, disque...). La précision de la maille de calcul est contrôlée par l'utilisateur, ainsi que la position de l'émetteur et du récepteur à chaque itération. La modélisation est soumise aux limitations imposées par la maille. Une maille trop fine produit des instabilités numériques et une maille trop grande limite la précision des modélisations.

### 5.2.2 ReflexW

ReflexW (Sandmeier, 2009) permet le traitement des données radar. Une fois les données calculées converties en format ASCII on peut ensuite les afficher, éventuellement les traiter en appliquant différents filtres, ajouter du contraste et du gain pour mieux observer les anomalies (fig. 5-3).

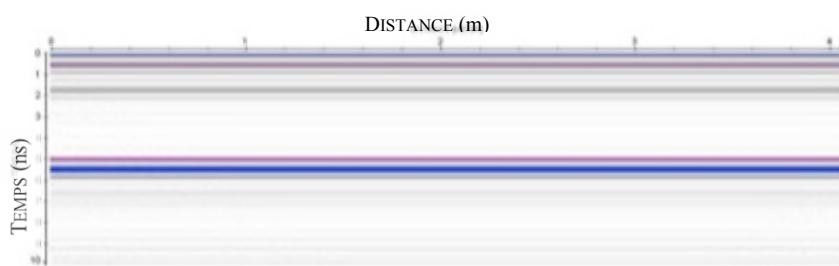


Figure 5-3: Image de la réponse radar 1GHz d'une chaussée sans défauts calculée par GprMax2D et imagée avec ReflexW.

## 5.3 Géométries et matériaux

Dans le cadre de la modélisation, nous allons fixer les valeurs des différentes caractéristiques physiques des matériaux et simplifier les géométries.

### 5.3.1 Géométrie des défauts

Le schéma suivant récapitule les défauts modélisés et leurs dimensions de base. On fait ensuite varier les dimensions pour analyser les variations des réponses, éventuellement obtenir une évaluation de la taille minimale des défauts et anomalies observables et l'influence des réglages matériels (fréquence, configuration). Les dimensions sont contraintes par les limites de la modélisation électrique dont la taille minimale de la grille est le quart de l'espacement entre les électrodes. La figure 5-4 définit la base du modèle avec les dimensions fixées des épaisseurs de la chaussée. La figure 5-5 montre les géométries considérées en fonction des phénomènes que l'on souhaite imager.

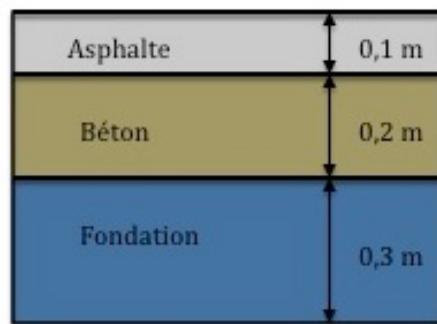


Figure 5-4: Modèle géométrique de la chaussée sans défaut.

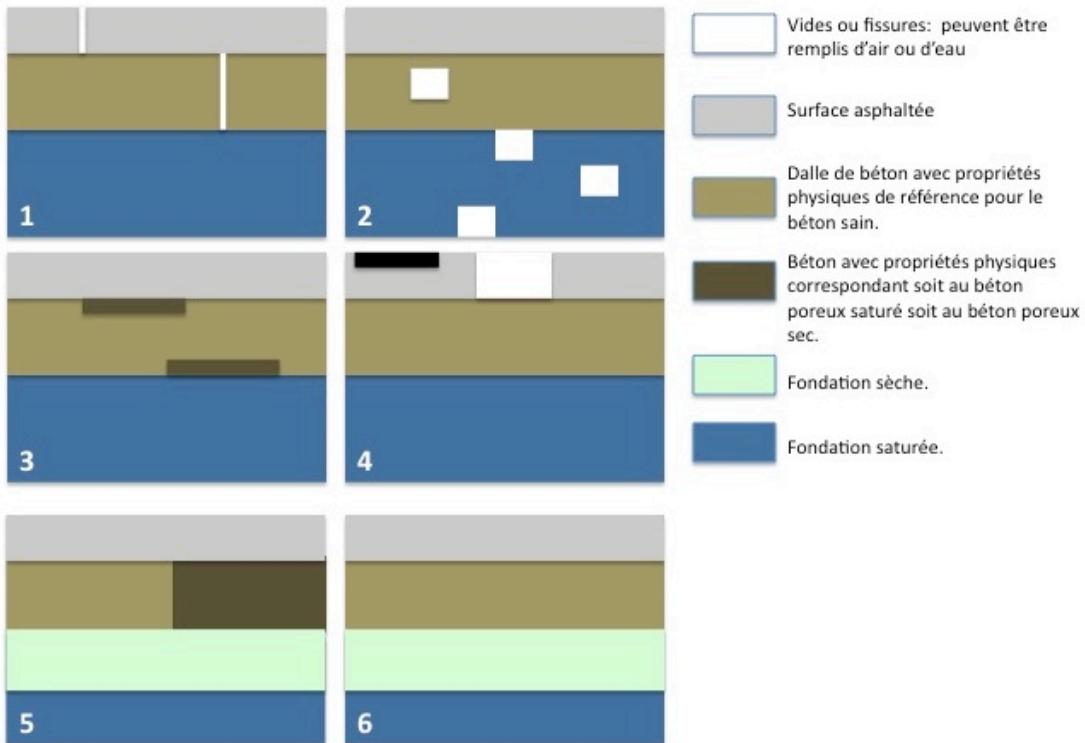


Figure 5-5: Géométrie des modèles (*dimensions variables détaillées dans l'annexe 1*).

- **fissures** (asphalte ou béton) : elles peuvent être sèches ou saturées. On les caractérise respectivement par un milieu très résistant (air) ou conducteur (eau) (fig. 5-5.1).
- **cavités** (béton et fondation) : de même que les fissures, elles peuvent être sèches ou saturées. On propose donc des valeurs de propriétés physiques correspondantes (béton résistant ou béton conducteur par exemple) en fonction des matériaux où elles se situent (fig. 5-5.2). Comme les propriétés diélectriques de la glace sont similaires à celles de l'air, les modélisation pour l'étude des lentilles de gel ou de zones gelées est faite en même temps que pour les cavités dans la fondation remplies d'air.
- **délamination** : Elle se caractérise principalement par une augmentation de la porosité sur les surfaces extérieures. En fonction de l'état de saturation, ce sera de même soit un milieu plus conducteur soit un milieu plus résistant que le béton sain (fig. 5-5.3).
- « **défauts de surface** » : lors de l'auscultation, la surface ne sera pas parfaite, on souhaite connaître l'aspect des images obtenues lorsqu'on passe sur un nid-de-poule et sur une plaque métallique (fig. 5-5.4).

- **changement de dalle de béton** : Alors que la couche d'asphalte peut ne pas montrer de changement en surface, il se peut qu'il y ait un changement de la qualité du béton. A part la géométrie (fig. 5-5.5), les propriétés utilisées sont les mêmes que pour la modélisation de la délamination.
- **variation de la saturation** : le modèle correspondant est constitué d'une partie de la fondation sèche (plus résistante) et une partie de la fondation humide (plus conducteur). On ne se limite pas à la géométrie présentée à la figure 5-5.6, et on fait varier la forme de l'interface fondation sèche/fondation humide.

### 5.3.2 Propriétés physiques des matériaux

On a choisi en fonction des données publiées dans la littérature les valeurs des propriétés physiques pour chaque cas considéré telles que posées dans le tableau 5-1.

Tableau 5-1: Valeurs des propriétés physiques utilisées lors des modélisations.

matériaux	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\sigma$ ( $mS \cdot m$ )	$\epsilon_r$
asphalte	5000	0.2	3
béton sain	800	1.25	8
béton poreux saturé	400	2.5	12
béton poreux sec	1000	1	5
fondation non saturée	200	5	5
fondation saturée	40	25	20
air	10 000	0.1	1
eau	10	100	80
glace	10 000	0.01	3

Comme les matériaux des chaussées peuvent avoir des valeurs très variables, on utilise des valeurs de propriétés physiques réalistes et qui permettent d'observer des réponses. Par exemple, si deux milieux adjacents possèdent des propriétés physiques proches, il est peu probable que l'interface soit détectée. Les valeurs choisies sont par conséquent des valeurs arbitraires, mais qui se retrouvent dans la plage des valeurs admises pour ces matériaux et qui sont, tenant compte des évolutions logiques des paramètres physiques, réalistes.

## 5.4 Résultats

L'Annexe 1 intitulée *Modélisations* détaille les résultats obtenus et fournit l'intégralité des paramètres utilisés pour les modélisations. On présente ici les observations générales et les limitations observées.

### 5.4.1 Observations

#### 5.4.1.1 Électrique

Dans le cas de la modélisation électrique on peut discuter de quatre paramètres : le contraste de résistivité détecté, la taille des défauts détectés et la configuration utilisée.

**Le contraste de résistivité détecté :** Dans le cas des modélisations réalisées, on a des contrastes de résistivité (le rapport de résistivités de milieux adjacents, plus grande sur plus petite) qui peuvent monter jusqu'à 250. Moins le contraste est grand, moins l'inversion est susceptible de donner un résultat fiable. Un corps plus résistant que le milieu encaissant s'avère difficile à détecter. Inversement un corps plus conducteur que le milieu encaissant donne souvent des réponses visibles. Les différentes couches de la chaussée ont généralement un contraste suffisant pour être détectées. La présence d'eau implique un contraste suffisamment grand entre les matériaux pour être habituellement détectée correctement.

**La taille des hétérogénéités :** La taille des hétérogénéités modélisées est limitée dans le cas de l'électrique à la taille minimale des blocs présents dans le modèle. La taille minimale d'un objet détectable est en partie dictée par l'espacement entre les électrodes. On a très peu observé l'influence de l'espacement des électrodes dans cette étude toutefois on retiendra surtout que d'une façon générale, plus l'objet est en profondeur plus il doit être grand pour pouvoir être détecté correctement et que moins le contraste de résistivité est grand moins les objets de faible taille sont observés après l'inversion.

**La configuration des électrodes employée :** Dans notre étude nous avons considéré les configurations dipôle-dipôle alignés et dipôle-dipôle équatorial. Certains défauts qui présentent uniquement une variation latérale ne sont pas vus après inversion par l'équatorial.

### 5.4.1.2 Radar

Contrairement à l'électrique, pour chacune des modélisations l'image radar après son traitement montre une anomalie que ce soit une hyperbole de diffraction ou juste une interface réflétrice. On abordera cependant l'influence de la fréquence, de la taille des hétérogénéités, de la présence d'eau, du contraste de permittivité et la problématique de l'interprétation après le traitement de l'image.

- Fréquence : la variation de la fréquence fait varier les amplitudes aux interfaces due aux différences de longueur d'onde. Les temps d'arrivée sont les mêmes pour chaque fréquence (vitesse non-dispersive). Les vitesses paraissent identiques et les vitesses calculées pour les hyperboles de diffraction sont aussi identiques à chaque fréquence.
- La modélisation GPR montre une détection des hétérogénéités de très faibles grossesures possibles à tout endroit de la chaussée.
- Plus le contraste de permittivité est élevé plus l'amplitude de l'onde réfléchie est grande. On remarque que même pour une faible différence de permittivité entre 2 milieux on observe des différences d'amplitude.
- Le traitement de l'image modifie les amplitudes et les contrastes visuels (d'affichage) suivant les gains ajoutés. Dans le cadre de la modélisation, on réalise un traitement non uniforme pour observer les artefacts modélisés d'emplacement connus.

Bien que le géoradar montre des anomalies pour des objets de faible grandeur à toutes profondeurs d'une chaussée, on peut uniquement déterminer la position latérale de l'objet par le sommet de l'hyperbole de diffraction mais on ne peut rien affirmer sur la profondeur exacte sans connaître la vitesse dans les différents milieux ou sans avoir une bonne calibration.

### 5.4.2 Limitations de la modélisation

#### 5.4.2.1 Techniques

Bien que l'on sache les méthodes radar et électrique potentiellement adaptées pour l'auscultation des chaussées, les observations précédentes montrent que l'électrique manque beaucoup de résolution spatiale. Par ailleurs, bien que le radar soit très précis, une évaluation des vitesses par CMP ou WARR est nécessaire à une bonne interprétation. Les modélisations réalisées montrent

des signatures de défauts structuraux pour les deux méthodes. Toutefois ce dernier commentaire est biaisé. En effet, les paramètres de modélisation sont fixés tels que des réponses soient observables considérant la géométrie choisie. Ceci n'est pas le cas sur le terrain où l'on fixe les paramètres des systèmes de mesures sans nécessairement connaître ceux des structures à observer. De même, le traitement radar est réalisé pour mettre en évidence les variations. Comme on sait d'avance ce que l'on souhaite voir, notre méthode de traitement est adaptée en conséquence.

On observe aussi une imagerie assez intuitive (variations de couleurs, démarcation des amplitudes par augmentation du contraste) pour les deux méthodes. Toutefois, il faut prendre du recul par rapport à l'image (dégradé de couleur parfois trompeur, échelle...). Par ailleurs toutes les observations faites sont d'ordre qualitatives.

Les limitations des modélisations sont aussi induites par les logiciels utilisés, entre autre, les contraintes géométriques. L'utilisation de Res2DMod implique une contrainte sur la maille de calcul liée à l'espacement entre les électrodes. L'utilisation de GprMax2D implique une maille fixe sur tout l'espace considéré et de plus si la maille de calcul est trop fine, on observe des interférences du type « pic de Dirac ». Pour pousser la modélisation au maximum, il serait intéressant de comparer les résultats obtenus avec ceux obtenus avec d'autres logiciels. On pourrait penser utiliser le module de modélisation de ReflexW qui possède une interface graphique contrairement à GprMax2D. Ce dernier présente plus de liberté d'usage mais par ailleurs, est moins accessible pour l'utilisateur non expérimenté. Côté électrique, une comparaison avec un logiciel de type COMSOL (COMSOL, 2009) qui permet une meilleure définition de la maille peut être envisagée.

Le choix des logiciels n'implique pas uniquement des contraintes au niveau de la précision de calcul. Le choix d'une modélisation 2D a été fait, en partie dû à la disponibilité matérielle. Les sujets d'observation possèdent dans la réalité une dimension limitée dans la direction orthogonale au profil d'auscultation. Pour une étude des influences latérales, il faudrait choisir une géométrie 3D.

#### 5.4.2.2 Raisonnement

La précision recherchée dans la modélisation est presque en contradiction avec la réalité des mesures. Lors de cette première approche, l'accent a été mis surtout sur la résolution minimale

possible sans rendre compte des faits réels. Alors que la géométrie réelle tient plus du 3D que du 2D et est beaucoup plus complexe, la modélisation peut permettre les premières caractérisations et l'observation de l'influence de certains paramètres. Cependant dans notre cas, au niveau de connaissance atteint à travers les différents travaux, on recherche une amélioration d'un point de vue technique. Comme exposé précédemment, on est donc limité dans la modélisation par les logiciels disponibles, à des défauts qui sont simples. De plus, on souhaite développer des méthodes pour l'auscultation des chaussées urbaines dans le but de planifier les travaux. Par conséquent, bien que l'on connaisse la géotechnique routière et les phénomènes qui la régissent, il faut aussi définir les caractéristiques critiques de ces phénomènes à partir desquelles on les détecte avec certitude. Une grande précision des systèmes n'est pas forcément nécessaire tant que l'on détermine les dimensions critiques des défauts qui doivent être détectés avec certitude.

Pour avancer nos travaux suite à cette première approche via la modélisation, on peut proposer deux choix:

- **l'augmentation de la performance des équipements** : ceci suit le principe « qui peut le plus, peut le moins ». Cela implique une avancée technologique et aussi une répétabilité des mesures que l'on ne peut pas nécessairement garantir.
- **l'augmentation des moyens de caractérisation** : ceci implique une complémentarité nécessaire entre la modélisation et l'étude terrain à la fois en milieux contrôlés et en milieux réels.

Dans la suite de ce projet, on se tourne vers le second choix.

## CHAPITRE 6 TERRAIN

### 6.1 But

Ce travail de terrain, permet d'effectuer des mesures radar et électrique en conditions réelles et de pouvoir ensuite prélever des échantillons pour l'analyse en laboratoire. Ces analyses visent à obtenir les propriétés physiques des matériaux, afin de valider les réponses mesurées à l'aide des modélisations des structures dont les propriétés physiques seront déterminées.

Les principales contraintes à surmonter pour cette étude sont liées au fait que l'étude est réalisée en même temps que les travaux sur la chaussée, les travaux ayant priorité sur la recherche. Cela induit des problèmes de précision dans la localisation, de déplacements lors de passages de véhicules, etc...

### 6.2 Situation

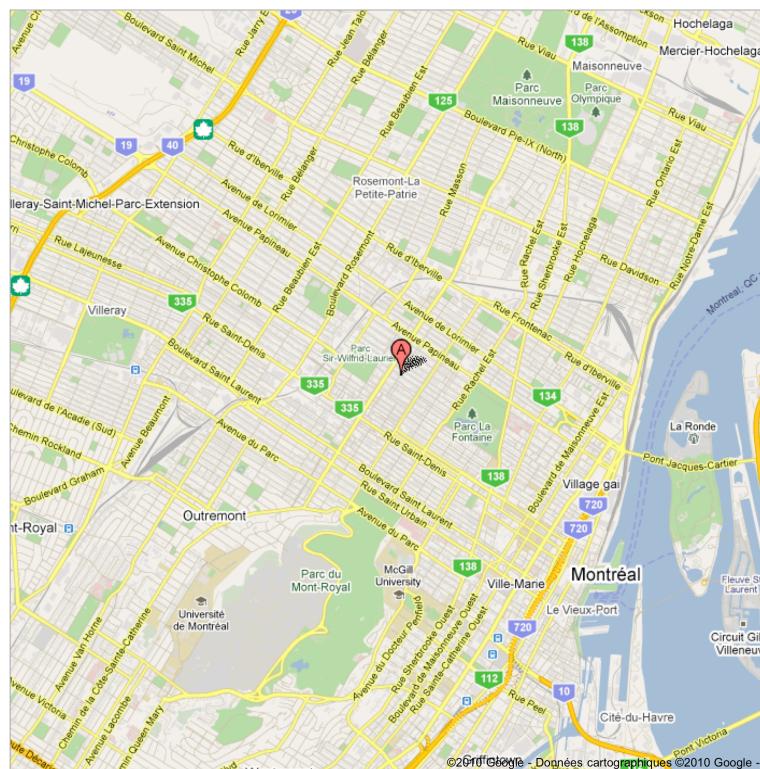


Figure 6-1: Emplacement du site de mesures sur l'île de Montréal (Google Maps)

Les mesures sont réalisées sur une portion de la rue de Brébeuf entre l'avenue Mont-Royal et la rue Gilford, dans un quartier du centre de Montréal (Québec, Canada) (fig. 6-1).

La chronologie du chantier et la chronologie des travaux de terrain est présentée dans l'annexe 2 : Chronologie). Au moment des mesures, la rue est en travaux et la circulation est réduite au trafic local. Une observation visuelle confirme l'état de dégradation avancé sur toute la longueur de la chaussée. On choisit un tronçon de 40m allant du numéro 4549 au 4591 (côté impair) et du numéro 4550 au 4590 (côté pair). Le profilage radar est visiblement orthogonal à plusieurs anciennes tranchées de réparation ce qui assure des observations de variations dans nos données à des endroits connus. Les levés sont réalisés sur 2 lignes, L1 côté impair et L2 côté pair, espacée de 3m50 pour éviter d'être sur le passage des véhicules de chantier (fig. 6-2).



Figure 6-2: a) Photo de la portion de rue étudiée; b) avec le tracé des lignes de levé GPR.

### 6.3 Informations externes

Par informations externes, on considère tout élément pouvant donner des informations sur l'état de la chaussée et sa composition et étant indépendant des mesures géophysiques. Dans beaucoup de cas, on utilisera les numéros civiques comme point de repère le long du profil. Sur le chantier ce sont les points de référence des ouvriers, du contremaître et du surveillant. Beaucoup d'informations sont obtenues en fonction de ce référentiel. Un schéma de correspondance « approximative » avec l'abscisse en mètres est disponible ci-après (fig. 6-3).

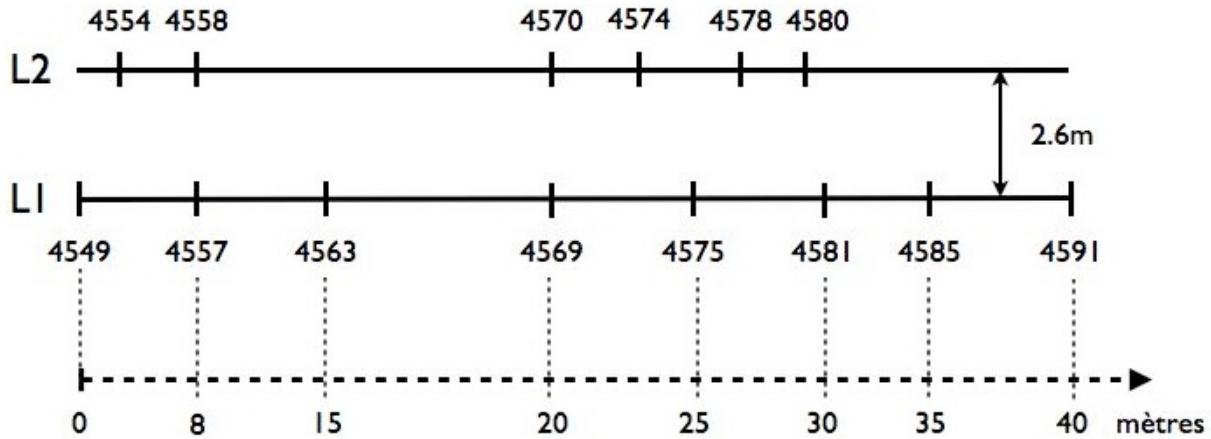


Figure 6-3: Correspondance entre les numéros civiques et les lignes de levés GPR.

### 6.3.1 Données visuelles

Les données visuelles sont récupérées directement à l'arrivée sur le site. Une observation détaillée de l'état de surface de la chaussée est faite sachant que cette dernière va être complètement détruite dans les jours suivants. Concernant l'observation de l'état de surface, un croquis a été réalisé sur le terrain. Il est présenté ici appuyé par les photographies correspondantes (fig. 6-4). L'absence de dalle de béton proche de la ligne L1 est connue car dans le cadre des travaux une tranchée a été creusée sur toute la longueur de la rue pour placer une nouvelle conduite d'aqueduc. La dalle de béton n'a pas été remise en place car par la suite, l'intégralité de la dalle est enlevée de la chaussée dans le cadre de sa reconstruction en chaussée souple.

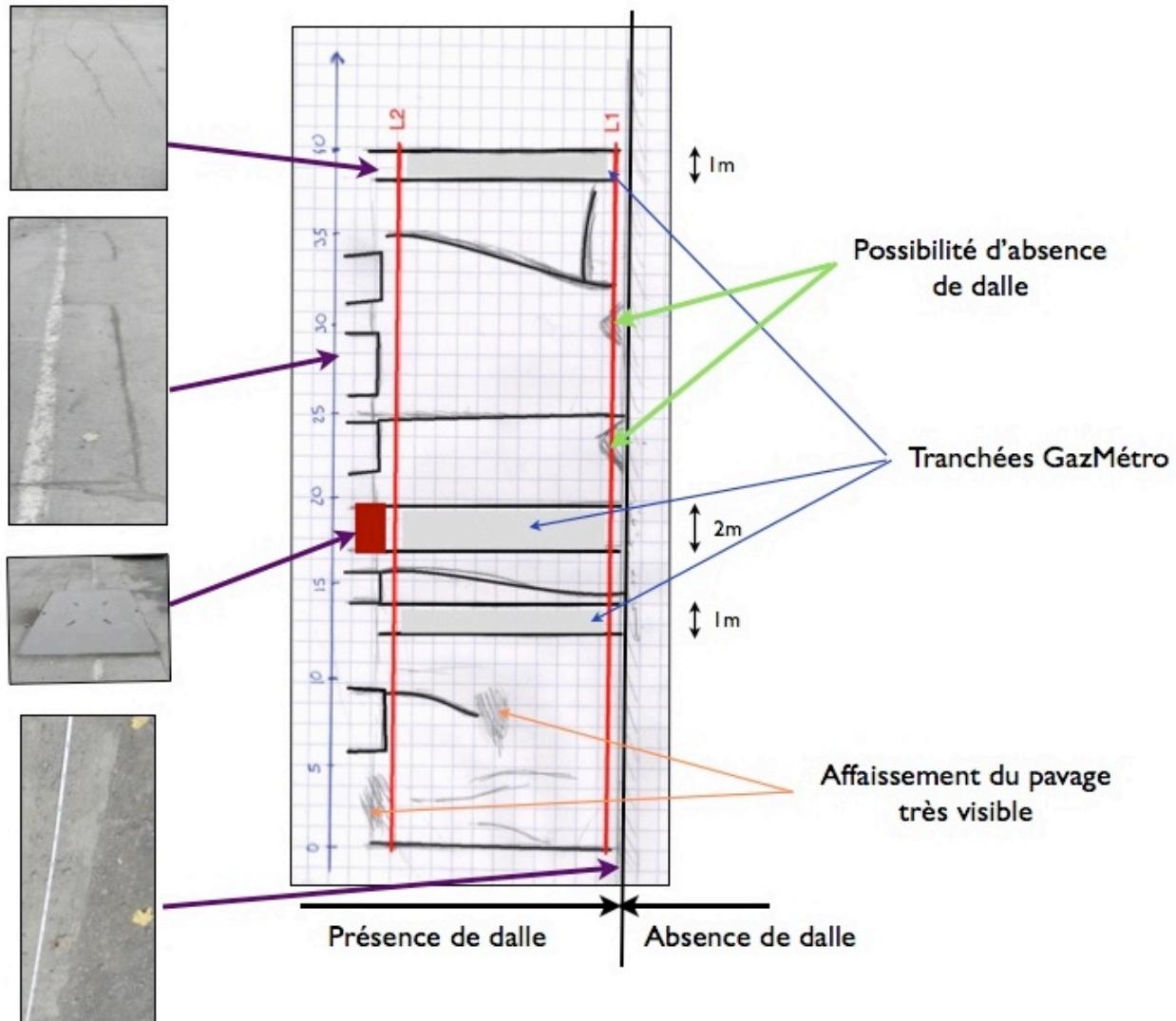
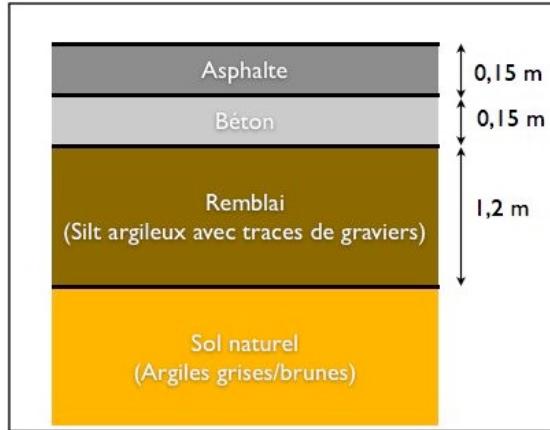


Figure 6-4: Schéma d'observation visuelle et photos correspondantes.

### 6.3.2 Données géotechniques

Les paramètres géotechniques de cette chaussée sont extraits de documents du laboratoire de la Ville de Montréal (Annexe 3 : Données techniques). Des forages ont été réalisés en avril 2009, en tant qu'études préliminaires aux travaux. Bien qu'ils ne soient pas nécessairement situés dans la zone étudiée, les forages supposent une structure de la chaussée telle qu'exposée dans la figure 6-5. Compte tenu du grand nombre de travaux ponctuels apparents en surface et de la grande distance entre les forages, il y a une forte probabilité pour que la structure présente de nombreuses variations autant au niveau des épaisseurs qu'au niveau de la qualité des matériaux.



### 6.3.3 Réseaux enfouis

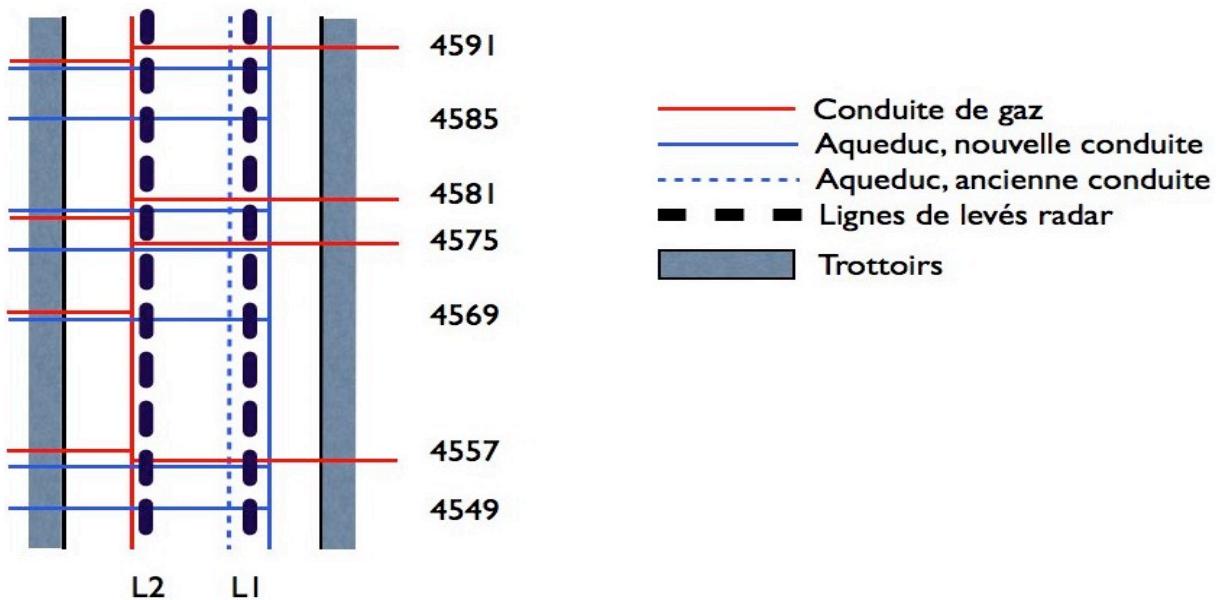


Figure 6-6: Schéma récapitulatif du réseau enfoui.

Grâce aux informations sur les excavations gracieusement fournies par le contremaître (Annexe 3: Données techniques) et des observations réalisées lors du chantier, on a pu reconstituer une partie du réseau des conduites d'aqueduc et de gaz présentes dans la chaussée (fig. 6-6). Les conduites d'eau sont situées environ à 1,6 m de profondeur et sont en fonte. La conduite générale

de gaz (longitudinale) est environ à 1,5 m de profondeur mais les liaisons avec les particuliers sont à des hauteurs variables et peuvent remonter à moins d'un mètre dans certains cas.

## 6.4 Levé Radar

Le géoradar utilisé est le Pulse Ekko 1000 de Sensor&Software. On a choisi 2 lignes de 40 m espacées de 3m50 , que l'on parcourt avec des antennes 900 MHz et 450 MHz en mode réflexion. Il y a eu une tentative de WARR mais les résultats obtenus, comme exposés plus tard, sont médiocres. Le pas choisi est de 0,1 m pour le profil à 900 MHz et de 0,05 m pour le profil à 450 MHz. Le tableau 6-1 ci-dessous résume quelques paramètres de calibration.

Tableau 6-1: Résumé des paramètres de mesures terrain.

Antenne	pas (m)	écartement émetteur/récepteur (m)	stacking	temps d'acquisition	$t_0$
900 MHz	0,05	0,17	64	100 ns	>20 ns
450 MHz	0,1	0,25	32	100 ns	>20 ns

À défaut d'avoir eu accès à un odomètre, les mesures ont été réalisées au pas à pas. Bien que le thème de recherche globale consiste à évaluer l'auscultation en continu, faire du pas à pas permet d'avoir des mesures plus précises et probablement mieux exploitables pour déterminer les paramètres prépondérants par la suite. D'autre part, la capacité du GPR à réaliser des mesures en continu à grande vitesse est déjà prouvée. Les conditions de mesures sont soumises à deux contraintes majeures :

- On ne peut laisser des câbles traverser la chaussée car il y a un passage régulier de véhicules de chantier.
- Les antennes ont besoin d'être allumées un certain temps avant de commencer les mesures lorsqu'elles ont été coupées de leur alimentation pour stabiliser le déclenchement.

Par conséquent, le protocole choisi est le suivant :

- On réalise un premier profilage avec l'antenne 450 MHz sur la ligne L1.

- On réalise un second levé avec la 900 MHz sur L2.
- On laisse l'antenne 900 MHz alimentée le temps de changer le véhicule de côté.
- On réalise le levé à 900 MHz sur L2 puis on enchaîne sur 450 MHz.

On effectue des mesures WARR en 4 points de L2 en 450 MHz.

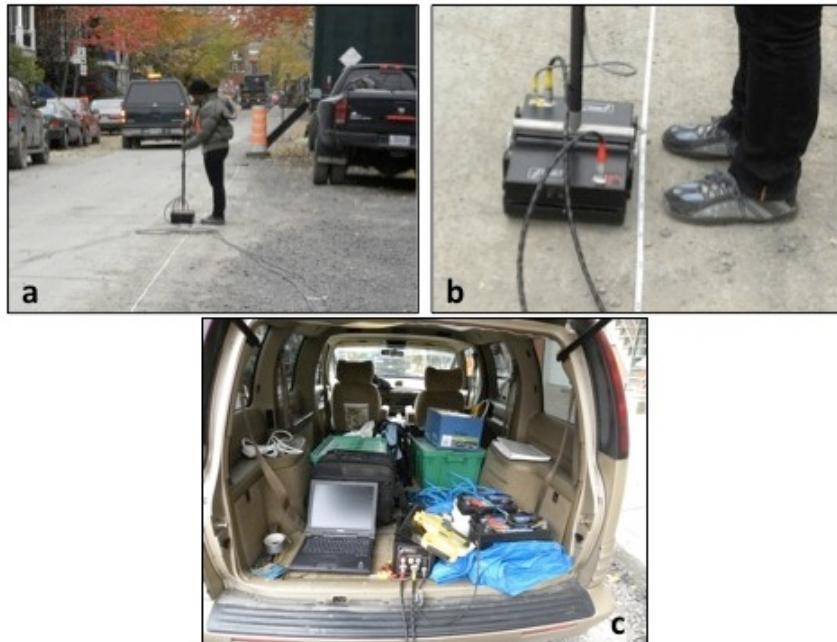


Figure 6-7: Dispositif et matériel en utilisation. a) vue d'ensemble, b) antenne et ruban-mètre, c) installation de contrôle.

## 6.5 Traitement des données

Les images obtenues sont traitées avec le logiciel ReflexW (voir chapitre 5 : Modélisation) pour une meilleure observation des variations. On note chaque étape du traitement. À chaque traitement sur les données on perd une certaine information et on peut biaiser l'interprétation. Si une étape n'est pas réalisée uniformément sur tout le profil, la possibilité d'une fausse interprétation est augmentée. De même, certaines opérations peuvent empêcher l'interprétation des données radar en termes de coefficient de réflexion et en amplitude (la fonction gain par exemple).

L'interprétation des données repose principalement sur l'observation de contrastes et de variations. On essaie dans le traitement de conserver au mieux ces contrastes et si possible uniquement de les mettre en évidence. Il faut pour cela souvent distinguer le bruit ambiant

(parasites) causés par l'environnement des anomalies causées par des défauts ou des variations dans le sol.

Dans notre cas, le traitement suit globalement la chronologie suivante :

- **Suppression de la composante continue du signal (de-vow).** La proximité du récepteur et de l'émetteur entraîne un transfert d'énergie de l'un à l'autre presque assimilable à une composante continue (varie très lentement dans le temps). On peut l'observer sur toutes les traces mesurées. On supprime donc cette composante, par filtrage en fréquence passe-haut.
- **First break picking et static correction.** On repère les temps de première arrivée pour chacune des traces et on ramène ces temps à zéro. Cette opération supprime le temps de décalage induit dans les réglages ainsi que certains effets de dérive électronique.
- **Cadrage.** Le temps d'acquisition dans notre cas est de 100ns mais les images ne montrent pas de signal exploitable pour des temps supérieurs à 30ns. Le seul signal possiblement visible après traitement serait du bruit inexploitable. On supprime donc la partie des traces supérieure à 30 ns.
- **Filtrage en fréquence.** Cette opération permet de supprimer une première fois les bruits et parasites. On applique un filtre passe bande qui nous permet de sélectionner une plage de fréquences équivalente à la bande passante du radar. Le filtre passe-bande utilisé est un filtre de type Butterworth, ce qui signifie que le gain ajouté en même temps (s'il y en a) est constant sur la plage de fréquence désignée.
- **Ajout de gain.** On ajoute du gain au signal pour observer s'il y a des réflexions trop atténuées par l'absorption du milieu. On définit une fonction de gain en fonction de la profondeur. On l'applique généralement à partir de quelques nanosecondes pour ne pas amplifier les premières arrivées d'onde qui sont généralement d'amplitude suffisante. On applique la même fonction gain sur l'intégralité des traces pour préserver les variations relatives le long du profil.
- **filtrage en fréquence.** Généralement, on refait un filtrage en fréquence (du même type que le précédent) suite à l'ajout de gain car le bruit qui n'était pas visible avant est aussi amplifié.

- **Lissage longitudinal.** Le lissage est un traitement principalement esthétique. On réalise une commande appelée « running average ». On prend une valeur moyenne sur 3 traces. Ce filtre est appliqué sur tout le profil et pour tout l'intervalle de temps.

## 6.6 Interprétation des mesures

Les différentes étapes du traitement peuvent influencer notre interprétation :

- Le contraste observé sur l'image finale n'est plus nécessairement équivalent au contraste initialement mesuré.
- le filtrage en fréquence a pu supprimer des signaux qui n'étaient pas du bruit.
- l'ajout de gain a pu mettre en évidence des contrastes qui sont en réalité peut-être uniquement du bruit.

Il convient donc d'être réservé sur les possibilités d'interprétation. Dans cette situation, on se contente tout d'abord de corrélérer les images avec notre connaissance de la chaussée. Corréler les mesures avec des éléments connus permet de valider en partie nos mesures en :

- S'assurant que les structures révélées sont similaires pour chaque fréquence sur un même tracé.
- Retrouvant certaines structures connues sur les 2 tracés (tranchées et stratification).

On fait ensuite des suppositions sur ce qu'on observe. La profondeur indiquée sur les images est une profondeur « fictive » car on suppose une vitesse constante de l'onde électromagnétique dans la chaussée. Cette profondeur sert uniquement d'indicateur.

### 6.6.1 Mesures en réflexion.

#### 6.6.1.1 Stratigraphie générale

En observant les images obtenues 900 MHz (fig. 6-8) et 450 MHz (fig. 6-9), on peut retrouver une certaine stratigraphie :

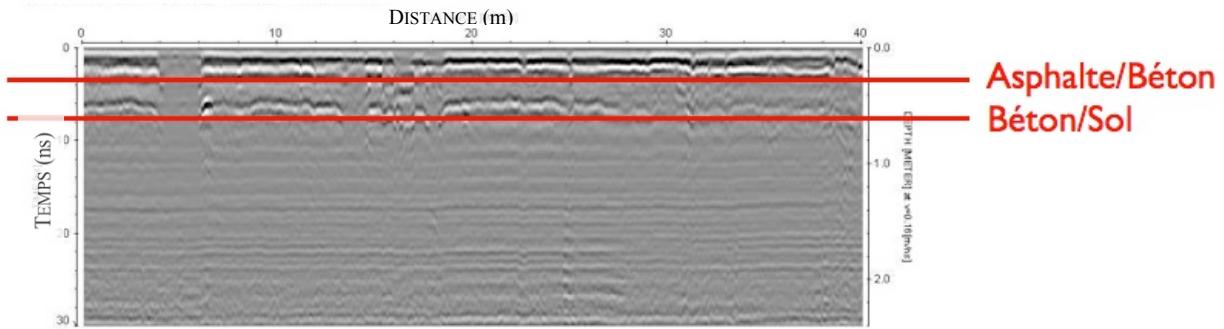


Figure 6-8: Mesures sur L1. 900 MHz.

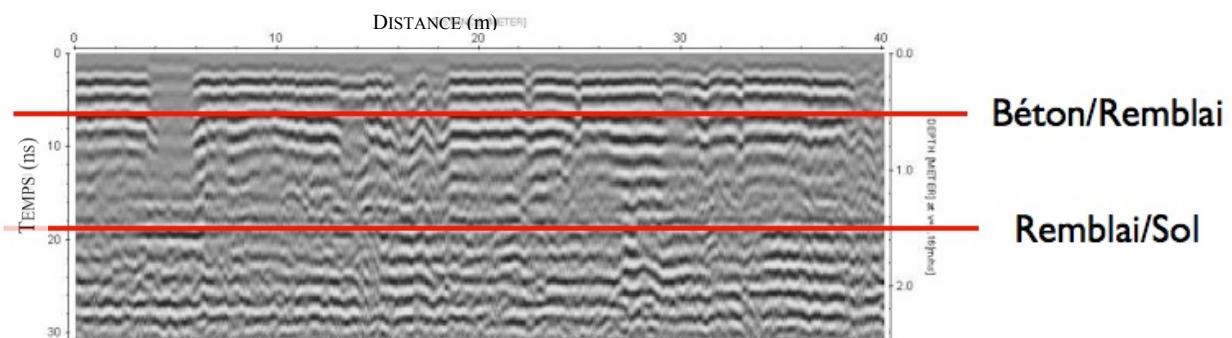


Figure 6-9: Mesures sur L1. 450 MHz.

Concernant l'interface supposée Remblai/Sol, la profondeur indicative correspondrait à peu près avec les données géotechniques. Comme le signal a été fortement augmenté pour observer cette variation, c'est une observation encore non validée à ce stade.

### 6.6.1.2 Anomalies transverses

On sait qu'il y a des anciennes tranchées de travaux Gaz-Métro (compagnie nationale de gaz domestique) sur notre tronçon d'étude. Les observations visuelles des interruptions dans l'asphalte appuient ces informations. Les images radar montrent une interruption de la dalle de béton en plusieurs points. Ces interruptions sont généralement correspondantes entre les 2 lignes. Les figures 6-10 et 6-11 présentent les correspondances évidentes (et connues) entre les lignes pour une même fréquence radar. On voit parfois des correspondances mais légèrement décalées. Il est possible que ce soit des phénomènes transverses car toutes les fissures ne sont

nécessairement orthogonales au profil, cependant, on ne peut pas s'avancer à les identifier comme tel.

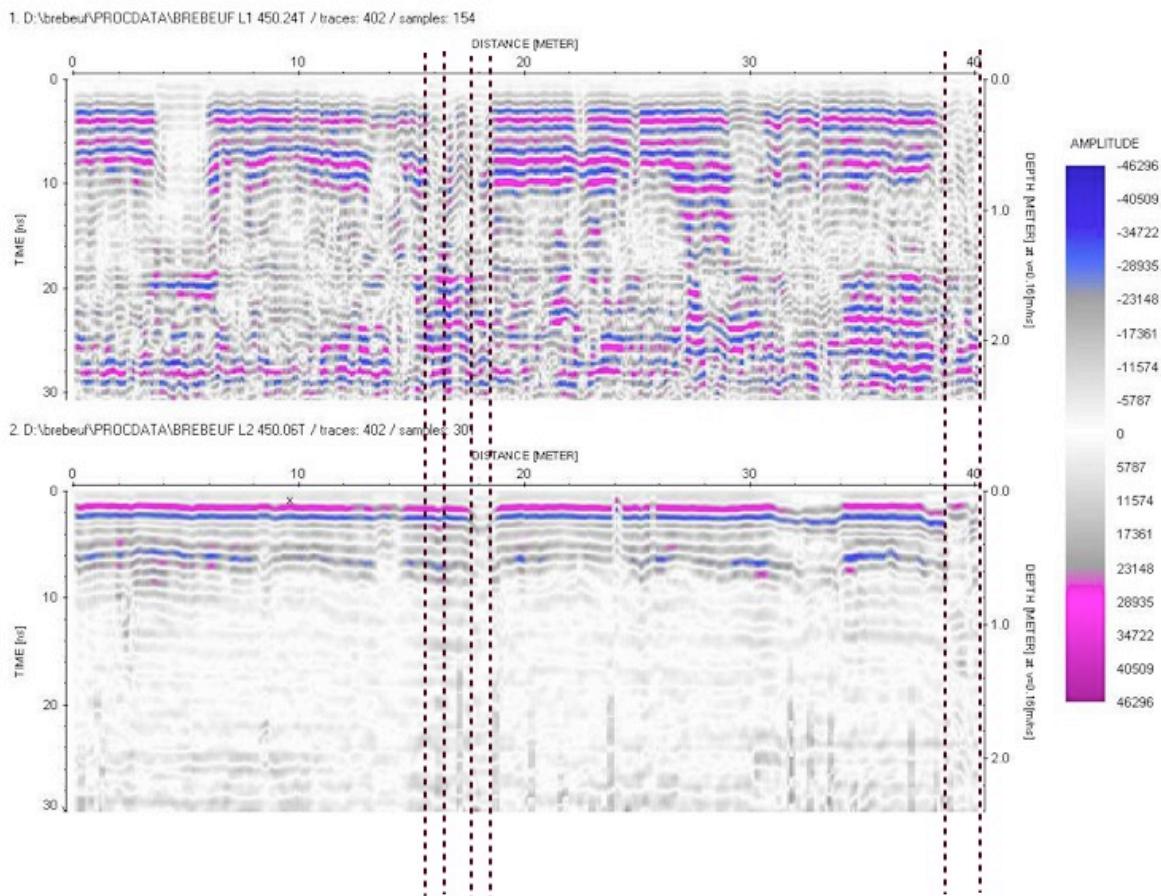


Figure 6-10: correspondances entre L1 et L2 à 450 MHz.

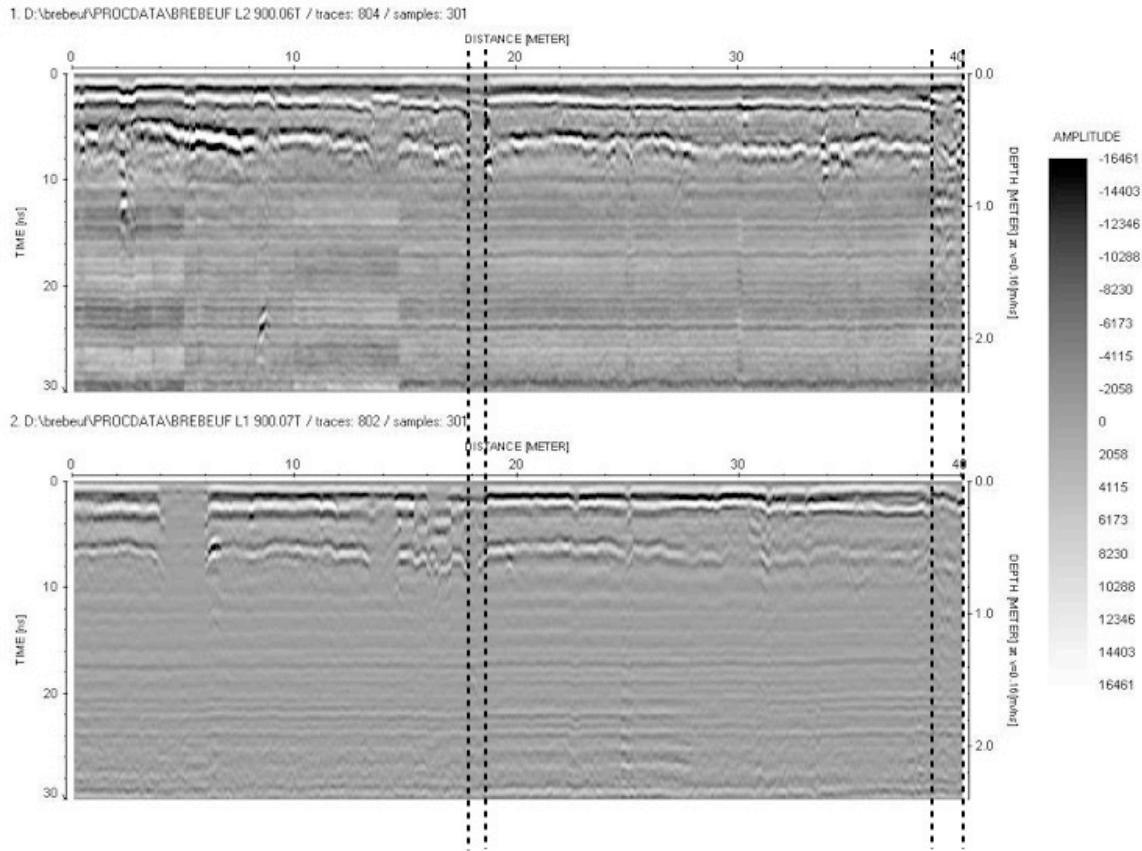


Figure 6-11: Correspondance entre les lignes L1 et L2 à 900 MHz.

Les mesures obtenues en réflexion semblent donner une image cohérente par la concordance stratigraphique et des éléments transversaux. On retrouve aussi des résultats prévus par la modélisation et la théorie liée au GPR :

- les fréquences 450MHz et 900 MHz peuvent donner des résultats pour une chaussée mixte.
- La précision apparaît meilleure en 900 MHz mais la profondeur de pénétration est plus grande en 450 MHz.

### 6.6.2 WARR

Les mesures en mode Wide Angle Reflection Refraction (WARR) sont réalisées en 4 points de la ligne 2 avec l'antenne 450 MHz. Le pas est de 0,25 m (voir fig. 6-12).

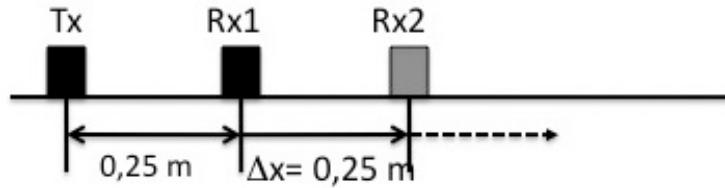


Figure 6-12: Schéma de la prise de mesure WARR.

Le faible échantillonnage ainsi que des problèmes survenus sur le terrain (coupure d'alimentation du système) rendent les données difficilement exploitables et de qualité médiocre. On présente tout de même certaines mesures (fig. 6-13).

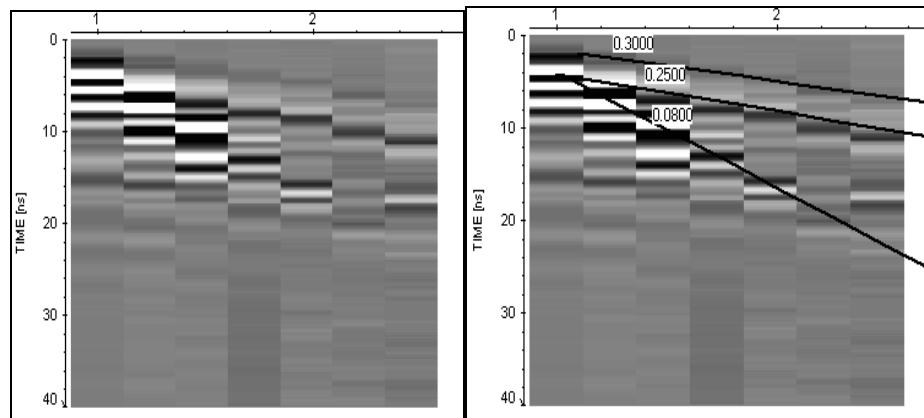


Figure 6-13: Mesures WARR à 450MHz

(à gauche: sans évaluation des vitesses; à droite: avec évaluation des vitesses).

### 6.6.3 Observations

D'après ces premières observations, les données obtenues sont a priori en accord avec la structure connue du sous-sol. On retrouve des interfaces réflectrices situées à temps relativement constants et qu'on traduit par la stratification connue de la chaussée. Dû au traitement des données et à l'ajout de gain, on ne peut pas estimer les contrastes en profondeur mais uniquement faire des suppositions sur les variations longitudinales. Ces dernières signifient des changements de propriétés physiques des matériaux le long du profil. On peut par exemple, observer des interruptions dans les interfaces qui pourraient être interprétées comme des cavités dans la dalle et/ou la présence de matériaux très absorbants.

## 6.7 Mesures électriques

Des mesures avec la méthode électrique en résistivité ont été menées sur la chaussée suite à sa reconstruction en chaussée souple mais avant la pose de l'asphalte. Bien qu'à l'origine, il était prévu que les mesures soient des mesures électrostatiques sur la chaussée mixte avant sa destruction, ceci n'a pas été réalisable. Toutefois, les mesures réalisées nous fournissent des informations sur le sol encaissant. Les mesures sont faites sur la même chaussée mais pas exactement au même endroit. La composition de la chaussée à cet endroit lors des mesures est telle qu'exposée à la figure 6-14.

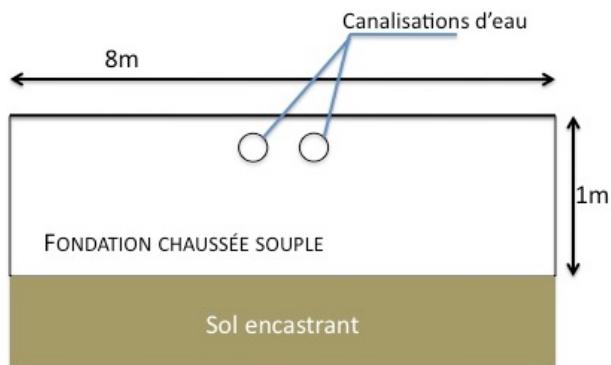


Figure 6-14: Schéma des éléments sur la composition de la chaussée le long du profil de mesure électrique. *Note: le schéma n'est pas à l'échelle et la position des conduites d'eau est uniquement indicative.*

Les mesures ont été réalisées sur une ligne de 8m en mode dipôle-dipôle aligné (fig. 6-15). L'écartement des électrodes est de 0,2 m. La profondeur d'auscultation est théoriquement comprise entre 1,50 m et 2 m.



Figure 6-15: Photos de la ligne d'électrodes (*gauche*: vue d'ensemble; *droite*: implantation des électrodes).

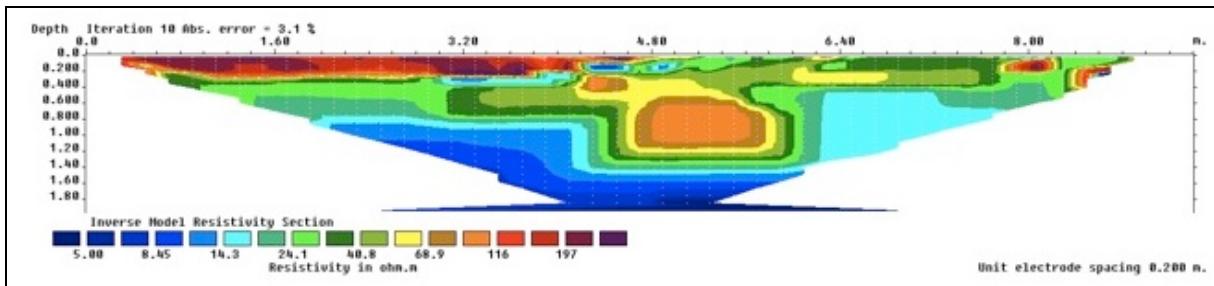


Figure 6-16: Mesures électriques après inversion.

La Figure 6-16 montre en profondeur un sol très conducteur. La profondeur calculée par l'inversion étant supérieure à 1m, on suppose que ce sol conducteur est le sol encaissant. Cette forte conductivité peut être liée à la présence d'argile dans les sols en place (rapport de forage d'avril 2009, voir Annexe 3). La principale conséquence sur l'auscultation de la présence d'argile serait une impossibilité du GPR de réaliser des observations dans la fondation. La présence de la méthode électrique qui reste efficace avec cette condition devient alors essentielle pour pallier à cet inconvénient.

## 6.8 Suivi du chantier

### 6.8.1 Objectifs

Suite à l'auscultation, on réalise une observation du chantier lors de la destruction de la chaussée et sa reconstruction en chaussée souple. Les objectifs principaux de ce suivi sont :

- **Observer** : en fonction des données radar, on observe lors de la destruction la présence de cavités, d'interruption de dalle sous l'asphalte. On cherche à compléter nos observations et l'interprétation des levés via une observation « destructive ».
- **Apprendre** : Il est peu commun que l'on fasse de l'auscultation de structures pendant les chantiers et sans prévisions. En comprenant comment fonctionne le chantier et comment les informations peuvent être obtenues, alors l'expérience pourra profiter pour la mise en place d'autres interventions de ce genre. Toutefois le sujet du projet n'étant pas en rapport avec les méthodes d'implantation et de réalisation d'auscultation sur les chantiers de construction, on ne s'attardera pas sur cet aspect dans le présent mémoire.
- **Prélever** : Pour pouvoir évoquer une éventuelle calibration adaptée des systèmes à l'environnement de l'île de Montréal, on profite de la destruction complète de la chaussée pour pouvoir récupérer des échantillons des différents matériaux. Leurs différentes propriétés sont ensuite analysées en laboratoire (voir chapitre 7). Le prélèvement est l'objectif prioritaire de ce suivi de chantier.

Le prélèvement d'échantillons est fait au cours de 2 étapes du chantier :

- travail en tranchée : prélèvement de sol, asphalte et béton.
- destruction totale : récupération de béton et d'asphalte.

Préalablement à ces étapes de chantier, la structure est entièrement fracturée au marteau mécanique pour permettre aux pelles d'opérer (fig. 6-17).



Figure 6-17: Photos de la surface cassée (à gauche: vue d'ensemble; à droite: vision spécifique de la dalle de béton cassée).

### 6.8.2 Tranchées

Le but des travaux en tranchée (fig. 6-18) est de changer les collecteurs d'eau. Suite à la mise en place d'une nouvelle conduite d'aqueduc, il faut relier les habitations à cette conduite. Les tuyaux de liaison font environ 2 pouces ( $\sim 50$  mm) de diamètre. Ils sont en fonte et sont situés à plus de 1,6 m de profondeur. Lors de la création de la tranchée, la pelleteuse enlève d'abord l'asphalte et la dalle de béton puis creuse le sol en dessous. L'observation des tranchées est un bon moyen d'aborder le sujet d'étude. Entre le moment où elles sont entièrement creusées et le moment où elles sont rebouchées (au minimum 5 h, maximum une journée voir plus, si incident), on peut observer une coupe de la chaussée assez clairement.



Figure 6-18: Vues d'une tranchée.

Lors de l'enlèvement de l'asphalte et du béton, des morceaux sont récupérés comme échantillons, si possible à la hauteur des lignes de profil radar. Une fois la tranchée creusée, on récupère des échantillons de sol en dessous de la dalle et plus en profondeur et de chaque côté de la chaussée. Les échantillons de sol sont pris juste en dessous de la dalle et à environ 1m de profondeur. Les échantillons de sols prélevés étaient mis dans des sacs en plastique épais refermables (marque Ziploc pour la congélation) pour conserver leur teneur en eau qui allait ensuite être évaluée en laboratoire.

### 6.8.3 Destruction totale

La destruction de la dalle se fait à l'aide d'une grosse pelle (fig. 6-19) et assez rapidement. Si la pelle mécanique travaille en continu, 10m de la surface de la chaussée peuvent être évacués en 10 minutes. Comparativement aux travaux de tranchées où on compte une tranchée par journée (incluant creusement, changement de tuyau et remblayage pour permettre la fluidité de la circulation des véhicules de chantier), la destruction des 40 m du profil a pris environ 3 jours. Les blocs sont souvent déplacés de plusieurs mètres avant de pouvoir les récupérer; ceci a nuit à la précision pour la localisation des échantillons sur le profil.



Figure 6-19: Photo de la dalle de béton et de la couche d'asphalte en train d'être enlevées.

#### 6.8.4 Facteurs d'incertitude et inconvénients

Dans l'idéal le prélèvement d'échantillon doit se faire avec les critères de qualité suivants :

- une cartographie précise de leur emplacement d'origine le long du profil
- les blocs d'asphalte et de béton ont une épaisseur correspondant à l'épaisseur totale de leurs couches respectives.
- Les échantillons de sol doivent être entreposés au froid après échantillonnage, le sol ne doit pas être trop longtemps au contact de l'air ambiant avant prélèvement (éviter l'évaporation) et le sac doit être fermé hermétiquement immédiatement après.

Aucune de ces conditions n'a pu être réalisée intégralement dans les conditions de travail liées à cette étude. La priorité étant à l'avancement des travaux, les prélèvements se font dans des intervalles de temps très spécifiques et aléatoires. De même lors de la destruction totale des couches d'asphalte et de béton, la récupération de blocs se fait dans les intervalles de temps très courts qui ne laissent pas forcément le temps au choix de l'échantillon.

De plus, il existe d'autres perturbations comme des conduites percées par la pelle (inondation complète de la tranchée, fig. 6-20), des « bris de tuyauterie » (fig. 6-21) ou même des fuites de

gaz (conduite ancienne qui commence à fuir lorsque déterrée ou problème dû aux travaux). Ces inconvénients peuvent perturber les échantillons avant leur prélèvement.



Figure 6-20: Conduite d'aqueduc percée lors de la coupe d'une tranchée.



Figure 6-21: Conduite d'eau particulière percée lors de travaux dans une tranchée.

## CHAPITRE 7    LABORATOIRE

### 7.1 But

Le travail de laboratoire consiste à :

- investiguer la permittivité complexe des échantillons choisis de béton et d'asphalte.
- réaliser l'analyse spectrale de la résistivité complexe des échantillons choisis de béton et d'asphalte.
- faire la mesure de la teneur en eau des échantillons de sol.

Ces données servent ensuite à être compilées pour réaliser une modélisation afin de comparer les réponses avec les mesures terrain. Le but n'est pas uniquement de recueillir le plus de données sur les matériaux de la chaussée mais d'obtenir le plus d'informations possibles en certains points du profil.

### 7.2 Considérations préliminaires

De nombreux blocs d'asphalte et de béton ont été récupérés de la chaussée (fig. 7-1). Toutefois, la plupart étaient de forme complexe, peu pratiques pour réaliser des mesures et rares sont ceux dont l'épaisseur équivalait à l'épaisseur totale de la couche à laquelle ils appartenaient. Pour limiter au minimum le nombre d'inconnues, on s'est concentré sur les points du profil pour lesquels il y avait le maximum d'informations géotechniques connues. Dans notre cas, cela signifie choisir des paires d'échantillons d'asphalte et de béton prélevées à la même abscisse sur le profil et dont on est certain que l'épaisseur correspondait à l'épaisseur de la couche d'asphalte et de la dalle de béton à cet endroit. Quatre blocs d'asphalte et quatre blocs de béton sont retenus pour les mesures.



Figure 7-1: Blocs récupérés stockés en vrac.

D'autre part, les appareils de mesures des propriétés physiques nécessitent que l'on travaille la géométrie et les surfaces des échantillons. Toutefois, on doit tenter de garder des dimensions qui permettent d'avoir constamment un échantillon représentatif en proportion de matrice cimentaire et de granulats. Les agrégats du béton récupéré sur la chaussée (fig. 7-2) sont très gros comparés aux agrégats des bétons actuels (5cm de diamètre plutôt que 3 cm).



Figure 7-2: Coupe de béton avec évaluation de la taille des agrégats.

Les contraintes matérielles font qu'on a, dans un premier temps, besoin de surfaces planes sur nos blocs puis ensuite de carottes de béton issues de ces mêmes blocs. A chaque étape, on est donc soumis à la loi du « hit-or-miss » (« ça passe ou ça casse »). Comme chaque étape nécessite une transformation irréversible de l'échantillon, les mesures de l'étape précédant la transformation ne peuvent pas être refaites. Les surfaces planes sur les échantillons sont réalisées avec une scie à béton et le carottage avec une carotteuse mécanique (fig. 7-3).



Figure 7-3: Scie à béton (à gauche) et carotteuse (à droite)

Comme les propriétés diélectriques des matériaux changent en fonction de leur teneur en eau (voir chap. 4), les mesures sont réalisées sur les échantillons secs puis sur les mêmes échantillons submergés dans de l'eau du système de distribution de la ville pendant une semaine minimum (fig. 7-4). On nomme respectivement « mesures à sec » et « mesures humides » ces deux états. Il est peu probable que la saturation des matériaux soit atteinte compte tenu de la faible connexion entre les pores. Par ailleurs aucune mesure de teneur en eau n'a été réalisée avec le bon protocole ou des balances suffisamment précises. Comme le temps d'immersion est supérieur à une semaine, on se rapproche des conditions limites de saturation en surface possible lorsque les matériaux sont en place dans la chaussée.



Figure 7-4: Blocs de béton plongés dans de l'eau. Sous la forme de blocs (à gauche) et sous forme de carottes (à droite).

## 7.3 Mesures de permittivité diélectrique

### 7.3.1 La sonde

Les mesures de permittivité ont été réalisées avec une sonde diélectrique développée au sein du Groupe de Recherche et d'Auscultation d'Infrastructure (GRAI) à l'Université de Sherbrooke. Cette sonde a été conçue pour mesurer la permittivité complexe des bétons sans avoir à réaliser de prélèvements. Son utilisation nécessite uniquement la présence d'une surface lisse. L'autre particularité est que cette sonde réalise des mesures par intégration sur un volume. Cette sonde, bien que testée sur de matériaux homogènes ou des bétons avec granulats très fins (Filali, *et al.*, 2008), est la sonde disponible la plus adaptée pour notre situation.



Figure 7-5: Dispositif pour mesures de permittivité complexe. De gauche à droite: VNA, sonde, bloc à ausculter.

Le Vectoriel Network Analyser (VNA; fig. 7-5) permet d'envoyer une onde sinusoïdale parfaite dans le câble coaxial lié à la sonde. La sonde (fig. 7-6) retransmet l'onde réfléchie et le VNA en déduit le coefficient de réflexion complexe du matériau. Cette opération est réalisée pour la bande de fréquence de 50 MHz à 900 MHz. Un traitement informatique des données permet de déduire la partie réelle et la partie imaginaire de la permittivité.

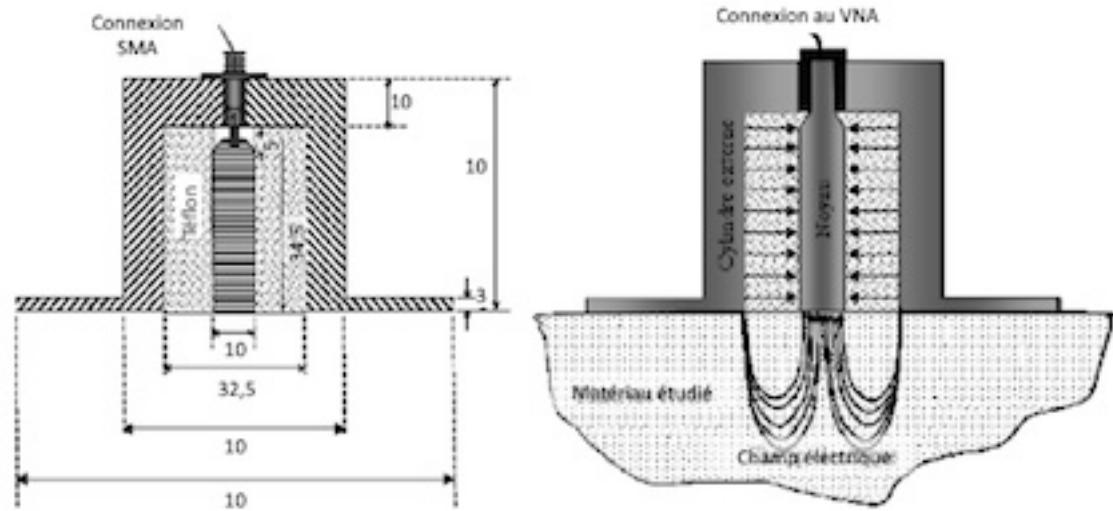


Figure 7-6: Schémas des dimensions de la sonde en millimètres (à gauche) et de son fonctionnement (à droite) (Filali, 2006, 2008).

La sonde intègre les mesures sur un volume d'environ  $30\text{cm}^3$ . Comparativement au volume moyen des granulats, le volume d'intégration de la sonde est assez faible. Toutefois, notre béton étant très hétérogène, on réalise plusieurs mesures sur chaque échantillon en différents points et sur des faces différentes puis on observe la moyenne et l'écart type de ces mesures. Le concepteur de la sonde recommande de ne garder que les mesures comprises dans un écart type de 5%. Considérant la forte hétérogénéité des mesures, on analyse les mesures dans leur ensemble.

### 7.3.2 Résultats

Une fois les parties imaginaire et réelle séparées, le protocole d'affichage et d'analyse des mesures est le suivant :

- par échantillon : on affiche la partie réelle et la partie imaginaire ainsi que leurs moyennes et écart-types.
- par matériaux : On affiche sur un même graphe les moyennes de chaque bloc.

- comparaison sec/humide : Par matériau, on affiche les variations entre les mesures à sec et les mesures humides.

Le traitement des mesures et les graphes sont réalisés avec le logiciel Matlab.

### 7.3.2.1 Calibration de la sonde

La calibration de la sonde est faite via le programme Matlab fourni par le concepteur et expliquée dans une publication (Filali, *et al.*, 2006). Cependant, on réalise des mesures sur un échantillon de plexiglas homogène et dans l'air pour effectuer une rapide vérification (fig. 7-7).

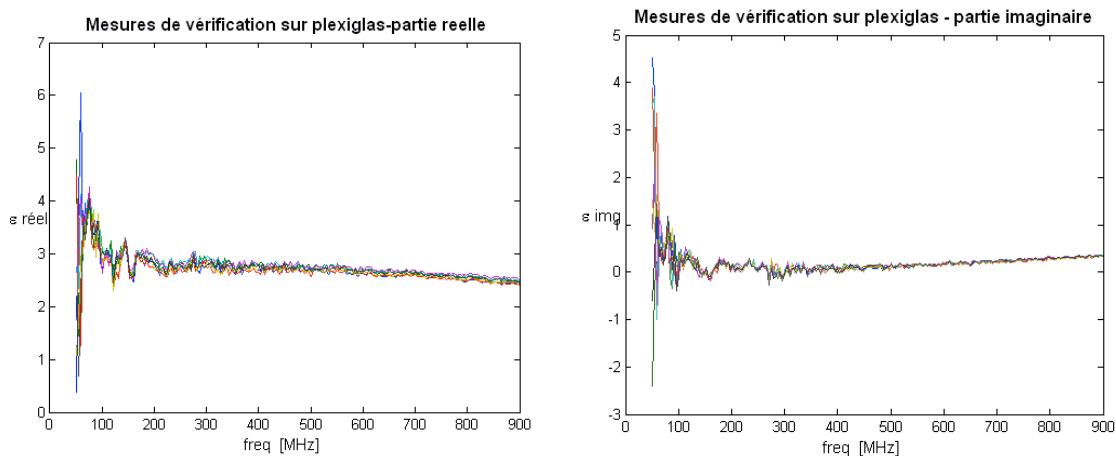


Figure 7-7: Mesures de vérification de la calibration sur du plexiglas. *A gauche*: partie réelle; *à droite*: partie imaginaire.

Le plexiglas est un matériau non dispersif et sa constante diélectrique est indépendante de la fréquence. On devrait alors avoir une partie réelle constante en fréquence et une partie imaginaire quasi nulle. On fait les constatations suivantes :

- Les mesures présentent une sorte d'instabilité pour des fréquences inférieures à 300 MHz.
- Pour des fréquences supérieures à 300 MHz, les mesures paraissent un peu bruitées mais la partie réelle paraît constante et la partie imaginaire paraît nulle.

Pour des fréquences supérieures à 300 MHz, les mesures faites par la sonde paraissent acceptables.

### 7.3.2.2 Mesures types sur un échantillon

On présente les mesures pour un échantillon puis les parties suivantes montrent les résultats par moyenne par matériau.

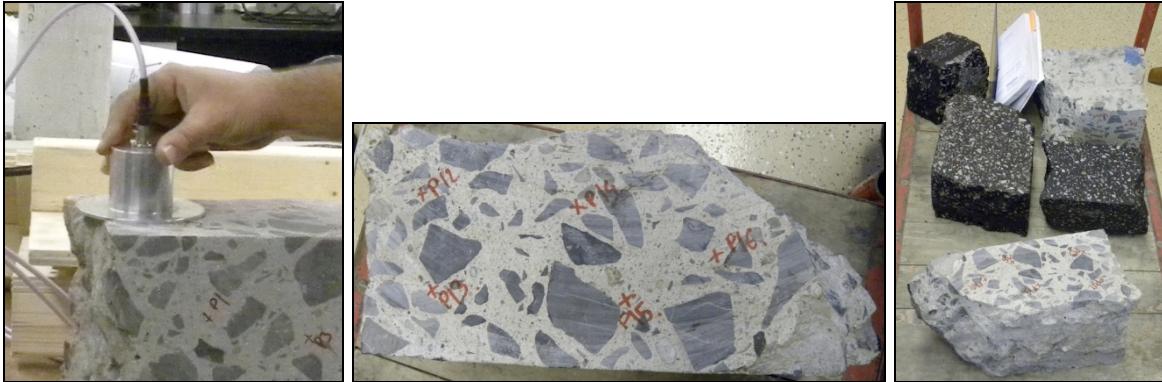


Figure 7-8: Photos de la prise de mesures.

Les mesures sont prises dans la plupart des cas sur 3 faces de chaque échantillon (sauf un des échantillons trop petit pour réaliser 3 faces planes). La figure 7-8 présente quelques photos de la prise de mesures.

Les mesures réalisées sur un bloc de béton « sec » sont les suivantes (fig. 7-9) :

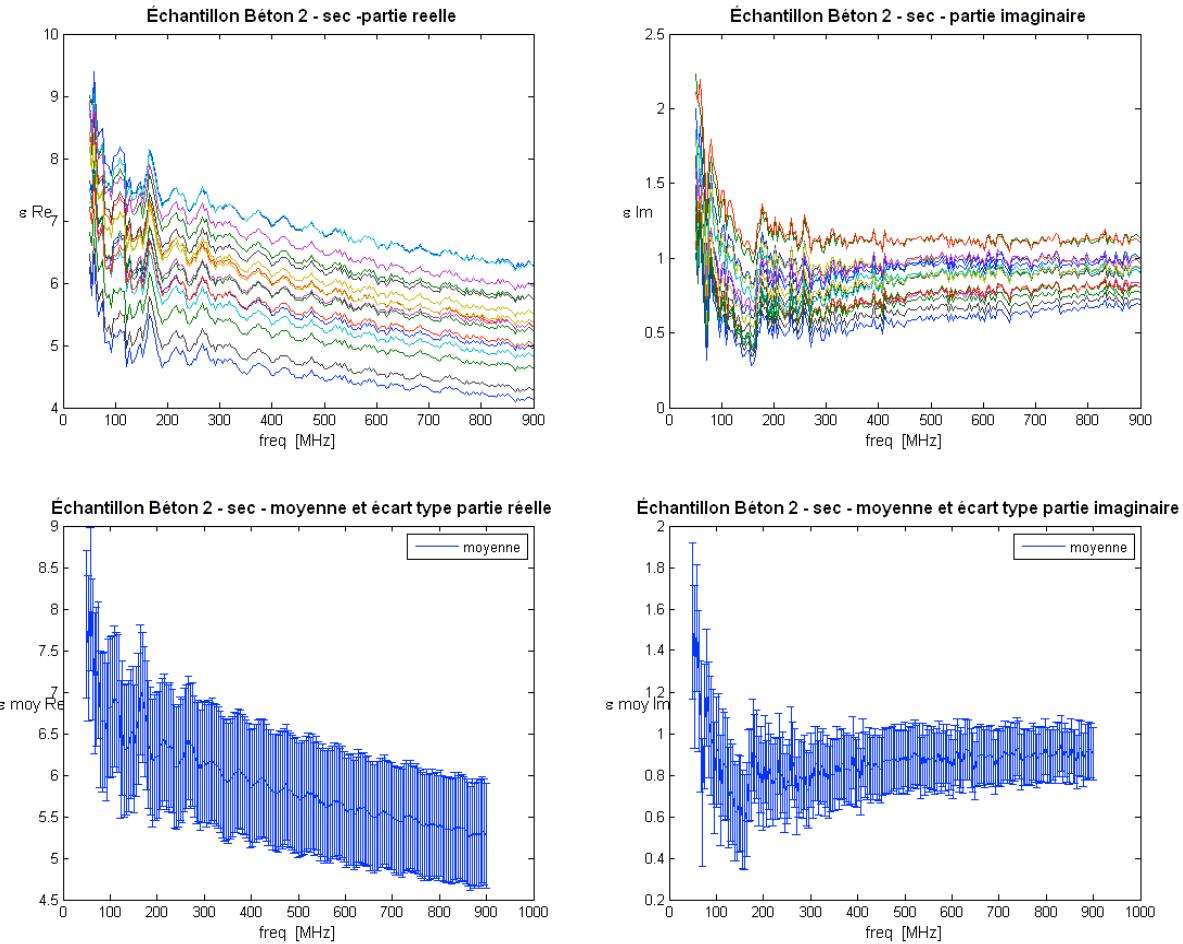


Figure 7-9: Exemple de traitement et présentation des mesures.

On peut effectuer plusieurs remarques valables pour chacune de nos mesures :

- Il existe une sorte de bruit ou signal récurrent sur chacune des mesures. On a cherché la possibilité de réduire ce signal grâce à des mesures réalisées dans l'air et par soustraction ou déconvolution de signal. Néanmoins, pour éviter de fausser les interprétations avec des traitements de signal plus ou moins justifiés, les données brutes sont présentées. L'amplitude de ce signal paraît inférieure à 5% de la valeur mesurée pour des fréquences supérieures à 300MHz.
- Les mesures paraissent instables dans la bande de fréquence 50MHz-300MHz. Cela n'a pas une grosse influence sur la suite de nos réflexions car la fréquence minimale des levés

radar est 450MHz. Néanmoins, si l'on souhaitait obtenir des valeurs fiables pour cette bande de fréquence, il faudrait trouver une méthode plus stable ou voir à des techniques de correction appropriées.

- Les écart-types sont très grands sur un même échantillon. Cela est probablement dû aux hétérogénéités des matériaux, en particulier de la composition et de la taille des agrégats, Ce comportement se retrouve sur tous les blocs.

### 7.3.2.3 Asphalte

#### 7.3.2.3.1 Humide

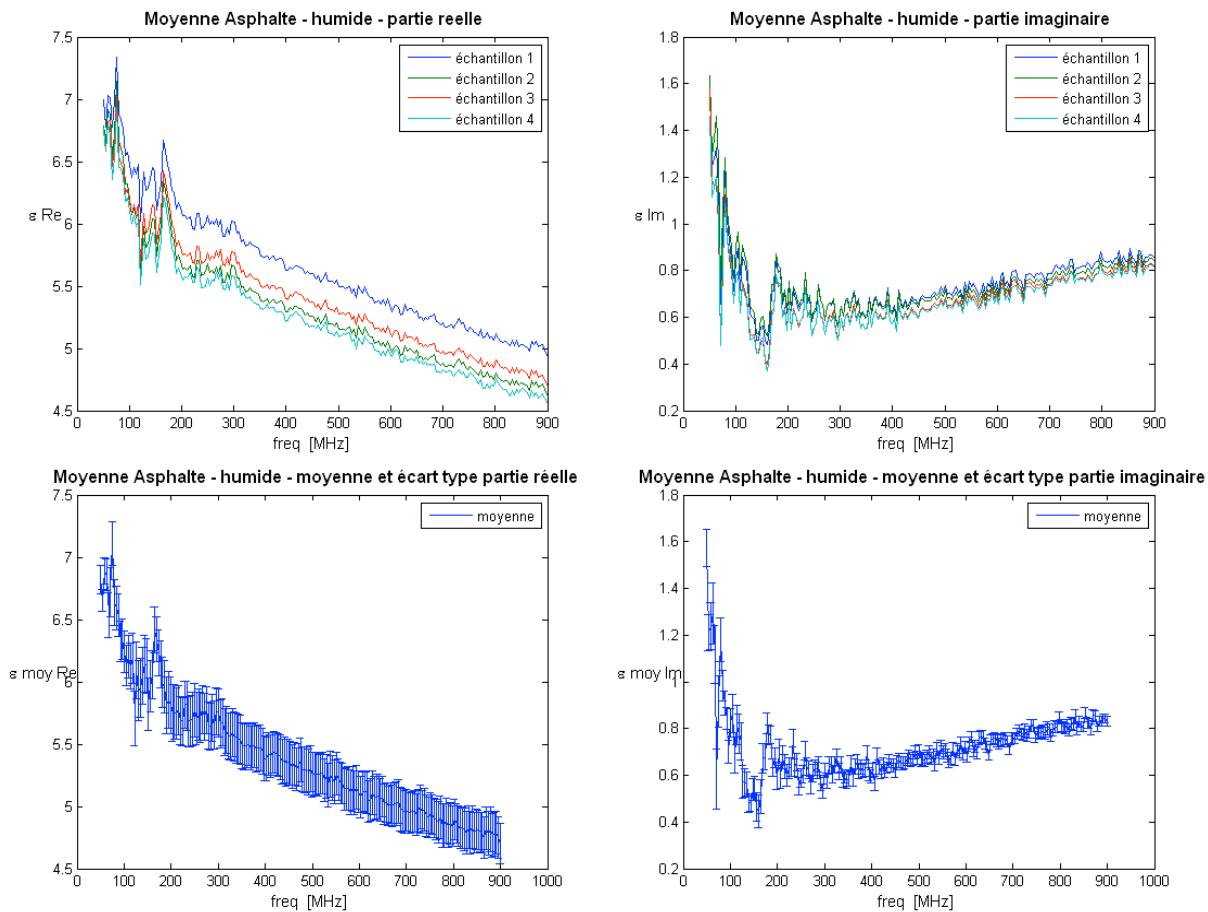


Figure 7-10: Moyennes pour le matériau "Asphalte" humide.

À 900 MHz, les valeurs pour la partie réelle sont comprises entre 4.5 et 5 et entre 0.8 et 0.9 pour la partie imaginaire (fig. 7-10).

### 7.3.2.3.2 Sec

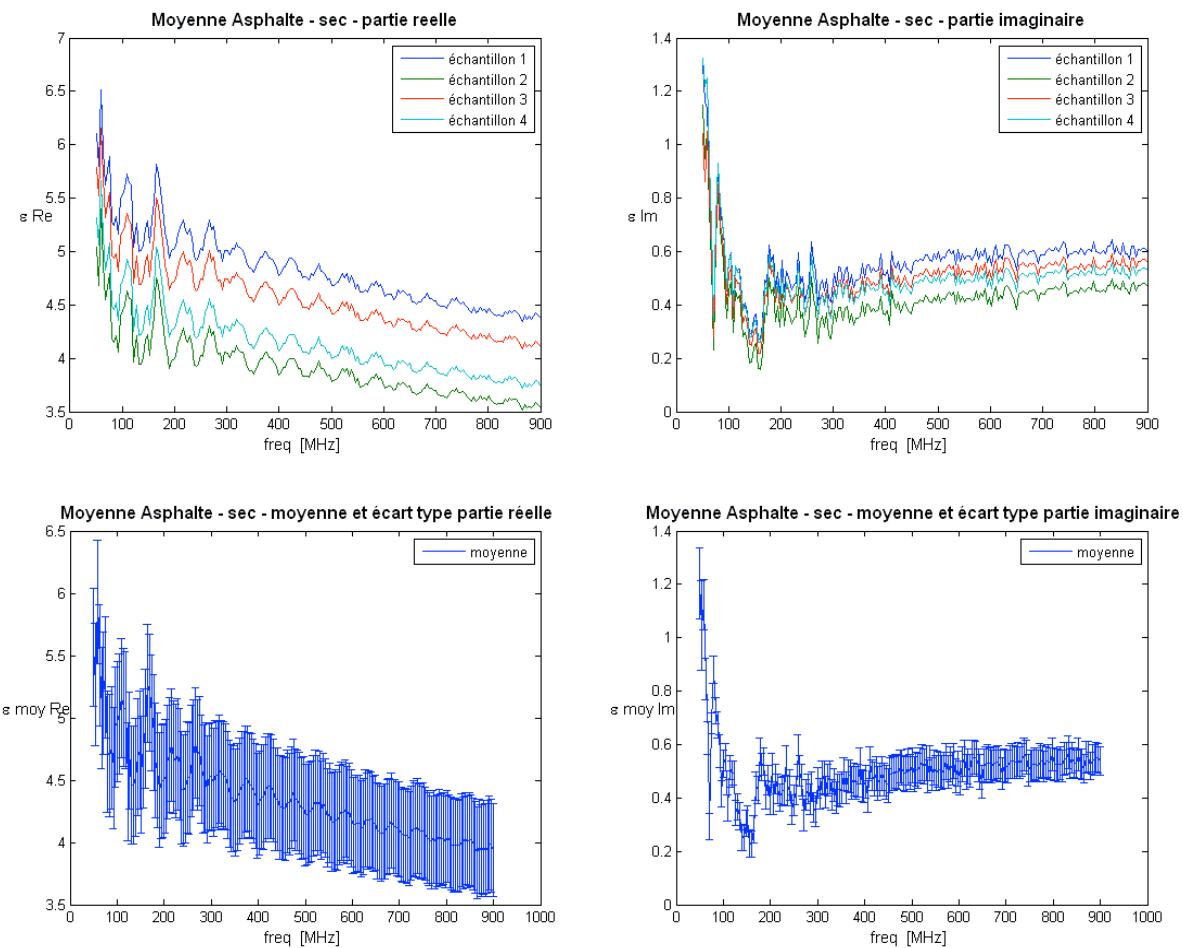


Figure 7-11: Moyennes pour le matériau "Asphalte" à sec.

À 900 MHz, les valeurs pour la partie réelle sont comprises entre 3.5 et 4.5 et entre 0.4 et 0.6 pour la partie imaginaire (fig. 7-11). Les écarts entre les moyennes des différents échantillons sont plus grands. Ceci est probablement dû au fait que l'asphalte a commencé à fissurer lors de son séchage.

### 7.3.2.3.3 Comparaison

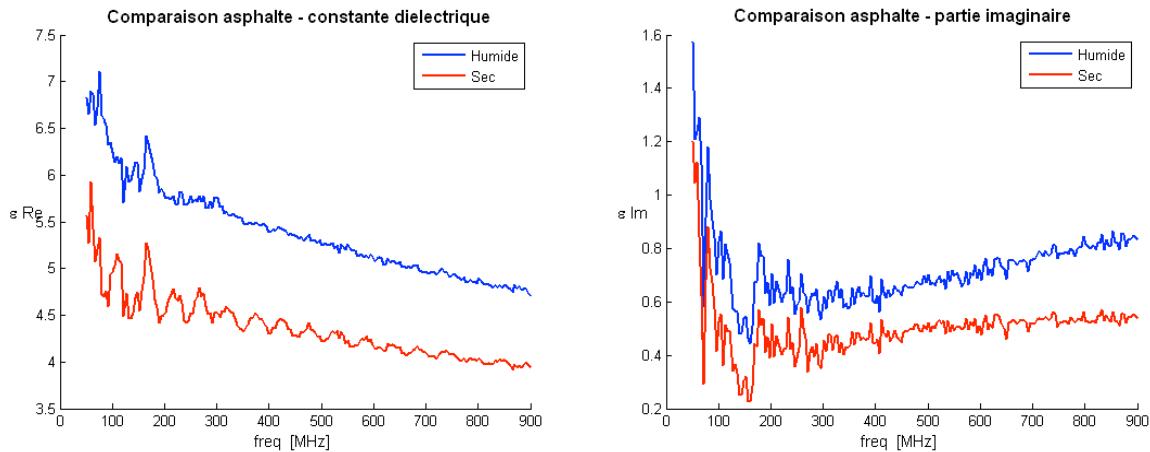


Figure 7-12: Comparaison pour le matériau Asphalte humide et à sec.

La partie imaginaire est plus forte lorsque l'asphalte est humide (fig. 7-12). Que le matériau soit sec ou humide, le rapport de la partie réelle sur la partie imaginaire n'est jamais très inférieur à 1. Il apparaît que l'asphalte ne peut pas être considéré comme un matériau à faibles pertes. Les différences entre les constantes diélectriques de l'air et de l'asphalte permettent de dire que l'interface asphalte/air donnera en toute saison une réflexion facilement identifiable.

### 7.3.2.4 Béton

#### 7.3.2.4.1 Humide

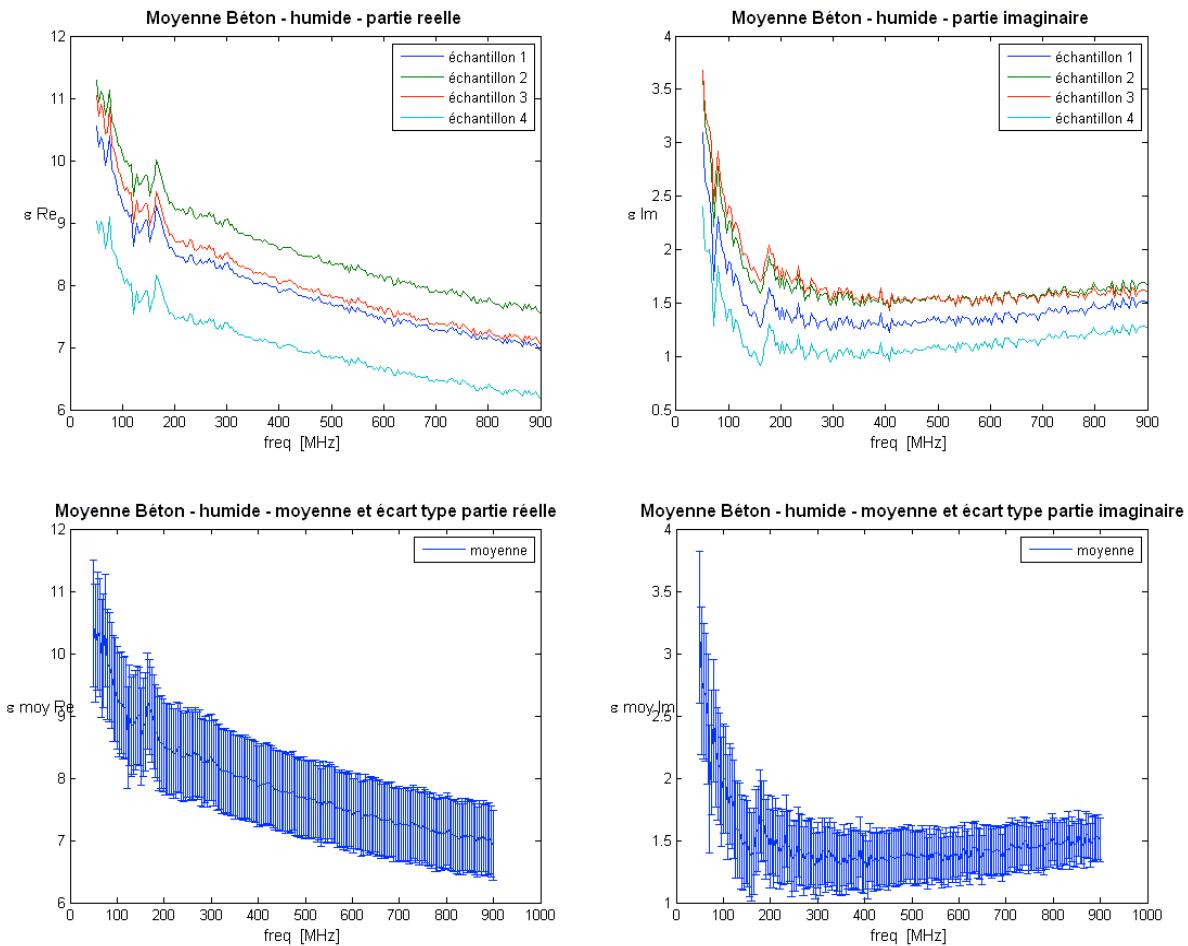


Figure 7-13: Moyennes pour le matériau Béton humide.

On mesure une partie réelle de la permittivité pour le béton dit « humide » comprise entre 6.5 et 7.5 à 900MHz ainsi qu'une partie imaginaire comprise entre 1.3 et 1.7 (fig. 7-13). Le béton est globalement plus dispersif que l'asphalte.

### 7.3.2.4.2 Sec

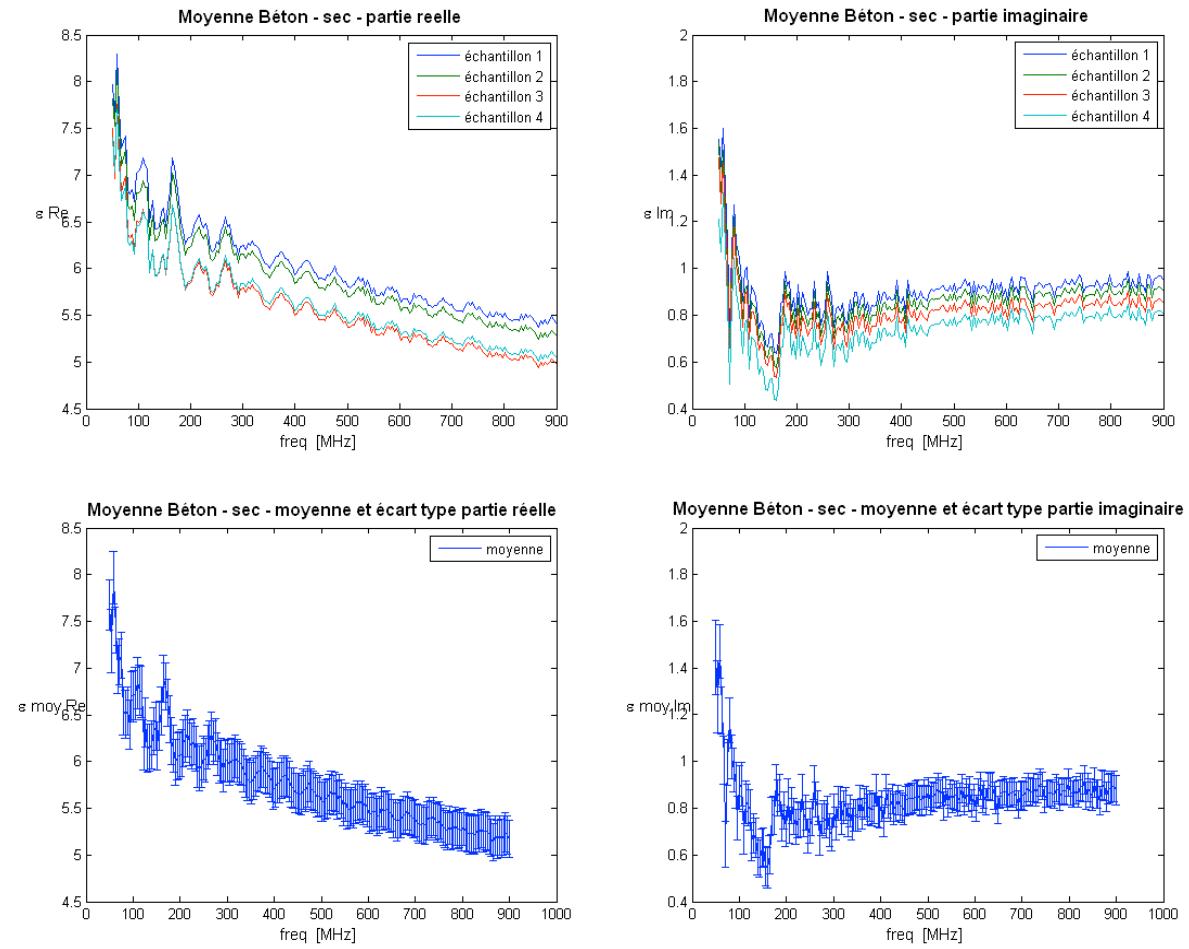


Figure 7-14: Moyennes pour le matériau Béton à sec.

Pour le béton dit « sec » les valeurs de la constante diélectrique varient entre 5 et 5.5 et la partie imaginaire rentre dans la fourchette 0.8-1 (fig. 7-14).

#### 7.3.2.4.3 Comparaison

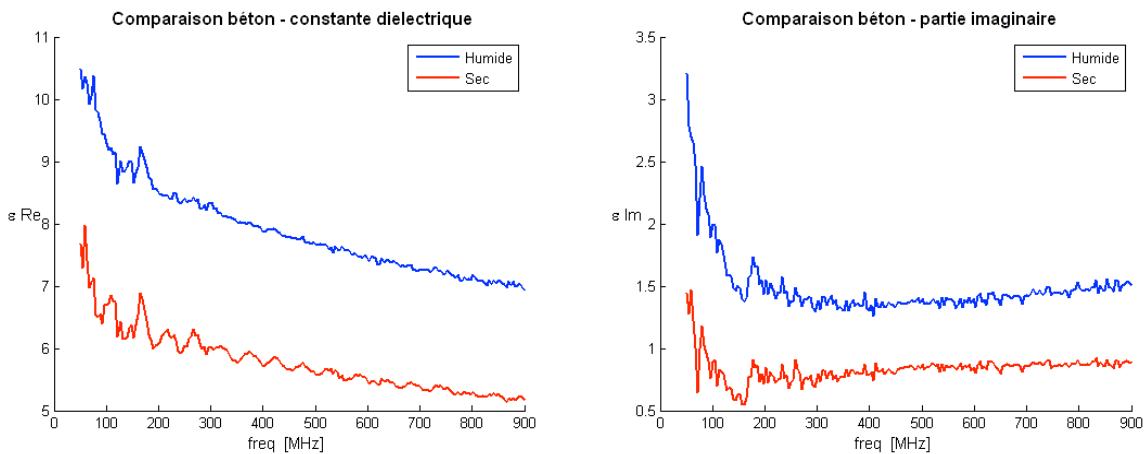


Figure 7-15: Comparaison des moyennes de béton humide et sec.

L'écart des valeurs (fig. 7-15) entre le béton humide et le béton sec est environ de 2.5 en moyenne. La partie imaginaire montre une plus grande dispersion que l'asphalte.

### 7.3.3 Remarques

#### 7.3.3.1 Matériaux composites

Pour chaque bloc, asphalte et béton confondus, les écarts types sont très grands pour les mesures points par point. Néanmoins lorsqu'on considère les moyennes de chaque échantillon, on remarque que les écarts entre ces dernières sont assez faibles. Malgré les fortes hétérogénéités de nos matériaux, le grand nombre de mesures et le système de comparaison des moyennes permet d'obtenir des valeurs finales qui se rejoignent. On met ici en évidence le problème de mesures des permittivités des matériaux fortement hétérogènes. Bien que la sonde n'intègre qu'un faible volume par rapport à la taille des granulats, la multiplicité des mesures à différents endroits de l'échantillon permet d'obtenir une valeur moyenne a priori représentative. Le fait que, d'une façon générale, les valeurs obtenues soient similaires et suivent les mêmes tendances que celles publiées (tab. 7-4 et 7-5), appuie les résultats obtenus.

### 7.3.3.2 Variations saisonnières

Tout comme le laissait prévoir les diverses références sur le sujet, on observe effectivement une augmentation de la constante diélectrique avec la teneur en eau. À partir des mesures de la constante diélectrique de l'asphalte et du béton, on peut faire une estimation du coefficient de réflexion lorsque les matériaux sont secs (par exemple à la fin de l'été ou pendant l'hiver) et lorsqu'ils sont humides (par exemple au printemps).

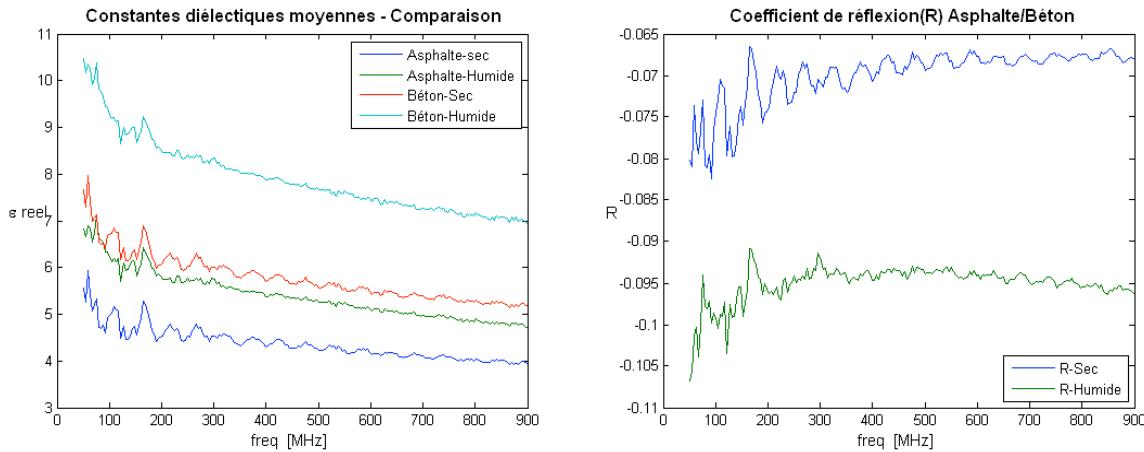


Figure 7-16: Comparaison des moyennes de constante diélectrique pour chaque matériau (à gauche) et évaluation des coefficients de réflexion en situation humide et sèche (à droite).

Le coefficient de réflexion est plus faible en milieu sec (fig. 7-16). On peut déjà en déduire que les images radar montreront probablement des réflexions plus nettes à l'interface asphalte/béton en conditions humides.

## 7.4 Mesures de résistivité

### 7.4.1 Principe et montage

On cherche ici à appliquer à la lettre la loi d'Ohm décrite au chapitre 4.

Pour réaliser les mesures de résistivité, on a besoin d'un volume connu du matériau à caractériser. Pour cela, on extrait des carottes des blocs précédemment utilisés pour les mesures de

permittivité. Ensuite, via un montage simple, du courant est injecté dans la carotte et le potentiel aux bornes est mesuré. Les figures 7-17 et 7-18 montrent le montage expérimental.

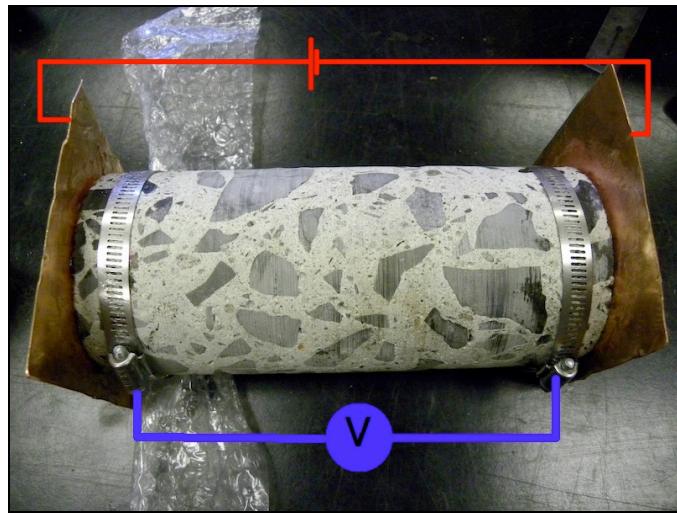


Figure 7-17: Photo du montage expérimental avec schéma de mesure du potentiel et d'injection de courant.

Les plaques de métal servant de pôles d'injection sont des plaques de cuivre polies pour enlever toute trace d'oxydation. Le dipôle de potentiel est constitué de colliers de serrage. Les contacts entre le béton et les plaques ou le béton et les colliers de serrage sont améliorés par la présence d'un gel électrolytique qui facilite le passage du courant. Pour éviter la présence d'arc électrique entre les plaques et les colliers de serrage, on place du plastique à bulles qui fait office d'isolant.



Figure 7-18: A gauche, montage général et à droite, asphalte dans l'étau.

L'appareil utilisé est le Syscal Jr de la société Iris Instrument. On utilise des pinces pour faire le contact avec les éléments métalliques du montage. Lorsqu'on fait les mesures sur l'échantillon

humide, l'intégralité de l'échantillon est enveloppée de plastique isolant pour conserver l'humidité. Un étau portatif avec des pinces en plastique est utilisé pour maintenir un bon contact entre les plaques de métal et les extrémités de l'échantillon. Les mesures sont réalisées une dizaine de fois sur chaque échantillon pour s'assurer une bonne répétabilité et stabilité des mesures. Par ailleurs, on s'assure d'avoir toujours une densité de courant assez faible pour éviter des phénomènes non linéaires.

#### 7.4.2 Résultats

Les mesures ont pu être réalisées pour tous les échantillons humides (asphalte et béton). Mais elles n'ont pas été possibles pour les échantillons d'asphalte secs. La résistance électrique de l'asphalte étant très élevée, en l'absence d'humidité, notre montage n'a pas réussi à injecter de courant significatif. A titre indicatif, la résistance de contact (la résistance induite par le montage) pour les montage de béton est d'une dizaine de kilohms pour les bétons humides et entre 40 et 80  $k\Omega$  pour les bétons secs. Pour l'asphalte humide, la résistance de contact est comprise entre 20 et 60  $k\Omega$  tandis qu'elle s'élevait presque à 1000  $k\Omega$  lors de la tentative manquée de mesures à sec.

On présente les résultats sous la forme suivante :

- tableau des caractéristiques géométriques du montage (tab. 7-1).
- tableau des moyennes des mesures « humides» (tab. 7-2).
- tableau des moyenne des mesures « à sec » (tab. 7-3).

Tableau 7-1: Caractéristiques géométriques des montages.

Caractéristiques géométriques				
Échantillon	Diamètre (mm)	Surface de contact (mm <sup>2</sup> )	Longueur totale (mm)	Espacement MN (mm)
B4	70	3848	190	150
B3	70	3848	160	120
B2	95	7088	210	170
B1	95	7088	220	180
A4	95	7088	125	80
A3	95	7088	125	80
A1	95	7088	125	80

Tableau 7-2: Mesures pour les échantillons humides.

Mesures «humides» - Moyennes				
Échantillon	V (mV)	I (mA)	R (Ohm)	rho (ohm.m)
Béton	B4	4852	0,46	10564 ± 1,5%
	B3	3998	0,87	4610 ± 0,3%
	B2	3947	1,06	3714 ± 0,4%
	B1	4391	0,87	5053 ± 0,2%
Asphalte	A4	4863	0,14	33612 ± 2%
	A3	4129	0,24	17169 ± 7%
	A1	3758	0,21	17596 ± 1,5%

Tableau 7-3: Mesures pour les échantillons secs.

Mesures «à sec» - Moyennes				
Échantillon	V (mV)	I (mA)	R (Ohm)	rho (ohm.m)
Béton	B4	4852	0,46	102334 ± 5%
	B3	3998	0,87	29452 ± 2%
	B2	3947	1,06	25908 ± 4%
	B1	4391	0,87	31482 ± 2,5%

Ces résultats montrent une certaine cohérence. D'une part, la résistivité est bien plus grande pour un échantillon sec que pour un échantillon humide. Dans les bétons, cela s'explique car la conductivité est principalement un phénomène ionique ayant lieu dans la matrice cimentaire (Laurens, et al., 2005). Lorsque la matrice est humide ou saturée, les échanges ioniques sont facilités et la conductivité augmente. De plus, l'échantillon de béton le plus résistant humide est aussi le plus résistant sec. On peut en déduire que d'une certaine façon, les proportions granulats/matrice ainsi que la porosité sont équivalentes d'une carotte à une autre.

Bien qu'ayant réalisé un montage simple, les valeurs obtenues rentrent dans une fourchette de valeurs usuelles (tab. 7-4 et 7-5).

## 7.5 Observations et analyses

Ce travail de laboratoire fournit donc des fourchettes de valeurs de constante diélectrique et de résistivité pour des échantillons d'asphalte et de béton. Une comparaison avec d'autres analyses est faite dans les tableaux 7-4 et 7-5. Dans ces tableaux de synthèse, on compare les valeurs obtenues par fourchette de valeurs indépendantes de l'état sec ou humide des échantillons. On compare les valeurs extrêmes de notre étude avec les valeurs extrêmes proposées dans la littérature.

Tableau 7-4: Tableau comparatif de différents travaux - Asphalte.

ASPHALTE	Méthode (si connue)	Fourchette de valeurs
<b>Constante diélectrique</b>		
Projet (2010)	réflectométrie	4-5
Saarenketo (Saarenketo, 2010)	---	4-6
Jaselski (Jaselskis, <i>et al.</i> , 2003)	réflectométrie	4.5-7
Fauchard (Fauchard, <i>et al.</i> , 2003)	---	4-6
Shang (Shang, <i>et al.</i> , 1999)	transmission coaxiale	6-6.5
<b>Résistivité (<math>\Omega \cdot \text{m}</math>)</b>		
Projet (2010)	---	$\geq 1500$
Shao-Peng (Shao-peng, <i>et al.</i> , 2002)	---	$10^7$ - $10^9$

Tableau 7-5: Tableau comparatif des différents travaux - Béton.

BETON	Méthode (si connue)	Fourchette de valeurs
Constante diélectrique		
Projet (2010)	réflectométrie	5-10
Soutsos (Soutsos, <i>et al.</i> , 2001)	transmission coaxiale	5-10
Robert (Robert, 1998)	transmission coaxiale	10-25
Filali (Filali, <i>et al.</i> , 2008)	réflectométrie	5-8
Résistivité ( $\Omega \cdot \text{m}$ )		
Projet (2010)	---	200-1500
Sbartaï (Sbartaï, <i>et al.</i> , 2007)	Sonde Wenner	60-900
Malhotra (Malhotra & Carino, 1991)	---	300 – 1000
Neville (Neville, 1998)	---	$10-10^{10}$

Les valeurs obtenues expérimentalement sont en concordance avec les valeurs de littérature. Il est intéressant d'observer que bien que les méthodes utilisées soient différentes et ainsi que la composition exacte des matériaux, les valeurs sont similaires. Cela permet de faire une première validation de la méthode employée. Par ailleurs, on constate que l'on ne peut pas nécessairement considérer le béton et l'asphalte comme non dispersifs. Dans toutes les situations (fig. 7-12 et fig. 7-15), la partie imaginaire n'est pas négligeable par rapport à la partie réelle.

## 7.6 Teneur en eau dans les échantillons de sol

On mesure la teneur en eau en suivant la norme américaine d'évaluation de la teneur en eau dans les sols (ASTM). Les échantillons sont tout d'abord pesés puis chauffés à 110°C pendant 16h. Ensuite ils sont passés au dessicateur pendant 1h et finalement repesés. Il y a une trentaine d'échantillons différents au total. Tous les 5 échantillons, les mesures sont répétées 3 fois pour

contrôler la qualité des résultats. Les teneurs en eau mesurées sont comprises entre 15% et 25%. La figure 7-19 montre les teneurs en eau en fonction de la profondeur (0,5 m et 1m).

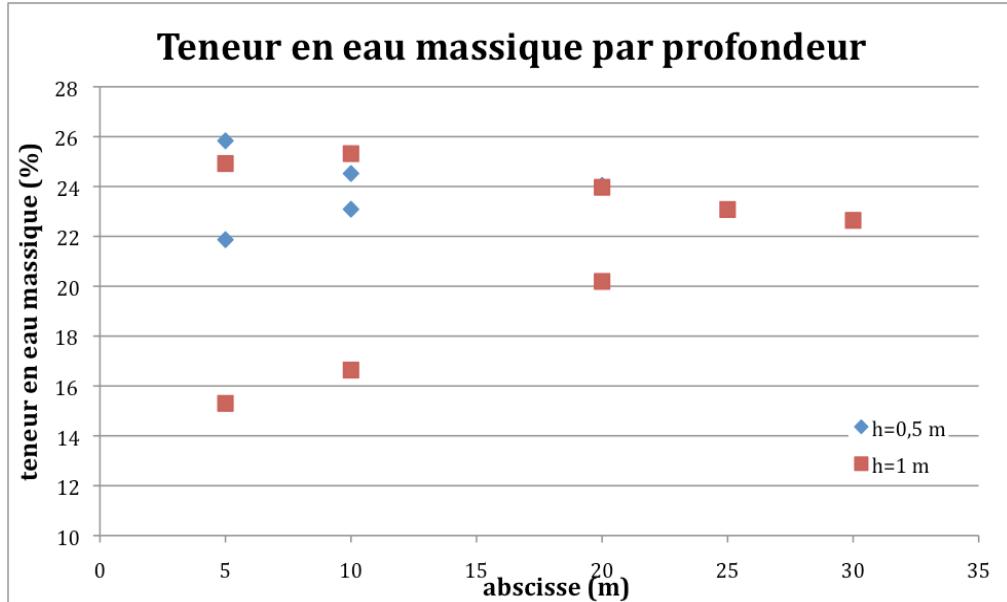


Figure 7-19: Teneur en eau massique mesurée en fonction de la position du prélèvement sur le profil.

Lorsque cela était possible les prélèvements ont été réalisés de chaque côté de la chaussée ce qui explique le dédoublement des données à une même abscisse. Le faible nombre d'échantillons ne permettait pas un dédoublement du graphique par côté de chaussée. Ces valeurs sont données à titre indicatif. En effet, les prélèvements sont faits lors des travaux en tranchées. Lorsque la pelle creuse la tranchée, beaucoup de sol est remué et si on ne creuse pas un peu à la truelle, on ne prélève pas uniquement du sol de la fondation.

Les valeurs trouvées ici sont en concordance avec les mesures électriques réalisées. Une forte conductivité peut être expliquée par une forte teneur en eau et la présence d'argile.

## CHAPITRE 8 CORRÉLATIONS ET VÉRIFICATIONS

A partir des résultats obtenus en laboratoire, on effectue une corrélation par modélisation avec les mesures effectuées sur le terrain. On ne cherche pas ici à investiguer à nouveau le potentiel des méthodes radar et électrique pour la détection des défauts structuraux mais à analyser si notre calibration et notre protocole peut à terme permettre une quantification des levés sur chaussée. Les images des modélisations réalisées sont fournies dans l'Annexe 3 : Validation.

### 8.1 Matériaux et géométries

Dans les paragraphes qui suivent, on utilisera souvent les indexations suivantes (Tab 8-1):

Tableau 8-1: Tableau des annotations utilisées au chapitre 8.

Abréviation	Signification
$A_s$	Asphalte sèche
$A_h$	Asphalte humide
$B_s$	Béton sec
$B_h$	Béton humide
$F_s$	Fondation sèche
$F_h$	Fondation humide

Les valeurs des propriétés physiques utilisées dans les modélisations sont résumées dans le tableau 8-2. Les valeurs utilisées pour l'asphalte et le béton sont comprises dans les plages de valeurs obtenues lors des mesures. Les valeurs utilisées pour la fondation sont déterminées à partir d'un rapport interne d'auscultation d'une chaussée de Montréal en 2003 et d'un article sur la détermination des aquifères en milieux silteux (Nielsen, *et al.*, 2007). De plus les mesures réalisées avec la méthode électrique confirment l'ordre de grandeur choisi pour la résistivité de la fondation.

Tableau 8-2: Valeurs des propriétés diélectriques choisies pour les modélisations de validation.

	Conductivité (mS/m)		Résistivité ( $\Omega \cdot m$ )		Constante diélectrique (sans unité)	
	sec	humide	sec	humide	sec	humide
Asphalte	0.2	0.5	5000	2000	4	5
Béton	0.7	5	1500	200	5	9
Fondation	20	50	50	20	10	15

Les modélisations sont faites avec 4 modèles géométriques différents (fig. 8-1).

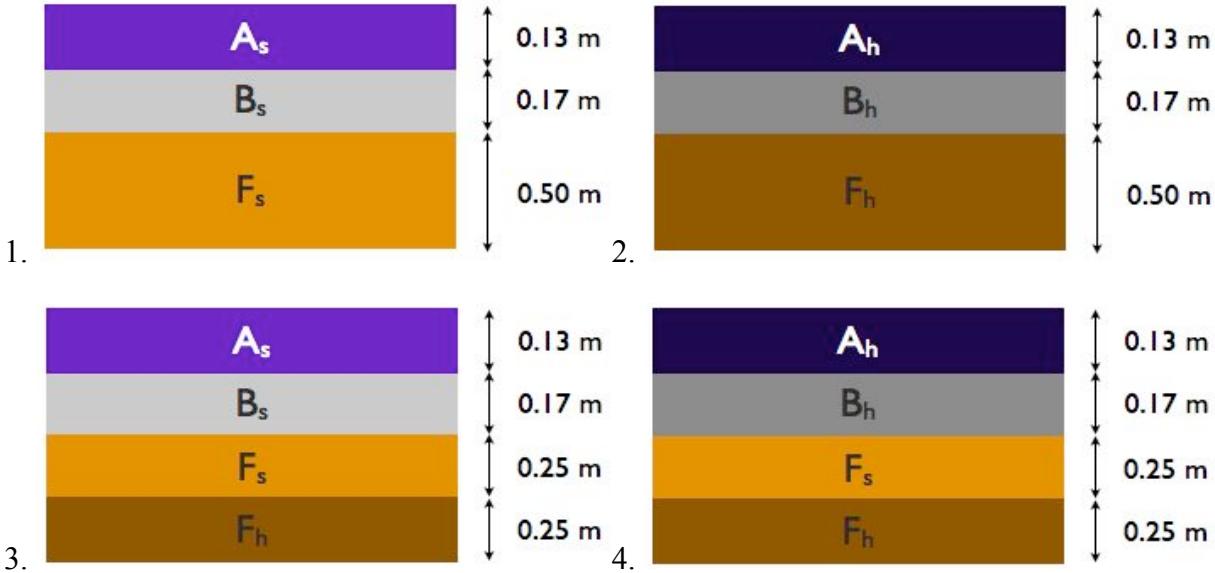


Figure 8-1: Modèles choisis pour les modélisations de validation.

Le tableau 8-3 suivant récapitule toutes les modélisations réalisées avec les différents modèles et les différentes configurations. On fera remarquer que l'on a ajouté des valeurs de fréquence à celles considérées tout au long du travail (tab. 8-3). En effet, pour effectuer une comparaison correcte entre les traces obtenues sur le terrain et les modélisations, il faut que le contenu fréquentiel soit similaire. L'usure des antennes utilisées ainsi que le couplage avec le sol agit sur le spectre fréquentiel des traces obtenues sur le terrain. On a donc adapté les modélisations aux nouvelles fréquences centrales (pour les antennes de 450 MHz, la fréquence est décalée à 550 MHz et pour les antennes de 900 MHz, la fréquence est décalée à 700 MHz). Par contre, on a tout de même considéré les modélisations à 450 MHz et 900 MHz dans le cas d'une antenne dont la bande de fréquence est correctement centrée. Ces modélisations sont celles présentées en annexe (Annexe 4).

Tableau 8-3: Configurations matérielles pour les modélisations de validation.

	Géométrie			
	1	2	3	4
GPR	Réflexion 450 MHz 550 MHz 900 MHz	Réflexion 450 MHz 550 MHz 900 MHz	WARR 450 MHz 900 MHz	WARR 450 MHz 900 MHz
électrique dipôle-dipôle	aligné écartement 0,1 m; 0,25m; 0,5 m.	aligné écartement 0,1 m; 0,25 m; 0,5 m.	aligné écartement 0,1 m; 0,25 m; 0,5m.	aligné écartement 0,1 m; 0,25 m; 0,5m.

## 8.2 Corrélation GPR

À partir des modélisations en réflexion pour les modèles 1 et 2, on compare les temps de retour de l'onde avec ceux obtenus sur les levés radar pour la partie de la chaussée asphalte et béton. Ceci consiste principalement à observer les traces entre 0 et 16 ns. Une première visualisation montre que les traces prélevées sur les levés terrain sont en concordance avec les modélisations (figures 8-2.1 et 8-3.1). Les réflexions des traces du terrain (trace b extraite de la ligne L1, trace c extraite de la ligne L2) sont comprises entre les réflexions de la modélisation « humide » (trace a) et de la modélisation « à sec » (trace d). Les observations faites sur ces traces valident nos mesures en laboratoire et prouvent la cohérence de notre méthodologie.

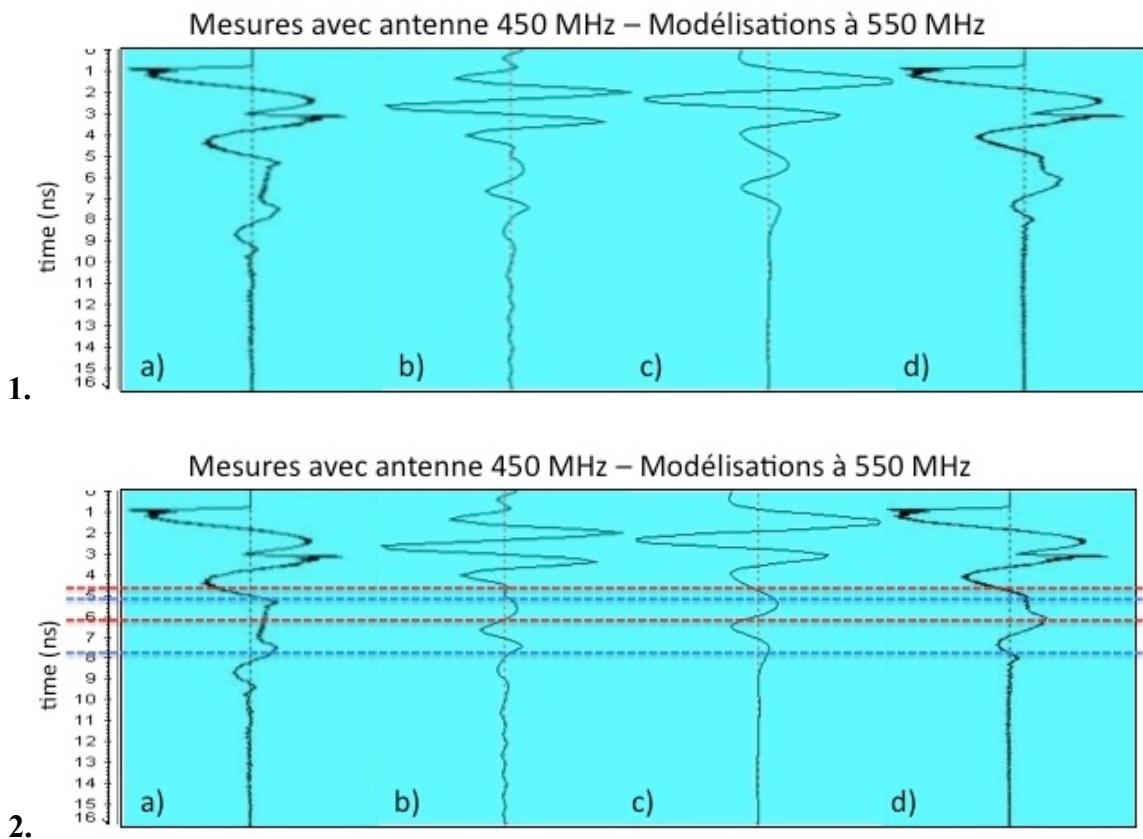


Figure 8-2: Comparaison des traces obtenues par modélisations à 550 MHz (a,d) et des traces de terrain (b,c) avec l'antenne 450MHz.

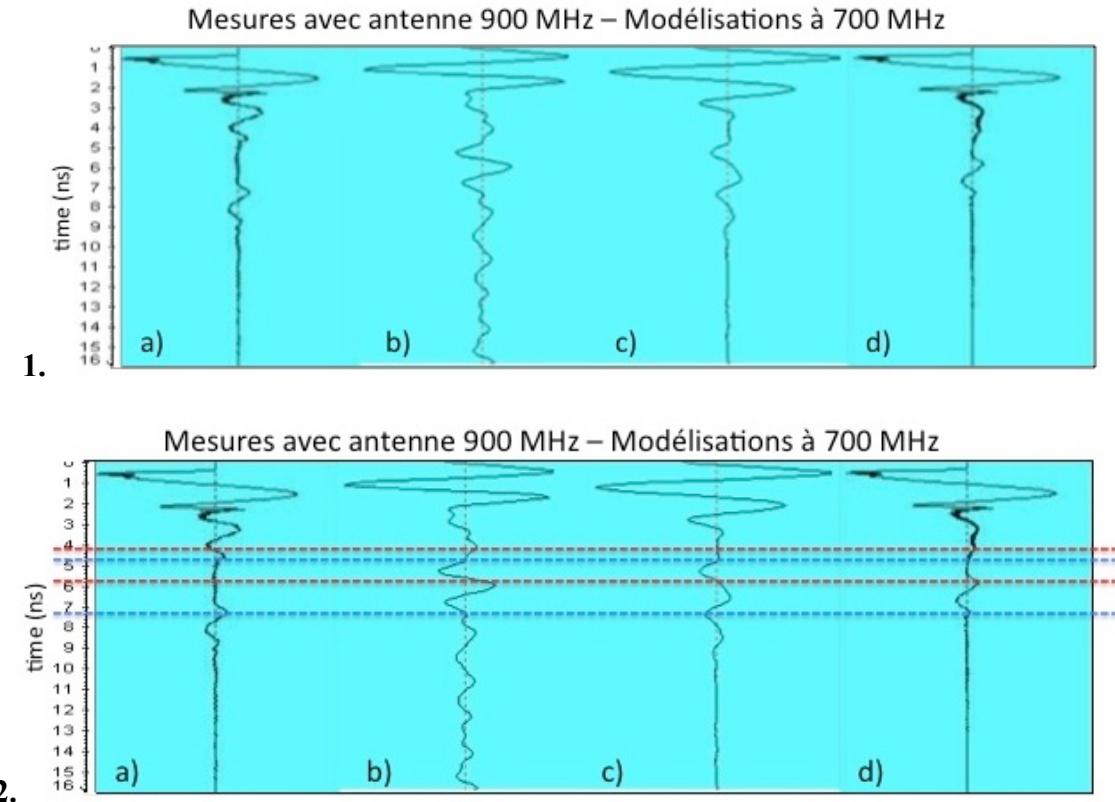


Figure 8-3: Comparaison des traces obtenues par modélisations à 700 MHz (a,d) et des traces de terrain (b,c) avec l'antenne 900MHz.

Les figures 8-2.2 et 8-3.2 montrent des lignes rouges et bleues à la hauteur des réflexions aux interfaces asphalte/béton et béton/fondation. Les lignes rouges pour les réflexions en condition « à sec » et les lignes bleues pour les réflexions en condition « humide ».

On peut toutefois faire quelques remarques d'objection :

- Il est assez difficile de pointer correctement le temps de réflexion exact sur une trace radar et ceci est une erreur très courante (Olhoeft, 1999). Les lignes rouges et bleues sur les figures 8-2.2 et 8-3.2 sont donc situées à titre indicatif.
- La présence de « pics de Dirac » sur les modélisations est due à un problème logiciel irrésolu. Cela n'interfère pas avec notre interprétation.

Par ailleurs les modélisations en WARR, montrent que les interfaces sont assez visibles sauf pour la configuration 3 où l'interface  $B_s/F_s$  n'est pas clairement définie.

### 8.3 Vérification électrique

La corrélation réalisée valide notre méthodologie toutefois elle ne concerne que les mesures radar. Bien que la méthode électrique n'ait pu être mise en place sur une chaussée mixte, on vérifie par modélisation la capacité à détecter les trois épaisseurs de la chaussée ainsi qu'une variation du profil de la teneur en eau dans la fondation à partir des valeurs de conductivités obtenues en laboratoire. Les résultats sont présentés dans l'Annexe 4.

Les modélisations inverses ont été réalisées avec de l'ajout de bruit (5%). On observe malgré cela une bonne correspondance. Tout comme pour le radar, les correspondances avec le modèle d'origine sont meilleures pour les configurations 2 et 4, la couche d'asphalte fortement résistive présentant un réel inconvénient pour cette méthode.

## CHAPITRE 9 RECOMMANDATIONS TECHNIQUES

Les études réalisées ici posent une base pour des travaux futurs en rassemblant la connaissance acquise par le laboratoire au cours des dernières années, en comparant avec la littérature et en situant le projet dans son contexte géotechnique. Néanmoins, elles présentent certaines failles et peuvent encore faire l'objet de nombreux travaux plus poussés.

### 9.1 Avis et réserves

La géophysique dans son ensemble présente 4 inconvénients majeurs :

- **Le calage des mesures** : il faut que l'on puisse caler les mesures réalisées sur une référence que l'on reconnaît comme vraie (valeur en forage, échantillonnage, documents de construction) sinon on reste dans l'hypothétique. C'est en partie un problème de calibration.
- **La non-unicité des résultats** : il existe plusieurs modèles possibles répondent à un même ensemble de mesures.
- **Le traitement des données** : on peut perdre de l'information voire la modifier suivant les paramètres utilisés lors de l'inversion ou du traitement des traces.
- **L'interprétation** : l'interprétation géotechnique des modèles radar et électrique obtenus n'est jamais unique et c'est un point important à prendre en compte.

Pour contre balancer ces inconvénients, dans le cas de notre étude, la géophysique présente les avantages suivants :

- La rapidité des mesures
- Le côté non-destructif
- Une profondeur de pénétration adaptée
- Une capacité de détection offrant des possibilités d'amélioration

Les méthodes électrique et radar de part leurs sensibilités respectives aux contrastes typiques des paramètres physiques, montrent à travers les modélisations une réelle adaptabilité à l'auscultation des chaussées. Les mesures terrain et les études en laboratoire appuient les résultats de la modélisation bien que des études en milieu contrôlé soient encore nécessaires. Le GPR est à l'heure actuelle plus développé que le CCR avec des auscultations réalisées par des industriels et des bureaux d'études spécialisés (exemple : Géophysique GPR Internationale au Canada). Le CCR est encore au stade de développement des applications. Le CORIM était vendu par IRIS instrument, il en reste peu d'exemplaires dans le monde; seul l'OhmMapper de Geometrics est commercialisé.

Par ailleurs, on peut faire les commentaires suivants sur l'étude réalisée :

- **L'étude de la teneur en eau** : On a tenté dans ce travail de considérer l'amélioration de la détection en pratique du profil de la teneur en eau dans la chaussée mais les circonstances de terrain ont fait que cette étude n'a pas été complétée et elle a été traitée uniquement à travers la modélisation.
- **Le développement informatique** : on remarque rapidement des problèmes d'imagerie, de traitement et d'interprétation. Ceci est dû au peu de logiciels capables de traiter correctement les informations. De plus, il n'y a pas à l'heure actuelle de logiciel d'interprétation conjointe électrique et radar.
- **Le manque d'étude d'influence des paramètres** : Bien que couvrant déjà largement le problème en plaçant le contexte, la modélisation ne couvre pas toutes les variations des paramètres et leur contribution aux réponses. On n'a pas encore mis en évidence les limites des techniques en terme de détectabilité (bien qu'on puisse les évaluer et que des travaux antérieurs en aient discuté), ainsi que la stabilité des inversions par l'ajout de bruit aléatoire dans la modélisation. Toutefois les mesures de terrain ainsi que les travaux en laboratoire permettent d'évaluer certains paramètres de calibration.

## 9.2 Proposition d'études complémentaires et réalisations pratiques

Ce travail de maîtrise ne présentant qu'une contribution à la recherche sur l'auscultation non-destructive des chaussées, on propose une poursuite d'études dans les axes de recherche suivants :

- **Etude du profil de la teneur en eau** : Évaluer les capacités du radar et de l'électrique à détecter le profil de la teneur en eau dans le cadre des chaussées mixtes devrait être le prochain axe d'étude du laboratoire sur ce projet. En particulier l'évaluation de l'atténuation radar et l'adaptation de l'électrique en fonction des variations (en terme de valeurs) de teneur en eau dans la fondation pourraient être d'excellentes contributions. Spécifiquement pour l'île de Montréal, la connaissance du niveau de saturation, la détection des lentilles de gel et leur influence sur la capacité portante de la chaussée avec ou sans dalle de béton pourraient être utilisés pour la maintenance et la gestion du trafic lors des périodes saisonnières de transition.
- **Finalisation des essais par modélisation numérique** : Les modélisations numériques doivent être poussées pour permettre de représenter de plus en plus finement la complexité de la chaussée. Elles restent dépendantes des logiciels utilisés et de leurs résolutions, on peut cependant avoir une première estimation de la sensibilité des méthodes aux différents paramètres et de leur importance. On peut songer à utiliser des modélisations par Eléments Finis (ex : Comsol) ou Différences Finies (ex : Spitzer) en 2D et 3D.
- **Tests en milieux contrôlés** : Les tests en milieux contrôlés et connus sont utiles pour certifier les résultats de la modélisation numérique et rendre compte des contraintes de matériel et liées à l'environnement d'étude non nécessairement modélisables (exemple : route instrumentée de l'université Laval dans le Parc des Laurentides).
- **Mesures dans des rues dont la structure est connue** : Essais de mesures en réflexion et WARR avec contrôle vertical de la teneur en eau. Dans le cas de tests en milieux contrôlés, on pourrait même envisager pouvoir lier les mesures WARR et CCR avec des mesures par sondes TDR (Transient Domain Reflectometry), par capteurs de pression ou des thermistors. Quelque soit la méthode choisie, il faut prendre en compte que les fondations de chaussées sont des milieux non-saturés.
- **Développement de l'imagerie de l'interprétation conjointe** : cette partie développement est une première étape dans l'amélioration des systèmes existants. Le développement d'un logiciel d'interprétation conjointe électrique et radar si possible adapté à l'étude des chaussées est une étape fortement recommandable pour l'exploitation

rapide des données de l'outil d'auscultation envisagé. Il existe déjà des logiciels semi-automatiques (Roadscanner) mais ils nécessitent une première calibration en fonction du milieu et fonctionnent principalement pour les chaussées souples.

- **Amélioration des systèmes existants et adaptabilité complète aux chaussées urbaines** : On a exposé précédemment la problématique des changements de propriétés physiques en fonctions des saisons. Le but final serait d'augmenter la répétabilité des mesures améliorer leur fiabilité en fonction de la variabilité des paramètres mesurés. Les améliorations possibles des systèmes sont discutées plus en détails au paragraphe suivant.

## 9.3 Recommandations techniques

### 9.3.1 Le système radar

**Un levé multifréquences** : La fréquence centrale de l'antenne utilisée entraîne une dispersion différente dans le sol soit une pénétration et une résolution différentes. Plus la fréquence est grande, meilleure est la résolution (latérale et verticale) et moins bonne est la pénétration. L'idéal serait d'avoir au moins 3 bandes de fréquence reparties entre 500MHz et 2GHz, d'après les systèmes existants. Dépendant du type d'antenne (ground-coupled ou air-coupled) les fréquences peuvent varier pour des résultats similaires.

**Des antennes réceptrices à différentes distances de l'antenne émettrice** : Pour pouvoir réaliser un levé WARR en même temps, l'idéal serait d'avoir plusieurs récepteurs espacés repartis sur un mètre derrière l'antenne. Si on tient compte de l'atténuation du signal lors des modélisations, 1 mètres serait une distance suffisante. Un des problèmes du WARR étant la nécessité d'un nombre suffisant de positions Tx-Rx. On peut aussi envisager le développement d'un système d'acquisition pour obtenir des mesures précises avec le moins de récepteur possibles. Des problèmes de résolution latérale seront induits par le déplacement du véhicule et nécessiteront d'être abordés.

**Un levé multicanaux** : Dans le cas de différentes fréquences émises, on peut songer à des antennes réceptrices multicanaux en fréquence. Le concept de multicanaux peut aussi être appliqué au niveau de la transmissions des données au système d'acquisition ce qui permettrait de faire les mesures en simultanées pour chaque récepteur.

**Un temps d'acquisition optimisé** : Pour une meilleure optimisation du système, en tenant compte des matériaux présents et en fonction du système utilisé (hauteur dans l'air), on peut optimiser le temps d'acquisition. On montre dans notre étude terrain qu'un temps d'acquisition supérieur à 30 ou 40 ns est probablement inutile.

### 9.3.2 Système electrostatique

**Augmenter les vitesses** : Les principaux problèmes actuels qui empêchent l'augmentation des vitesses d'utilisation d'un système electrostatique sont le contact moyen du tissu néoprène avec le sol et le temps d'acquisition des mesures. Le contact avec le sol peut être changé par des roues conductrices plutôt que des plaques de métal mais cela réduit la capacitance des électrodes (liée à la surface en contact). Le temps d'acquisition des mesures a une faible marge d'amélioration car il est principalement lié à la fréquence du signal injecté. Si la fréquence augmente trop, on sort de l'approximation electrostatique et on ne peut plus faire de l'interprétation de type électrique-résistif. Un système asservi par détection de rugosité et transporté à quelques millimètres du sol pourrait permettre de pallier à la fois au problème de la vitesse d'auscultation et celui de l'usure du système.

**Améliorer les espacements d'électrodes disponibles** : Pour le moment la plupart des systèmes ont des espacements entre 50 cm et 1 m. Dans l'idéal, il faudrait pouvoir descendre à des espacements de 20 à 25 cm et avoir une gamme d'espacements disponibles suffisamment grande pour pouvoir investiguer à la fois en profondeur sur 1 m à 1,5 m et obtenir une bonne résolution verticale.

**Système plus compact et moins fragile** : Dans le cas du CORIM, le système est exposé à l'air libre et s'étendait sur environ 5 mètres à l'arrière d'un véhicule. Cet impact au sol et cette vulnérabilité devraient chercher à être évités. Le même problème apparaît pour l'OhmMapper, bien que ce dernier soit plus robuste.

### 9.3.3 Périodes de levés et calibration

La partie laboratoire de ce projet met en évidence les variations des propriétés diélectriques et électriques des matériaux de la chaussée. En particulier, la dalle de béton montre des variations très déterminantes en fonction de la saturation avec une résistivité qui peut être multipliée par un facteur 10. Pour une optimisation des mesures de terrain, on recherche la période idéale pour les

auscultations. Les propriétés des matériaux considérés montrent la présence de plus forts contrastes lorsque tous les matériaux sont saturés. Cette période préférentielle serait située entre les mois de mars et mai à Montréal, lors de la fonte des glaces. Malheureusement c'est aussi une période où toutes les variations sont accélérées. La figure 9-1 montre les variations de la teneur en eau volumique dans une fondation de chaussée, les variations du front de gel et les damages induits en fonction de la saison. De nombreuses déformations apparaissent lors de la fonte des glaces au printemps et les propriétés physiques changent brutalement. Il y a donc de grands risques que les mesures à cette période de l'année ne soient pas répétitives à quelques jours d'intervalle. Toutefois si la stabilité des systèmes est augmentée et si la calibration est correctement réalisée on peut penser pouvoir contrer ces effets. On peut aussi penser décaler la période d'auscultation juste après la stabilisation des différents paramètres (début de l'été d'après la figure 9-1) pour conserver des contrastes admissibles mais avec une plus grande répétabilité des mesures sur la période choisie.

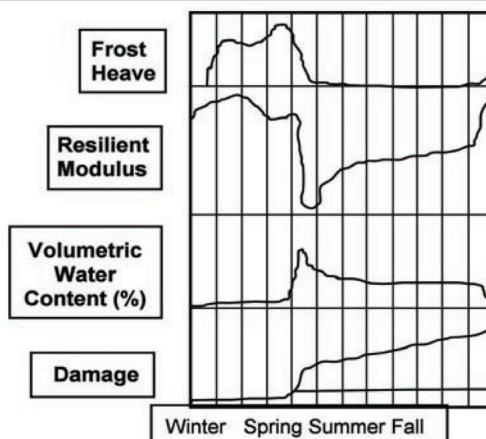


Figure 9-1: Variations saisonnières de certaines caractéristiques (D'après Kestler, 2003; modifié par Saarenketo, 2006).

## CONCLUSION

Ce projet de maîtrise s'inscrit dans la continuité des travaux du Laboratoire de Géophysique Appliquée de l'École Polytechnique de Montréal. Alors que les travaux précédents étaient soit des mesures géophysiques de terrain soit des travaux de modélisation, cette étude réalise d'un bout à l'autre tout le processus d'évaluation de l'influence de différents paramètres sur la calibration autant au niveau matériel de mesure qu'au niveau des propriétés des matériaux. La partie modélisation réalisée en premier lieu a permis de montrer que la résolution de l'électrique n'est pas très grande par rapport aux phénomènes qu'on souhaite observer mais qu'en contre partie celle du radar est suffisante. Cependant, le radar en réflexion seul donne principalement la localisation d'un défaut et dans quelle couche de la chaussée il se situe mais il ne peut pas fournir d'indications quant aux épaisseurs exactes de la chaussée. Néanmoins, s'il existe un point de référence où les données sont connues, on peut situer précisément le défaut. L'étude terrain réalisée suite à la modélisation montre que, pour les fréquences employées, le GPR donnent des résultats cohérents (observation des interfaces attendus et des défauts connus). Bien que réalisées après réhabilitation de la chaussée en chaussée souple, les mesures électriques en courant continu donnent une estimation des propriétés électriques de la nouvelle fondation et du sol encastrant. La récupération des échantillons et leur étude en laboratoire fournissent des fourchettes de valeurs dans lesquels les propriétés des matériaux considérés sont susceptibles de se trouver au cours d'un cycle annuel. Les corrélations entre la littérature et les levés terrain montrent une bonne concordance. La dernière validation des résultats est faite lors de la modélisation avec les valeurs obtenues expérimentalement. La correspondance est excellente, compte tenu des systèmes utilisés.

Ces derniers résultats ouvrent la porte sur de futures études possibles. Tout d'abord, la reprise des travaux de terrain mais cette fois-ci en milieu contrôlé. Les résultats de ce mémoire pourraient éclairer l'interprétation d'une étude complète GPR et CCR sur un milieu connu. Probablement qu'une analyse quantitative serait réalisable à ce stade. Cette hypothèse ouvre ensuite la voie au développement de l'analyse et l'interprétation conjointe et semi-automatique. D'autre part, en considérant une réelle analyse conjointe, on peut s'intéresser à l'auto-calibration des appareils,

c'est à dire une calibration via les mesures géophysiques et non via des informations externes (exemple : forage).

L'étude de la teneur en eau n'ayant pas pu être faite de façon approfondie, on propose des levés supplémentaires à travers l'instrumentation d'un site avec des capteurs de pression (suction), des thermistors, des sondes TDR, etc... On pourrait aussi envisager une étude de terrain sur un cycle annuel. Ceci permettrait une bonne analyse de la variabilité des propriétés physiques des matériaux et surtout montrerait de façon très significative la réalité du terrain sur une année. Suite à toutes ces études, on pourra dans un futur à moyen et long terme développer une méthode d'auscultation et un système à grande échelle.

L'auscultation des chaussées ou des ouvrages de génie civil par méthodes non destructives n'est pas un sujet nouveau mais il est toujours d'actualité. D'une façon générale, on souhaite progressivement passer au « zéro destruction » dans le domaine de l'auscultation. Cependant bien que de nombreux travaux présentent des études de cas ou des développements d'appareil, la communauté scientifique ne possède pas d'avis universel sur le sujet. Le travail présenté ici comporte un certain nombre de pistes inachevées. On peut clairement y voir un travail d'apprentissage autant au niveau de la méthodologie de recherche que dans le domaine du projet. On ne prétend pas avec ce mémoire apporter une avancée déterminante dans le domaine mais au moins ajouter une expérience technique supplémentaire au laboratoire et des données supplémentaires concernant les propriétés physiques.

L'auscultation des chaussées est un sujet complexe de par le très grand nombre de défauts existants et de par la grande plage de valeurs que peuvent prendre les propriétés physiques des matériaux utilisés. Cette grande variété rend la géophysique à la fois plus difficile à mettre en œuvre mais aussi à la fois plus apte à réaliser cette tache qui demande par là même, une grande adaptabilité. De plus, la géophysique est une des rares méthodes d'auscultation non destructive ayant le potentiel de fournir des informations en profondeur. Toutefois, comme on l'a vu au cours de cette étude, sa compréhension et son analyse ne sont pas particulièrement évidentes encore moins dans des cas réels. Les méthodes électrique et radar ont le potentiel pour devenir des méthodes efficaces et fiables d'auscultation des chaussées. Cependant, elles ont encore besoin d'un développement considérable surtout concernant l'électrique.

En terme de perspective de développement technologique plus poussé des systèmes, une analyse coût-avantage pourrait être envisageable et bienvenue à ce stade de l'étude avec une évaluation du coût économique et social. La comparaison entre le budget nécessaire à une auscultation par méthodes continues et une auscultation par méthodes géomécaniques et destructives ainsi que le rapport qualité/prix de chacune pourrait aussi permettre une prise de décision. A long terme, il faudrait par ailleurs considérer la formation du personnel à la compréhension de tels systèmes et de leurs données ou bien le simplifier au maximum pour une facilité d'utilisation (traitement des données pré-calibrés, interprétation automatisée, système expert).

L'arrivée de nouveaux outils, coupant avec l'ancienne école des réparations et de l'auscultation de la voirie, entraîne, en plus de son développement technologique abordé dans cette étude, une problématique d'ordre socio-économique. Bien que le côté environnemental d'études non destructives apparaît comme évident, est-ce que les municipalités et les institutions gestionnaires d'infrastructures urbaines sont prêtes à investir dans ce type de recherche, à partir de quand et à quel point ? Il est probable que la réponse à cette question nous parvienne dans les prochaines années via les investissements dans les projets de génie civil et d'aménagement qui ont été faits pour contrer la récente crise économique ou via le leadership des manufacturiers de géoradar et d'électrique (Mala, Sensors&Software, ABEM, Iris Instrument) qui trouveraient ici un marché à très grande échelle.

## BIBLIOGRAPHIE

- Ai, Y., Du, C., & Ju, F. (2008). Concrete crack measurement by electrical resistivity. *Dongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 38(2), 289-292.
- Annan, A. P. (2001). *Ground Penetrating Radar Workshop Notes*.
- Archie, G. E. (1941). *Electrical resistivity log as aid in determining some reservoir characteristics*, New York, NY, United States.
- ASTM. D2216-05: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.
- Bazlamit, S. M., & Reza, F. (2005). Changes in Asphalt Pavement Friction Components and Adjustment of Skid Number for Temperature. *Journal of Transportation Engineering*, 131(6), 470-476.
- Benderitter, Y., Jolivet, A., Mounir, A., & Tabbagh, A. (1994). Application of the electrostatic quadripole to sounding in the hectometric depth range. *Journal of Applied Geophysics*, 31(1-4), 1-6.
- Benedetto, A. (2007). *Prediction of structural damages of road pavement using GPR*. Paper presented at the 4th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, IWAGPR 2007, June 27, 2007 - June 29, 2007, Naples, Italy.
- Benedetto, A., & Pensa, S. (2007). Indirect diagnosis of pavement structural damages using surface GPR reflection techniques. *Journal of Applied Geophysics*, 62(2), 107-123.
- Binley, A., Winship, P., West, L. J., Pokar, M., & Middleton, R. (2002). Seasonal variation of moisture content in unsaturated sandstone inferred from borehole radar and resistivity profiles. *Journal of Hydrology*, 267(3-4), 160-172.
- Breysse, D., Klysz, G., Derobert, X., Sirieix, C., & Lataste, J. F. (2008). How to combine several non-destructive techniques for a better assessment of concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 38(6), 783-793.
- Burger, H. R., Sheehan, A. F., & Jones, C. H. (1992). *Introduction to Applied Geophysics: exploring the shallow subsurface*. New York: W.W. Norton & Compagny.
- Cassidy, N. J. (2009). Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids. In Elsevier (Ed.), *Ground Penetrating Radar: theory and applications*. Amsterdam.
- Cedergren, H. R. (1988). Why all important pavements should be well drained. *Transportation Research Record*(1188), 56-62.
- Cedergren, H. R., & Godfrey Jr, K. A. (1974). WATER: KEY CAUSE OF PAVEMENT FAILURE? *Civil Engineering (New York)*, 44(9), 78-82.
- Choubane, B., Fernando, E., Ross, S. C., & Dietrich, B. T. (2003). *Use of Ground Penetrating Radar for Asphalt Thickness Determination*. Paper presented at the PROCEEDINGS OF SPIE SPIE - The International Society for Optical Engineering: Testing, Reliability, and Application of Micro- and Nano-Material Systems, March 3, 2003 - March 5, 2003, San Diego, CA, United states.

- Chouteau, M. (2008). *Auscultation non-destructive des chaussées mixtes: identification des défauts*. Paper presented at the ACI Boucherville.
- Chouteau, M. (2009). personnel communication.
- Chouteau, M., & Beaulieu, S. (2002). *An investigation on application of the electrical resistivity tomography method to concrete structures*. Paper presented at the Geophysics, April 15-19, Los Angeles, CA.
- Chouteau, M., Beaulieu, S., Rucareanu, M., & Leblanc, J. M. (2000). *Développement et validation de la tomographie électrique comme méthode d'évaluation non-destructive de l'état du béton: Application au Viaduc de Dikson*: GPR international, École Polytechnique.
- Chouteau, M., Camerlynck, C., & Kaouane, C. (2009, 24-27 May). *Joint application of GPR and electrostatic resistivity to assess mixed pavement condition*. Paper presented at the AGU Joint Assembly, Toronto, Canada.
- Chouteau, M., Vallières, S., & Toe, E. (2003, September 16-19). *A multi-dipôle mobile array for the non-destructive evaluation of pavement and concrete infrastructures: a feasibility study*. Paper presented at the Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Berlin, Germany.
- COMSOL. (2009). Multiphysics Modeling and Simulation Software - COMSOL. from <http://www.comsol.com/>
- Cuviller, M., Boaddard, J. F., & Retour, P. (1987). *New methods developed in France for road network survey and maintenance*. Paper presented at the Proc. 6th Conf. Struct. Des. of Asphalt Pavements.
- De Pascale, G. P., Pollard, W. H., & Williams, K. K. (2008). Geophysical mapping of ground ice using a combination of capacitive coupled resistivity and ground-penetrating radar, Northwest Territories, Canada. *J. Geophys. Res.*, 113(F2), F02S90.
- Derobert, X., Iaquinta, J., Klysz, G., & Balayssac, J.-P. (2008). Use of capacitive and GPR techniques for the non-destructive evaluation of cover concrete. *NDT and E International*, 41(1), 44-52.
- Evans, R., Frost, M., Stonecliffe-Jones, M., & Dixon, N. (2006). Ground-penetrating radar investigations for urban roads. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Municipal Engineer*, 159, 105-111.
- Evans, R., Frost, M., Stonecliffe-Jones, M., & Dixon, N. (2007). Assessment of in situ dielectric constant of pavement materials. *Transportation Research Record*, 128-135.
- Fauchard, C., Derobert, X., Cariou, J., & Cote, P. (2003). GPR performances for thickness calibration on road test sites. *NDT and E International*, 36(2), 67-75.
- Fauchard, C., Derobert, X., & Cote, P. (2000). *GPR performances on a road test site*, Goldcoast, Aust.
- Fechant, C., Buis, J.-P., & Tabbagh, A. (1999). In situ measurement of medium-frequency apparent permittivity using an electrostatic quadrupole. Application to the determination of the water content of wheat. *Measurement Science & Technology*, 10(3), 174-181.

- Filali, B., Boone, F., Rhazi, J., & Ballivy, G. (2008). Design and calibration of a large open-ended coaxial probe for the measurement of the dielectric properties of concrete. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 56, 2322-2328.
- Filali, B., Rhazi, J. E., & Ballivy, G. (2006). Measurement of the dielectric properties of concrete by a broad open ended coaxial probe. *Canadian Journal of Physics*, 84(Copyright 2007, The Institution of Engineering and Technology), 365-379.
- Forest, R., & Utsi, V. (2004). *Non destructive crack depth measurements with ground penetrating radar*. Paper presented at the Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, 21-24 June 2004, Delft, Netherlands.
- Geraads, S., Jolivet, A., Mounir, A., & Tabbagh, A. (1992). Electrostatic quadrupole: a new tool for preliminary surveys to trenchless digging. In J. P. H. a. M. Mermet (Ed.), *No trenches in town*. Balkema, Rotterdam.
- Giannopoulos, A. (2005). GPRMax2D/3D: <http://www.gprmax.org/>.
- Grote, K., Hubbard, S., & Rubin, Y. (2002). GPR monitoring of volumetric water content in soils applied to highway construction and maintenance. *Leading Edge (Tulsa, OK)*, 21(5), 482-485.
- Halabe, U. B., Chen, H. L., Bhandarkar, V., & Sami, Z. (1996). Laboratory radar evaluation of concrete decks and pavements with and without asphalt overlay. In P. E. Harbrower, Stolarski, P.J. (Ed.), *Structural Materials Technology: An NDT Conference* (pp. 373-377).
- Huisman, J. A., Hubbard, S. S., Redman, J. D., & Annan, A. P. (2003). Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Review. *Vadose Zone Journal*, 2, 476-491.
- Jaselskis, E. J., Grigas, J., & Brilingas, A. (2003). Dielectric properties of asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15, 427-434.
- Kean, W. F., Waller, M. J., & Layson, H. R. (1987). MONITORING MOISTURE MIGRATION IN THE VADOSE ZONE WITH RESISTIVITY. *Ground Water*, 25(5), 562-571.
- Kestler, M. A. (2003). Techniques for Extending the Life of Low Volume Roads in Seasonal Frost Areas. *Transportation Research Record*, 2, 275-284.
- King, R. W. P., & Smith, G. S. (1981). *Antennas in matter : fundamentals, theory, and applications*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Kuras, O. (2002). *The capacitive resistivity technique for electrical imaging of the shallow subsurface*. Unpublished PhD thesis, University of Nottingham.
- Lataste, J. F., Breysse, D., Sirieix, C., Frappa, M., & Bournazel, J.-P. (2003a). Inspection of cracking of reinforced concrete structures by electrical resistivity measurement - Fissuration des ouvrages en beton arme auscultation par mesure de resistivite electrique. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussees*(239).
- Lataste, J. F., Sirieix, C., Breysse, D., & Frappa, M. (2003b). Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering. *NDT and E International*, 36(6), 383-394.

- Laurens, S., Balayssac, J. P., Rhazi, J., Klysz, G., & Arliguie, G. (2005). Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: experimental study and direct modeling. *Materials and Structures*, 38, 827-832.
- Lenngren, C., Bergstrom, J., & Ersson, B. (2000). *Using ground penetrating radar for assessing highway pavement thickness*. Paper presented at the Subsurface Sensing Technologies and Applications II, July 31, 2000 - August 3, 2000, San Diego, CA, USA.
- Loizos, A., & Plati, C. (2007). Ground penetrating radar as an engineering diagnostic tool for foamed asphalt treated pavement layers. *International Journal of Pavement Engineering*, 8(2), 147-155.
- Loke, M. H. (2002). RES2DMOD: Rapid 2D resistivity forward modeling using the finite difference and finite-element methods (Version 3.01). Malaysia: GEOTOMO SOFTWARE.
- Loke, M. H. (2007). RES2DINV:Rapid 2D Resistivity & IP inversion using the least-squares method (Version 3.56): GEOTOMO SOFTWARE.
- Loulizi, A., Al-Qadi, I. L., & Lahouar, S. (2003). Optimization of Ground-Penetrating Radar to Predict Layer Thicknesses in Flexible Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 129(1), 93-99.
- Malhotra, V. M., & Carino, N. J. (1991). *Handbook on Non Destructive Testing of Concrete*. Boca Raton: CRC Press.
- Metwaly, M. (2007). Detection of metallic and plastic landmines using the GPR and 2-D resistivity techniques. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7(6), 755-763.
- Michot, D., Benderitter, Y., Dorigny, A., Nicoullaud, B., King, D., & Tabbagh, A. (2003). Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resources Research*, 39(5), SBH141-SBH1420.
- Ministère des Transports du Québec, M. T. Q. (1997). *Manuel d'identification des dégradations des chaussées en béton de ciment*. Québec.
- Ministère des Transports du Québec, M. T. Q. (2007). *Guide de mesure et d'identification des dégradations des chaussées souples*. Québec.
- MTQ. (1997). *Manuel d'identification des dégradations des chaussées en béton de ciment*. Québec, QC: Gouvernement du Québec.
- MTQ. (2007). *Rigid Pavement Maintenance and Rehabilitation Guide*. Québec, QC: Gouvernement du Québec.
- MTQ. (2008). Bilan de l'état des chaussées du réseau supérieur québécois. Québec, QC.
- Neville, A. M. (1998). *Properties of concrete* (Fourth ed.). Edinburgh: Longman.
- Nielsen, L., Jørgensen, N. O., & Gelting, P. (2007). Mapping of the freshwater lens in a coastal aquifer on the Keta Barrier (Ghana) by transient electromagnetic soundings. [doi: DOI: 10.1016/j.jappgeo.2006.07.002]. *Journal of Applied Geophysics*, 62(1), 1-15.
- Olhoeft, G. R. (1999). *Ground-penetrating radar: use and misuse*, Denver, CO, USA.

- Pellerin, L. (2002). Applications Of Electrical And Electromagnetic Methods For Environmental And Geotechnical Investigations. [10.1023/A:1015044200567]. *Surveys in Geophysics*, 23(2), 101-132.
- Porsani, J. L., Sauck, W. A., & Junior, A. O. S. (2006). GPR for mapping fractures and as a guide for the extraction of ornamental granite from a quarry: A case study from southern Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, 58(3), 177-187.
- Reynolds, J. M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Ridgeway, H. H. (1982). PAVEMENT SUBSURFACE DRAINAGE SYSTEMS. *National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice*.
- Robert, A. (1998). Dielectric permittivity of concrete between 50 Mhz and 1 GHz and GPR measurements for building materials evaluation. *Journal of Applied Geophysics*, 40, 89-94.
- Saarenketo, T. (2006). *Electrical properties of road materials and subgrade soils ans the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys*. University of Oulu, Oulu.
- Saarenketo, T. (2009). NDT Treansportation. In Elsevier (Ed.), *Ground Penetrating Radar: theory and applications*. Amsterdam.
- Saarenketo, T. (2010). Measuring electromagnetic properties of asphalt for pavement quality control and defect mapping. Retrieved May, 2010, from [http://vgwww.vegagerdin.is/nvf33.nsf/0/6423655ed26a5bd400256de90031ecaf/\\$FILE/Asphalt\\_electromagnetics\\_TimoS\\_030603.pdf](http://vgwww.vegagerdin.is/nvf33.nsf/0/6423655ed26a5bd400256de90031ecaf/$FILE/Asphalt_electromagnetics_TimoS_030603.pdf)
- Saarenketo, T., & Scullion, T. (2000). *Road evaluation with ground penetrating radar*, Lawrence, KS, USA.
- Samouelian, A., Cousin, I., Richard, G., Tabbagh, A., & Bruand, A. (2003). Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale. *Soil Science Society of America Journal*, 67(5), 1319-1326.
- Samouelian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., & Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science: A review. *Soil and Tillage Research*, 83(2), 173-193.
- Sandmeier, K. J. (2009). REFLEXW: for processing of seismic, acoustic pr electromagnetic reflection, refractionand transmission data (Version 5.0).
- Sbartaï, Z. M., Laurens, S., Rhazi, J., Balayssac, J. P., & Arliguie, G. (2007). Using radar direct wave for concrete condition assessment: Correlation with electrical resistivity. [doi: DOI: 10.1016/j.jappgeo.2007.02.003]. *Journal of Applied Geophysics*, 62(4), 361-374.
- Scullion, T., & Saarenketo, T. (1997). Using Suction and Dielectric Measurements as Performance Indicators for Aggregate Base Materials. [10.3141/1577-05]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1577(-1), 37-44.
- Scullion, T., & Saarenketo, T. (1999). Integrating ground penetrating radar and falling weight deflectometer technologies in pavement evaluation. *ASTM Special Technical Publication*(1375), 23-37.

- Sener, J. C., Smith, R. M., Garz, M. D., Murgel, G. A., Hamilton, R. W., & Haws, D. R. (1998). *Pavement thickness evaluation by GPR survey in Idaho*. Paper presented at the Structural Materials Technology III, March 31, 1998 - April 3, 1998, San Antonio, TX, United states.
- Shang, J. Q., Umana, J. A., Bartlett, F. M., & Rossiter, J. R. (1999). Measurement of complex permittivity of asphalt pavement materials. *Journal of Transportation Engineering*, 125(4), 347-356.
- Shao-peng, W., Lian-tong, M., Zhong-he, S., Dong-xing, X., Yong-jie, X., & Wen-feng, Y. (2002). An improvement in electrical properties of asphalt concrete. [10.1007/BF02838422]. *Journal of Wuhan University of Technology--Materials Science Edition*, 17(4), 69-72.
- Sonyok, D. R., & Zhang, J. (2008). *Ground penetration radar as a tool for pavement condition diagnostics*. Paper presented at the GeoCongress 2008: Geosustainability and Geohazard Mitigation, March 9, 2008 - March 12, 2008, New Orleans, LA, United states.
- Sorensen, K. I. (1996). Pulled array continuous electrical profiling. *First Break*, 14, 85-90.
- Soutsos, M. N., Bungey, J. H., Millard, S. G., Shaw, M. R., & Patterson, A. (2001). Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing. [doi: DOI: 10.1016/S0963-8695(01)00009-3]. *NDT & E International*, 34(6), 419-425.
- Tabbagh, A., Hesse, A., & Grard, R. (1993). Determination of electrical properties of the ground at shallow depth with an electrostatic quadrupole: Field trials on archeological sites. *Geophysical Prospecting*, 41(5), 579-597.
- Tabbagh, J., Samouelian, A., Tabbagh, A., & Cousin, I. (2007). Numerical modelling of direct current electrical resistivity for the characterisation of cracks in soils. *Journal of Applied Geophysics*, 62(4), 313-323.
- Telford, W. M. (1990). *Applied Geophysics* (2nde ed.). Cambridge (England): Cambridge University Press.
- Timofeev, V. M. (1973). *The employment of capacitively-coupled sensors in engineering and geological studies (in Russian)*. Unpublished Ph.D., University of Moscow.
- Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, 16(3), 574-582.
- Toshioka, T., Tsuchida, T., & Sasahara, K. (1995). Application of GPR to detecting and mapping cracks in rock slopes. *Journal of Applied Geophysics*, 33(1-3), 119-124.
- Van Overmeeren, R. A., Sariowan, S. V., & Gehrels, J. C. (1997). Ground penetrating radar for determining volumetric soil water content; results of comparative measurements at two test sites. *Journal of Hydrology*, 197(1-4), 316-338.
- Wainstein, P. A., Wan Bun Tseung, J.-M., Moorman, B. J., & Stevens, C. W. (2008). Integrating GPR and CCRI techniques: Implications for the identification and mapping of ground ice on Mars. (Publication no. 10.1555/mars.2008.0001).

## ANNEXE 1 – Modélisation

### A.INFORMATIONS PRÉLIMINAIRES

On réalise des modélisations de défauts structuraux avec une géométrie simplifiée. Pour rester proche de la réalité et pour permettre une comparaison et une approche conjointe entre l'électrique et le radar, on utilise au début des dimensions de base identiques ou similaires pour les deux méthodes. La modélisation électrique se réalisant par blocs, on est limité en taille de défaut minimale à la taille d'un bloc.

#### 1/Paramètres de la modélisation électriques

##### Configurations:

*dipôle-dipôle alignés :*

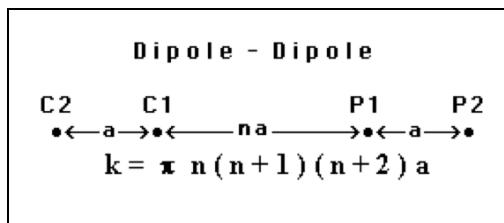


Figure A.1.1. Configuration dipôle-dipôle alignés. Source : Manuel d'utilisation Res2DMod.

*dipôle-dipôle équatorial :*

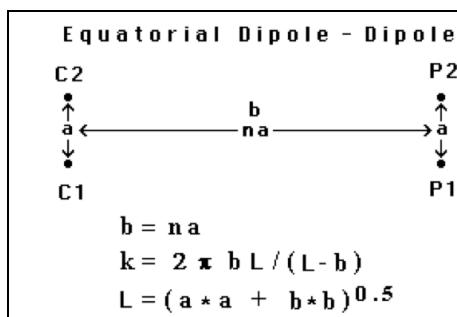


Figure A.1.2. Configuration dipôle-dipôle équatorial. Source : Manuel d'utilisation Res2DMod.

On considère pour les 2 configurations :

- C1 C2, électrodes de courants.
- P1 P2 électrodes de mesures.
- Longueur totale du dispositif 5m.
- n varie de 1 à 10.
- a=25cm (l'espacement entre les électrodes).

On souhaite investiguer la route sur une profondeur de 60cm au moins. Considérant que la profondeur totale d'investigation est d'environ 20% de la longueur totale du dispositif alors une longueur totale de 5m donne une marge acceptable.

La largeur d'un défaut est limitée par la largeur d'un bloc. Ici la largeur minimale est donc 25cm/4, soit 6.25 cm car Res2DMod permet 2 ou 4 blocs entre chaque électrode.

Le modèle électrique est le même quelque soit la configuration.

#### Principe de la modélisation d'une pseudo section de résistivité apparente :

Lors de mesures, chaque écartement correspond à une profondeur de mesure. Une même profondeur correspond à des écartements constants. La plupart du temps, l'écartement est multiple de 'a' par un entier. C'est le cas dans Res2DMod.

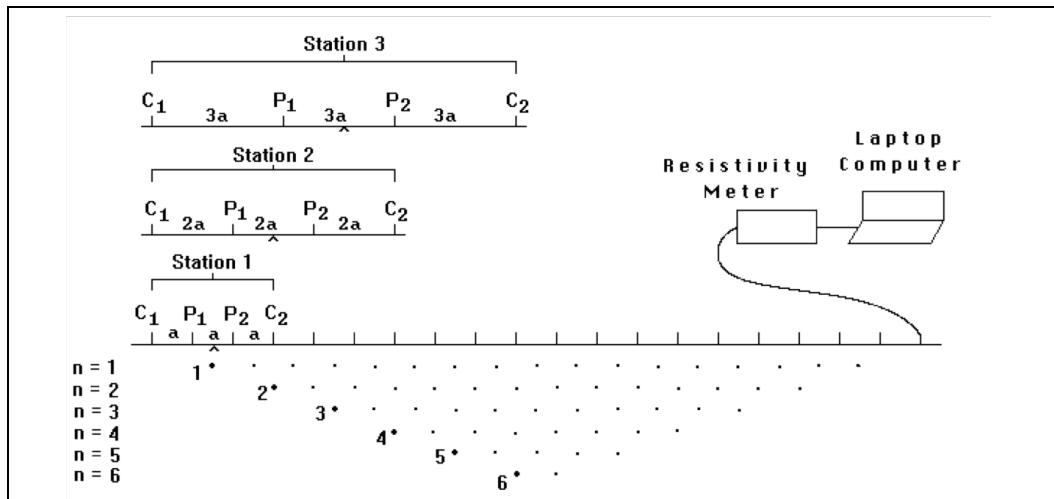


Figure A.1.3. Principe de relevé de mesure de résistivité apparente en fonction de l'écartement des électrodes. Source : Manuel d'utilisation Res2DInv.

Une fois les mesures faites sur le modèle proposé, le logiciel associe des blocs à ces mesures et définit un modèle par bloc comme le montre la figure ci-dessous.

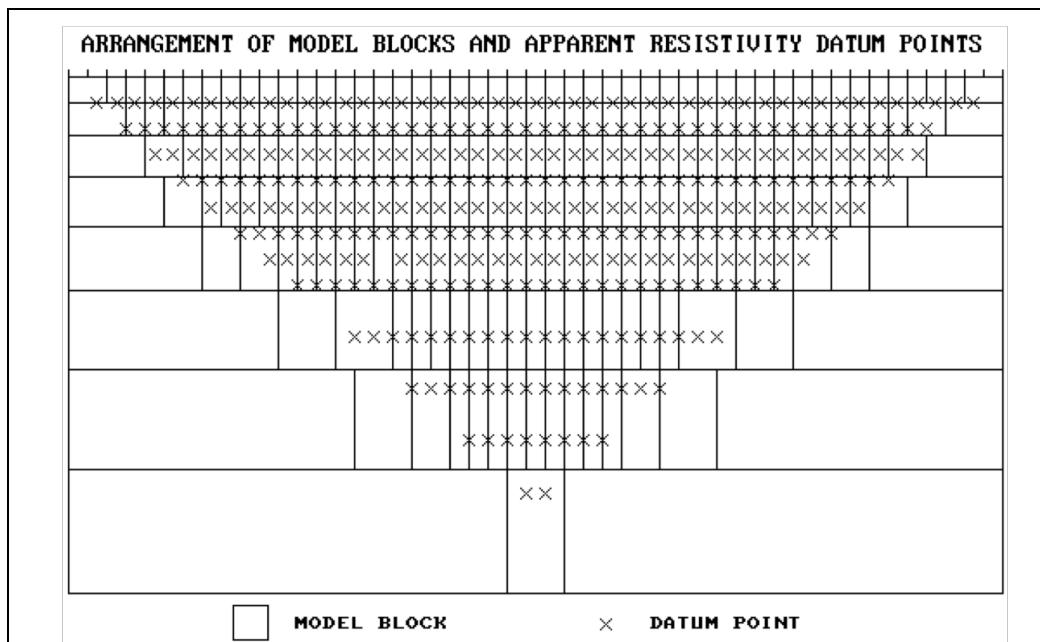


Figure A.1.4. Création du modèle par bloc à partir des mesures de résistivité apparente. Source : Manuel d'utilisation Res2DInv.

## **2/Traitement des modélisations électriques**

Les résultats obtenus avec Res2DMod sont inversés sous Res2DInv avec pour permettre une analyse du modèle obtenu avec des « résistivités vraies» (contrairement aux résistivités apparentes qui sont des résistivités mesurées, toutes les couches du sol étant prises en compte).

On effectue une inversion sans traitement particulier (pas d'application de filtres, ou de contraintes de résistivité).

Les 2 configurations sont inversées de la même façon.

## **3/Paramètres de la modélisation radar**

- On considère un transmetteur et un récepteur situés à 10cm au dessus du sol
- Le transmetteur et l'émetteur sont séparés de 15cm lorsqu'on mesure en réflexion.
- On considère 3 fréquences possibles : 800MHz, 1GHz, 1.5GHz
- l'onde initiale est sinusoïdale et identique pour toutes les modélisations.
- On considère une configuration pour les défauts structuraux (réflexion) et 2 pour l'évaluation de la teneur en eau (réflexion et WARR)
- temps d'acquisition de 16ns par traces.

Pour certaines modélisations, le modèle fait 4mètres de long pour observer l'extension latérale des défauts, par la suite, on utilise des modèles de 1m de longueur dans une optique d'économie temporelle (15 heures de calculs pour un modèle de 4 mètres contre 40 minutes pour un modèle de 1 mètre)

## **4/Traitement des données radar**

- Approche qualitative plus que quantitative : on observe des variations plus que des valeurs.
- pas de protocole spécifique de traitement des données (non nécessairement proportionnalité des amplitudes entre différents traitements).
- Observation des traces pour observer les effets de la fréquence.

- Application de différents filtres lors du traitement pour mettre en évidence les anomalies.  
On utilise principalement :
  - move starttime : on décale le début de l'image pour ne pas voir le « common – offset ».
  - gain : On applique du gain. On multiplie l'amplitude par une fonction ce qui permet d'amplifier les réflexions et les diffractions atténuées, entre autres, par la profondeur. Il existe différent type de gains : constantes, automatique, fonction...
  - contraste : Augmente le contraste entre les couleurs associées aux différentes amplitudes (pas de modifications ni de calculs sur la trace, juste une fonctionnalité d'imagerie).
  - background removal : Le logiciel réalise une moyenne pondérée par le nombre de traces et la soustrait pour chaque trace. Comme cela, il élimine les motifs constants pour permettre de mieux voir les anomalies mais à utiliser avec recul. On observe souvent l'image sans background et avec background en même temps pour éviter une interprétation biaisée par le traitement.
- Analyse des vitesses évaluées avec les hyperboles de réflexion : une hyperbole est l'anomalie observée lors de la réflexion sur un artefact réflecteur de grandeur limitée (présence d'air, cavité, variation de milieu localisé, contact géologique). Le logiciel ReflexW calcule automatiquement la vitesse associée à cette hyperbole.

## **5/Protocole type (soumis à modification selon les cas)**

Pour chaque défaut, on réalise l'analyse suivante :

- 1) modélisation en dipôle-dipôle aligné.
- 2) Inversion de la pseudo section modélisée dipôle-dipôle aligné.
- 3) modélisation en dipôle-dipôle équatorial.
- 4) Inversion de la pseudo-section modélisée en dipôle-dipôle équatorial.

- 5) Si on voit un contraste de résistivité à l'emplacement du défaut, on reprend l'inversion en ajoutant du bruit (signal parasite) dans le cas de la configuration équatoriale et on vérifie la stabilité.
- 6) Si on ne voit pas de contraste significatif de résistivité (environ 50 Ohm.m), on augmente la taille du défaut jusqu'à l'observer.
- 7) Modélisation radar à 1GHz en mode réflexion.
- 8) Modélisation radar à 800MHz en mode réflexion.
- 9) Modélisation radar à 1.5 GHz. en mode réflexion.
- 10) Traitement des données avec ReflexW

## **6/Présentation des résultats**

Dans la majorité des cas, les résultats sont présentés par images puis observations. La présentation type dans ces annexes est :

1. Image du modèle de résistivité électrique correspondant au défaut modéliser : ceci permet aussi d'avoir un rappel de la géométrie pour le radar.
2. Pseudo-section de résistivité apparente en dipôle-dipôle aligné.
3. Inversion en dipôle-dipôle aligné.
4. Pseudo-section de résistivité apparente en dipôle-dipôle équatorial.
5. Inversion en dipôle-dipôle équatorial.
6. Images radar 1GHz.

## 7/Défauts, géométrie et dimensions

Le schéma suivant récapitule les défauts modélisés et leurs dimensions de base. On fait ensuite varier les dimensions si on a besoin de trouver la taille minimale observable. Les défauts ne sont pas nécessairement au même niveau sur le profil radar et électrique, mais cela n'a pas d'influence sur la comparaison.

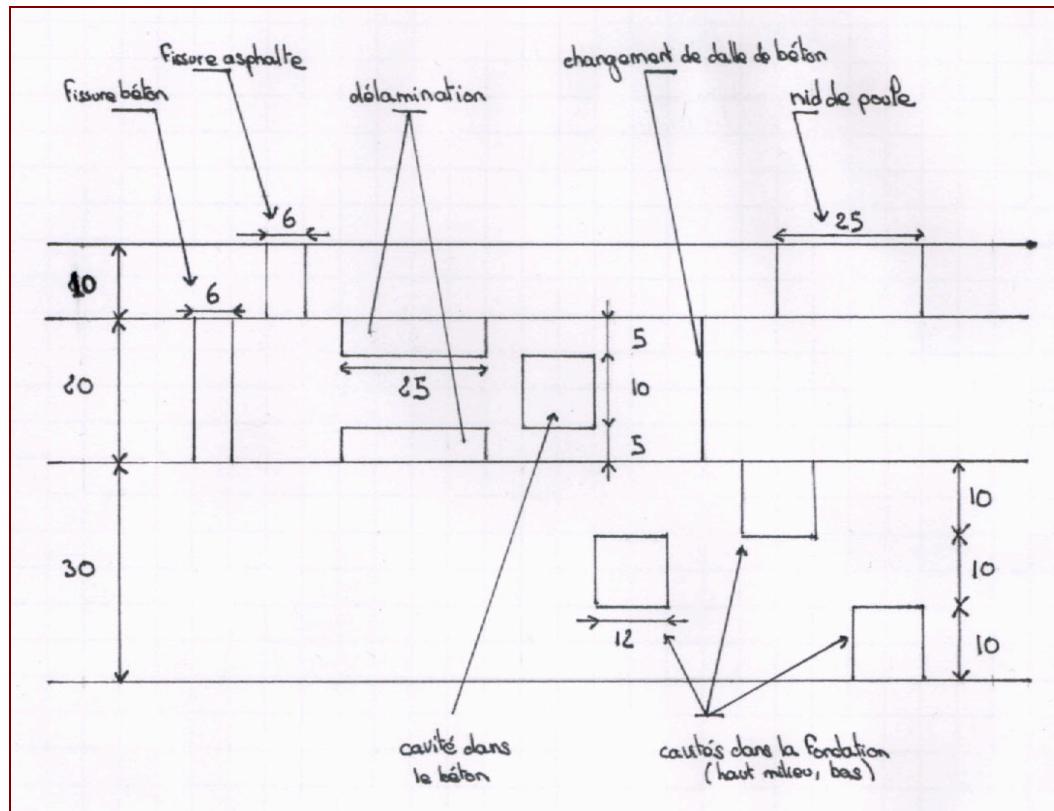


Figure A.6.1. Schéma du positionnement en profondeur et des dimensions des différents défauts.

Les dimensions sont contraintes par les limites de la modélisation électrique toutefois pour des raisons de simplicité, on a parfois arrondi pour le modèle radar (exemple : 12cm en électrique deviennent 10cm en radar).

## 8/Cas de la chaussée sans défauts (dite « idéale »).

### Electrique

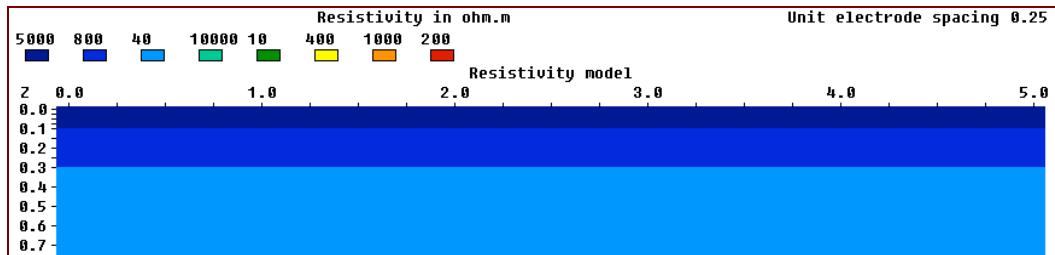


Figure A.7.1. Modèle électrique de chaussée idéale

### Dipôle-dipôle aligné

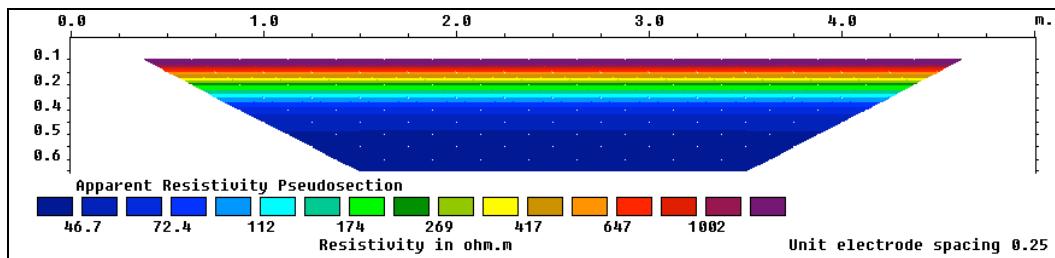


Figure A.7.2. Pseudo-section résistivité apparente pour un modèle de chaussée idéale en configuration dipôle-dipôle aligné

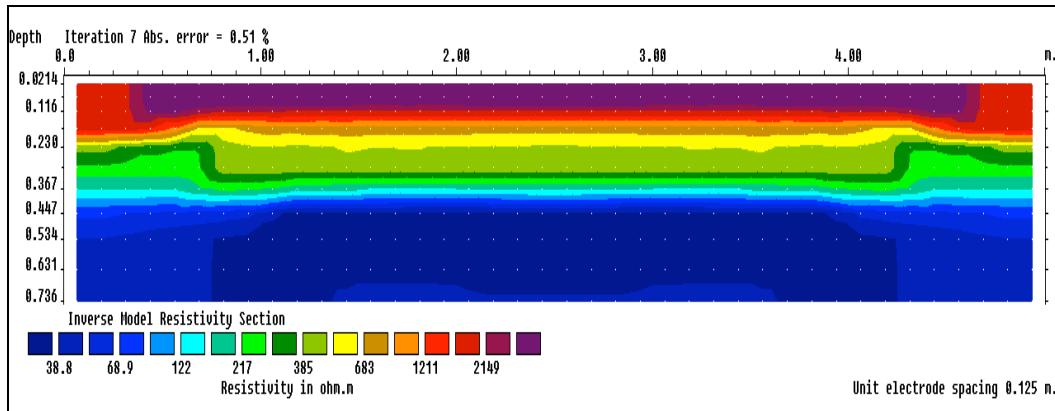


Figure A.7.3. Modèle obtenu après inversion d'après la pseudo section de résistivité apparente de chaussée idéale.

### Dipôle dipôle équatorial

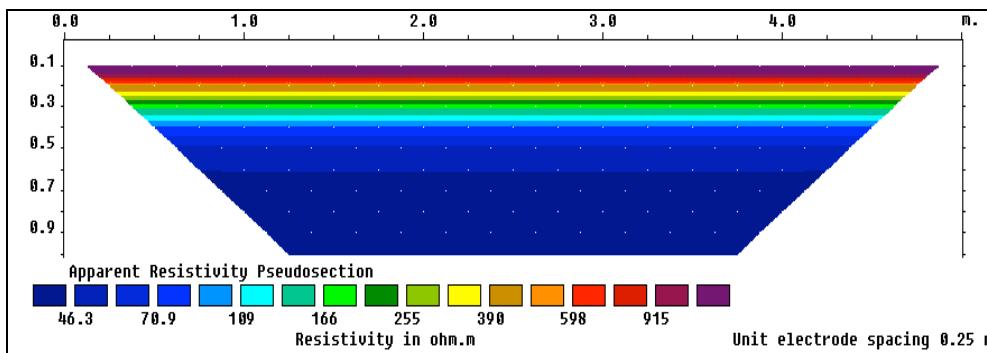


Figure A.7.4. Pseudo section de résistivité apparente pour le modèle de chaussée parfaite en configuration dipôle-dipôle équatorial.

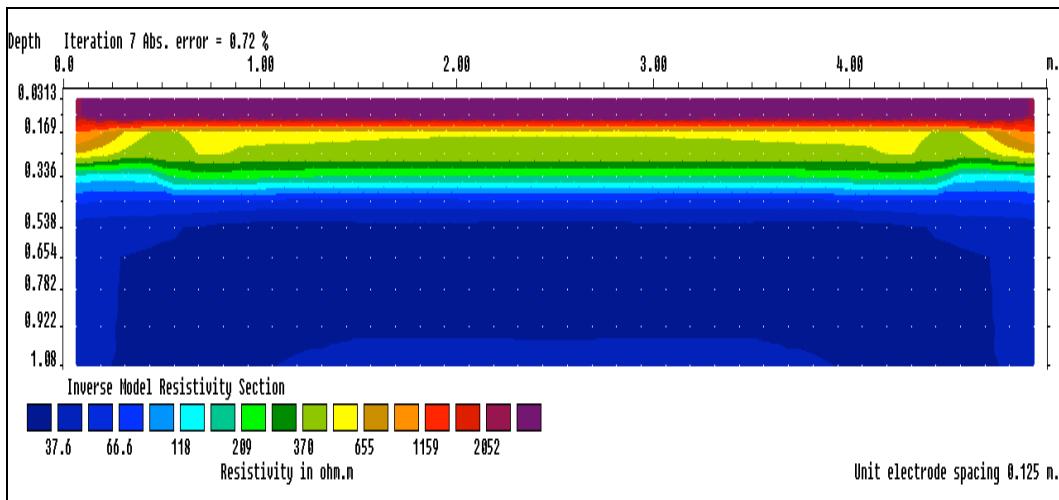


Figure A.7.5. Modèle calculé de chaussée parfaite après modélisation en dipôle-dipôle équatorial

### Observations

Les résultats obtenus en aligné et en équatorial sont similaires. On n'obtient pas les valeurs d'origine de la modélisation après inversion mais les contrastes retrouvés sont similaires (mise en évidence d'une stratification résistive). On observe aussi une sorte d'artefacts sur les côtés des résultats après inversion (dégradés de résistivités). Ces artefacts sont probablement dus au fait que les inversions sont réalisées par blocs et que, techniquement, il n'y a pas de valeurs de résistivité associée aux blocs situés sur les côté du modèle du à la forme de la pseudo section de résistivité apparente après modélisation. (Voir schéma de la construction des blocs d'après le manuel Res2DInv dans la partie *paramètres de la modélisation électrique*). On retrouve cet artefact dans tous les résultats d'inversion.

## Radar

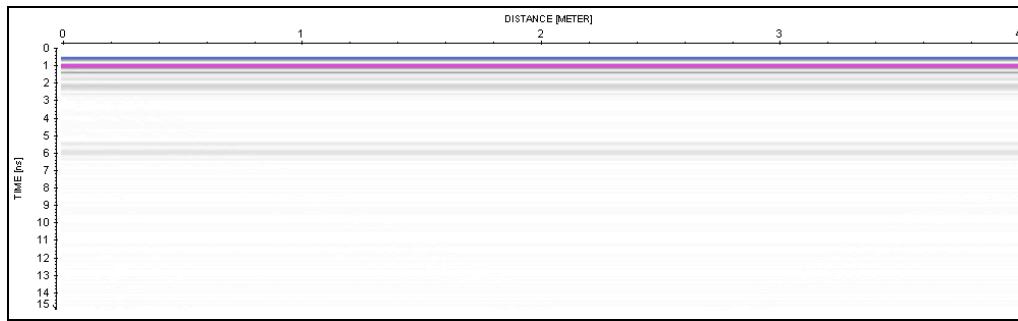


Figure A.7.6. Réponse d'une chaussée Idéale en réflexion à 1 GHz

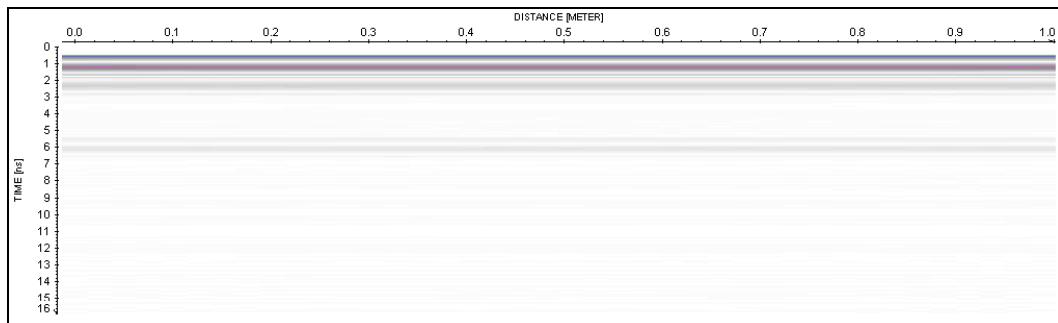


Figure A.7.7. Réponse d'une chaussée idéale en réflexion à 800MHz

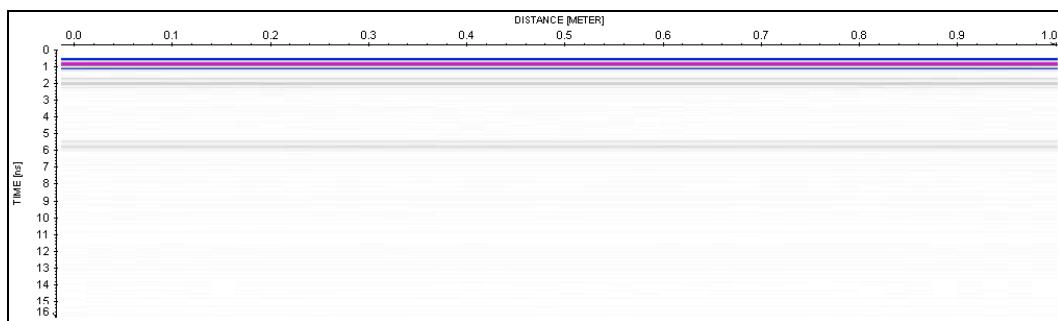


Figure A.7.8. Réponse d'une chaussée Idéale en réflexion à 1.5GHz

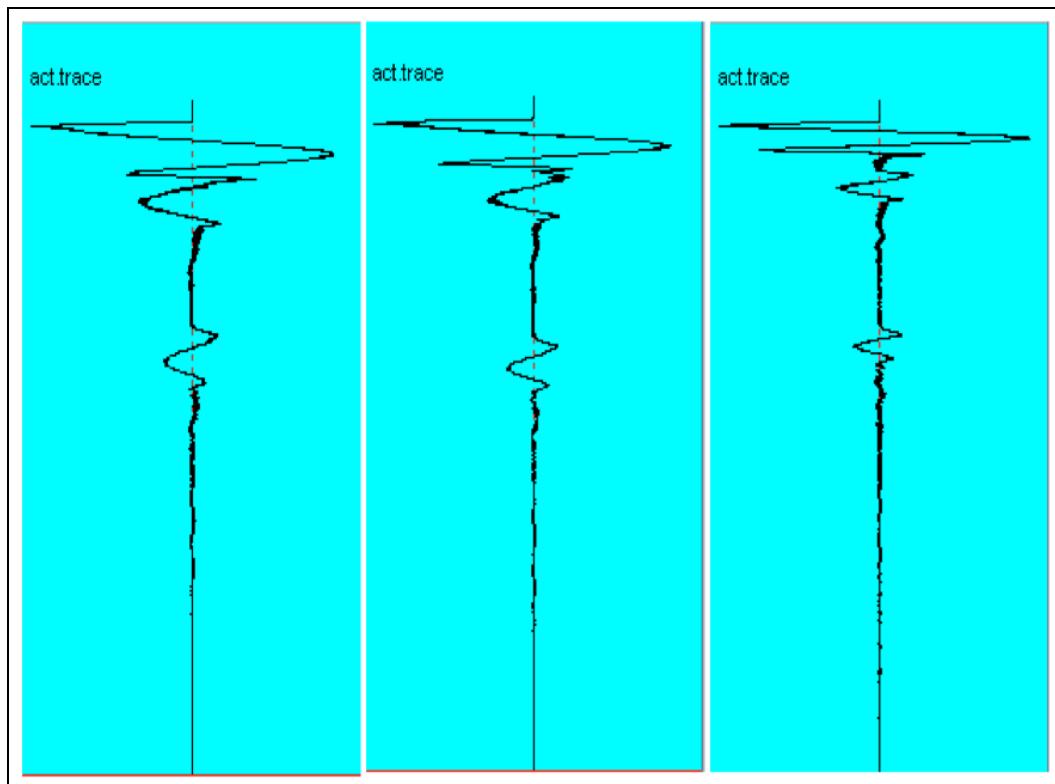


Figure A.7.9. Traces radar. De gauche à droite : 800MHz, 1GHz, 1.5GHz.

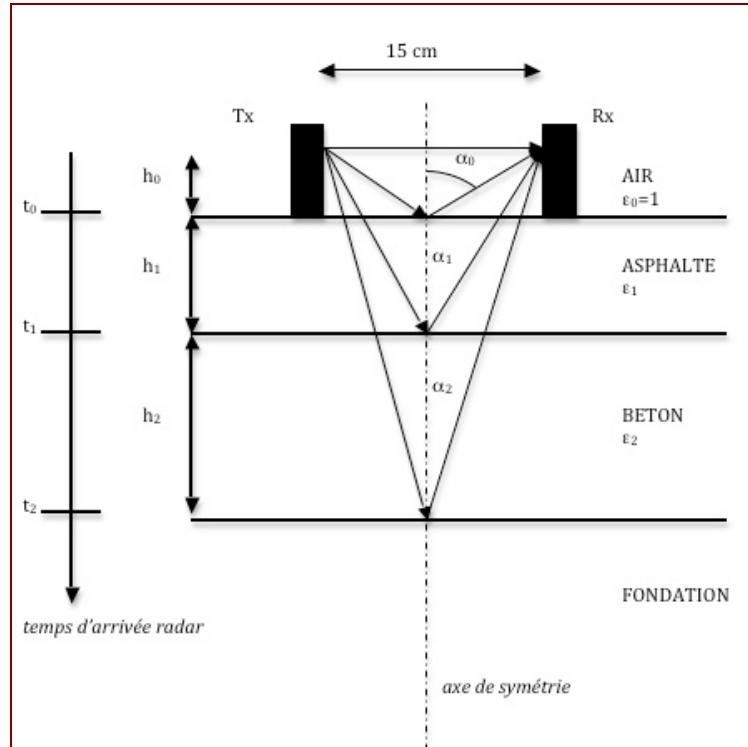


Figure A.7.10. Schéma explicatif des réflexions dans le sol et des arrivées d'ondes au récepteur.

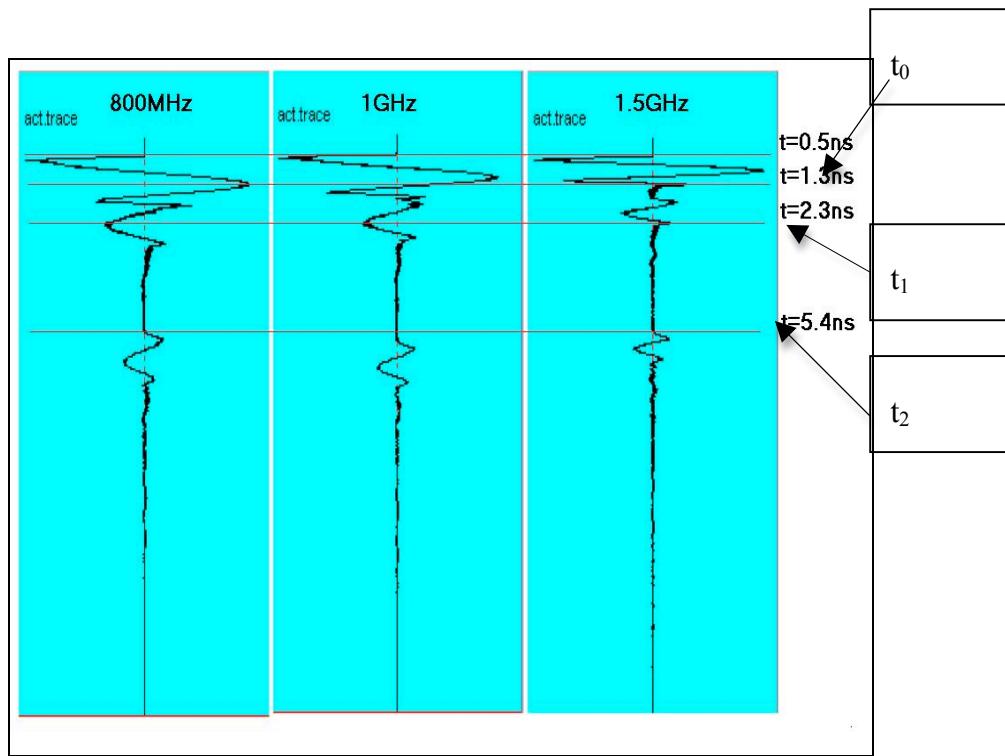


Figure A.7.9. Traces radar avec les temps correspondant relevés via ReflexW et avec temps correspondants à la figure A.7.8.

### Observations :

Les images fournies pour cette première modélisation n'ont subit aucun traitement de données à part une augmentation de contraste. On observe 4 points principaux :

- **Une sorte de stratification** : On voit des interfaces réflecteurs car ce sont des interfaces entre milieux de permittivités différentes.
- **Le « common-offset »** : le décalage de temps avant la mesure de la première arrivée d'onde, que l'on peut observer visiblement sur les traces. Dans la pratique, l'émetteur commence la mesure en avance par rapport à l'émission de l'onde par le transmetteur pour être sur de mesurer la première arrivée d'onde à savoir l'onde directe dans l'air (pour pallier d'éventuelles dysfonctionnements). Pour une modélisation, ce n'est pas réellement nécessaire mais elle a été incluse dans le code. En pratique, on le supprime lors du traitement de données pour définir le temps initial à la première arrivée d'onde pour chaque trace.

- **L'atténuation** : On a bien une atténuation de l'onde plus on va en profondeur et plus on traverse d'interfaces. On peut aussi observer que l'atténuation augmente avec la fréquence.
- **La détection des interfaces suivant les fréquences** : comme on a choisi des ondes non dispersives (hypothèse du mode propagatif), la vitesse ne varie pas avec la fréquence. Toutefois, l'épaisseur minimale détectable est au moins égale à la moitié de la longueur d'onde (parfois le quart de la longueur d'onde suivant l'environnement). Par exemple, avec une fréquence de 800MHz, on peut être presque sûr de voir 2 interfaces s'ils sont séparés de 19cm, 15 cm pour du 1GHz et 10cm pour du 1.5GHz.

Cette première modélisation conclut cette partie présentation et protocole. En utilisant ces résultats comme référence, on connaît les artefacts résiduels qui ne sont pas dus à la présence de défauts mais à la modélisation en elle-même. On justifie aussi le balayage en fréquence dans le cas d'une auscultation GPR de chaussée : quand on augmente la fréquence on gagne en précision (résolution) mais on perd en pénétration.

## B.Fissuration

Cette annexe présente les résultats pour la modélisation d'une fissure dans l'asphalte aérée (avec de l'air dans la fissure) ou saturée (de l'eau dans la fissure); et pour une fissure dans le béton aérée ou saturée et quelques tests sur l'écartement entre les fissures.

Dans le cas de l'étude de la fissuration, seules les données à 1GHz sont montrées car la fréquence n'est pas un facteur influent dans l'asphalte et dans le béton dans le cas de l'étude de la fissuration.

### 1/Asphalte : Fissure aérée.

#### Électrique

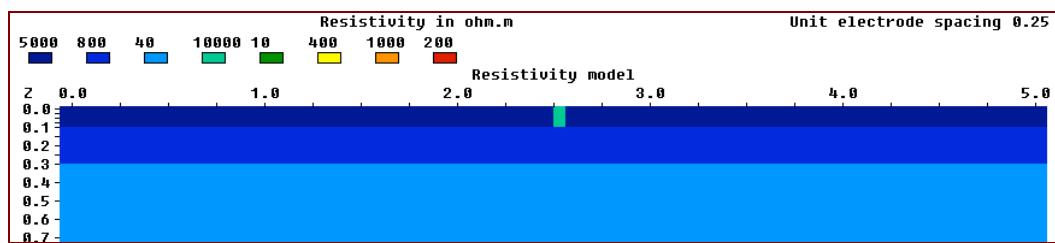


Figure B. 1.1 Modèle électrique d'une fissure remplie d'air dans l'asphalte

#### Dipôle Dipôle aligné

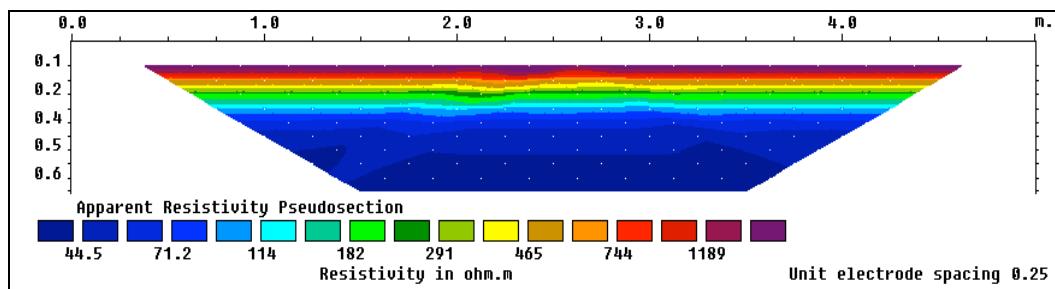


Figure B. 1.2. Pseudo section de résistivité apparente pour une fissure aérée dans l'asphalte en dipôle-dipôle aligné

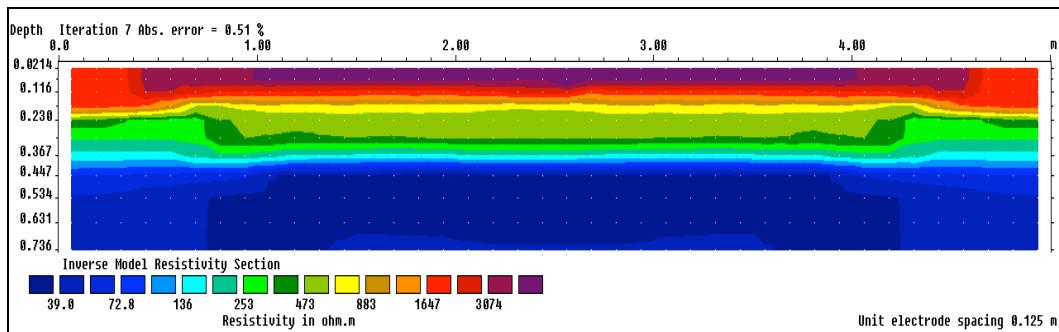


Figure B.1.3. Résultats après inversion d'une fissure dans l'asphalte en dipôle-dipôle aligné

### Dipôle Dipôle Equatorial

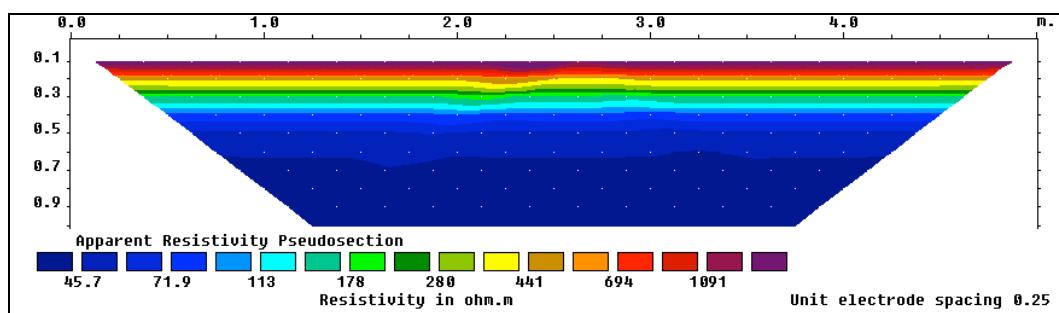


Figure B.1.4. Pseudo section calculée pour une fissure aérée dans l'asphalte en dipôle-dipôle équatoriale

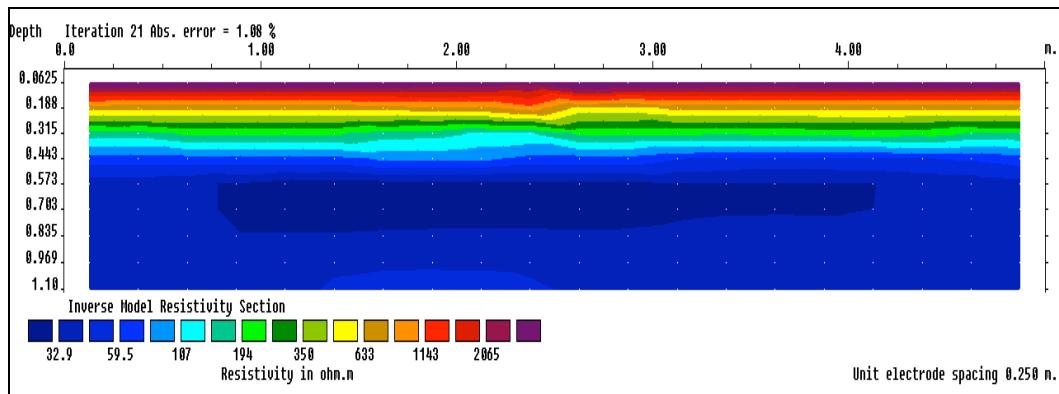


Figure B.1.5. Modèle calculé à partir de la modélisation d'une fissure aérée dans l'asphalte en dipôle-dipôle équatorial

### Observations électriques

Pour une fissure de 6cm d'épaisseur et traversant toute l'asphalte, on ne peut pas l'observer en électrique avec aucune des deux configurations. Pour cela, on ne cherche pas à ajouter du bruit dans l'inversion car ça n'apport rien de plus à la modélisation. On ne cherche pas non plus à augmenter la taille de la fissure car au delà de 6cm d'ouverture, cela devient un trou.

## Radar

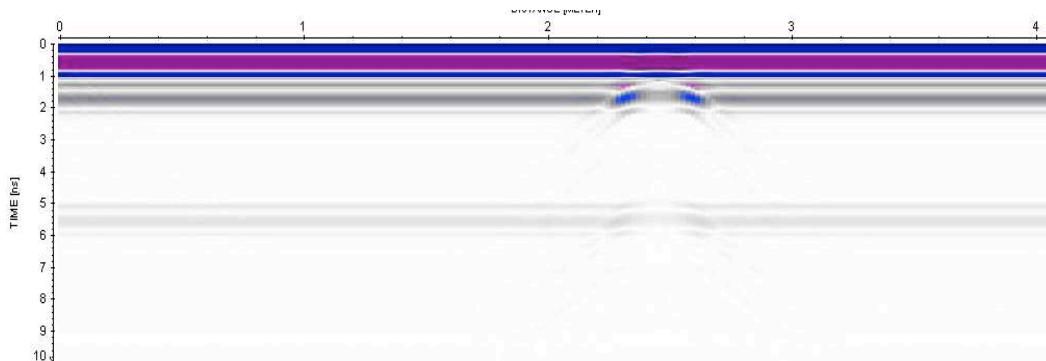


Figure B.1.7. Réponse d'une chaussée au GPR à 1GHz pour une fissure dans l'asphalte de 6cm située à 2.5

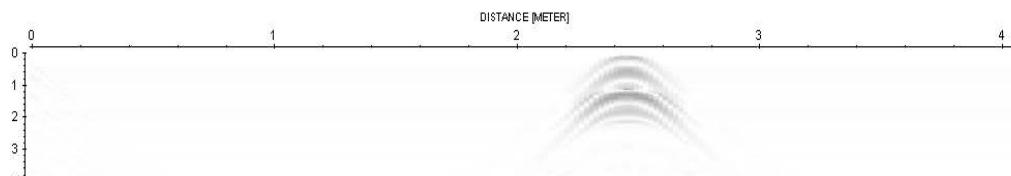


Figure B.1.8. Réponse d'une chaussée au GPR à 1GHz pour une fissure dans l'asphalte de 6cm située à 2.5 sans le background de chaussée uniforme

Après traitement, l'hyperbole de réflexion due à la fissure de 6cm est parfaitement visible à 1GHz. Seule la modélisation de la fissure pour une fréquence de 1GHz est montrée car les autres fréquences n'apportent rien de particulier. On voit quand même une réflexion à 800MHz.

## 2/Fissure asphalte saturée

Electrique :

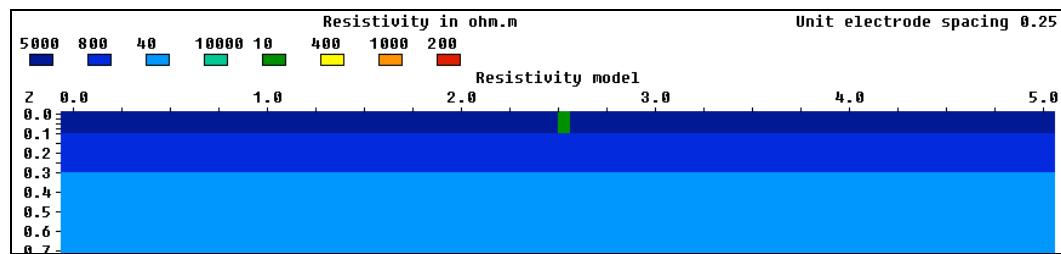


Figure B.2.1. Modèle électrique d'une fissure dans l'asphalte saturée en eau.

### Dipôle Dipôle aligné :

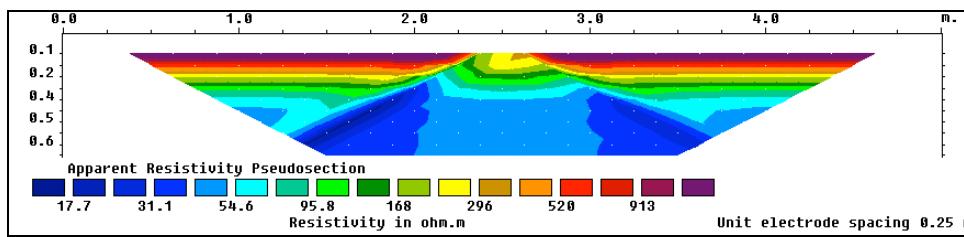


Figure B.2.2. Pseudo-section de résistivité apparente pour une fissure dans l'asphalte saturée en eau en dipôle-dipôle aligné.

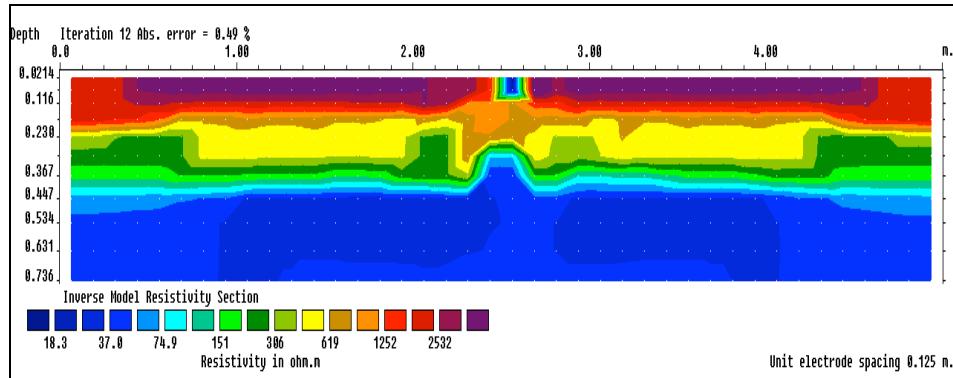


Figure B.2.3. Résultats obtenus après inversion pour une fissure dans l'asphalte saturée en eau en dipôle-dipôle aligné.

### Dipôle Dipôle Equatorial

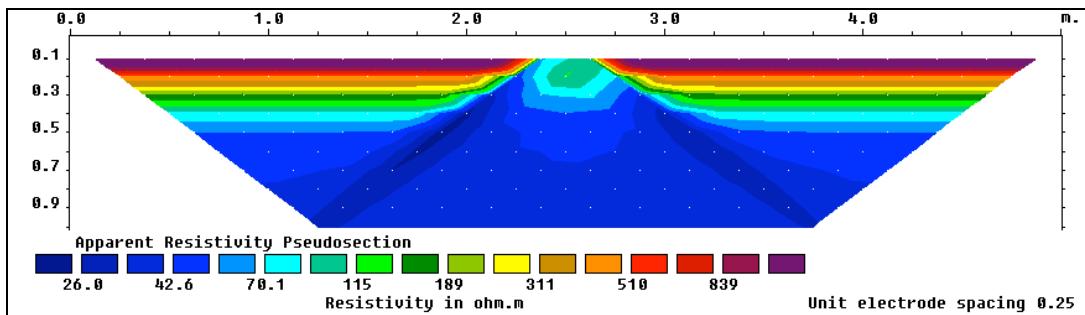


Figure B.2.4. Pseudo-section de résistivité apparente pour une fissure dans l'asphalte saturée en eau en dipôle-dipôle équatorial.

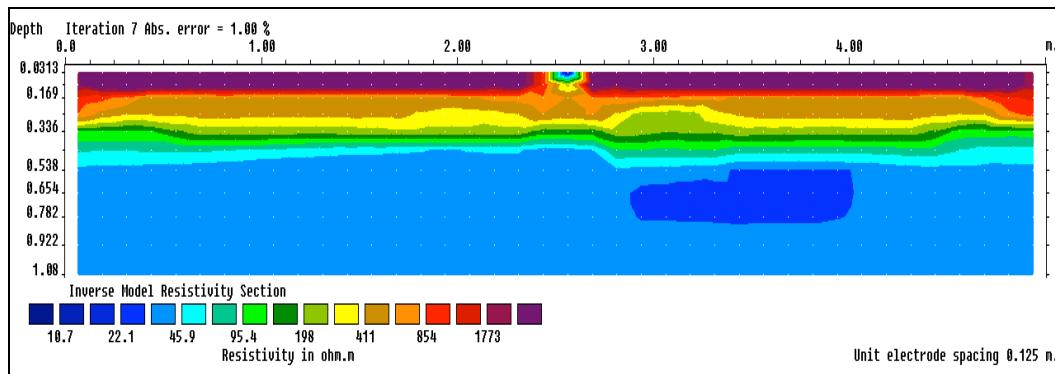


Figure B.2.5. Résultats obtenus après inversion pour une fissure dans l'asphalte saturée en eau en dipôle-dipôle équatorial.

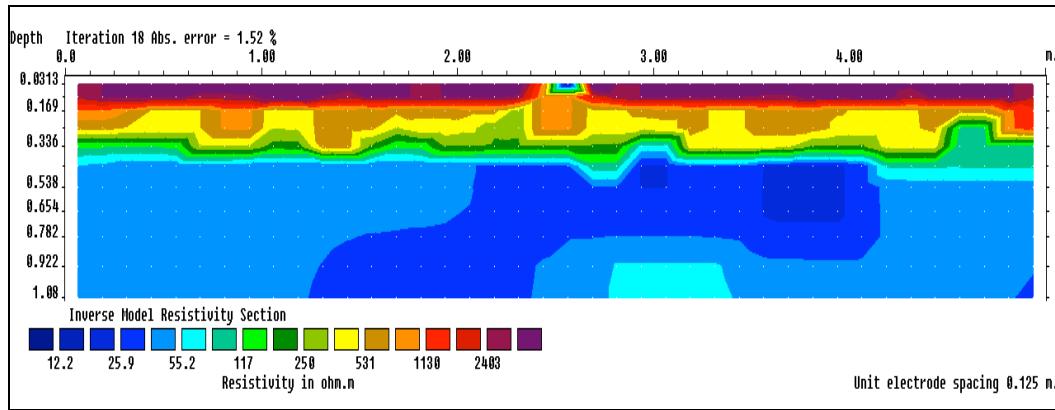


Figure B.2.6. Résultats obtenus après inversion pour une fissure dans l'asphalte saturée en eau en dipôle-dipôle équatorial avec ajout de bruit (3%).

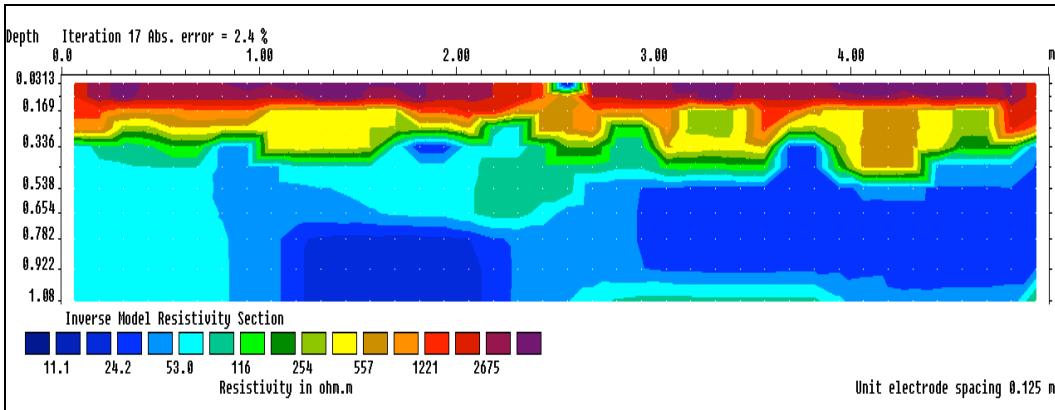


Figure B.2.6. Résultats obtenus après inversion pour une fissure dans l'asphalte saturée en eau en dipôle-dipôle équatorial avec ajout de bruit (5%).

### Observations

Pour les deux configurations, on peut observer les fissures saturées en eau. On remarque le phénomène *d'à coup de prise* qui apparaît sur les pseudo-sections de résistivité apparente. Le phénomène *d'à coup de prise* est caractérisé par la forme les 2 traits qui forme un angle à l'emplacement de la fissure et traversent toute la pseudo section. Ce phénomène apparaît lorsqu'il y a un fort contraste de résistivité à la hauteur d'une électrode de potentiel. Grace à ce phénomène, l'inversion détecte un fort contraste et localise la fissure saturée en eau. On observe toutefois quelques artefacts résiduels dus à l'inversion même sans ajout de bruit.

Bien qu'on observe encore le contraste du à la fissure même en présence de bruit, les distorsions engendrées par le bruit finissent pas masquer jusqu'à la stratification elle même, on perd alors l'essentiel de ce que l'on souhaite ausculter.

### Radar

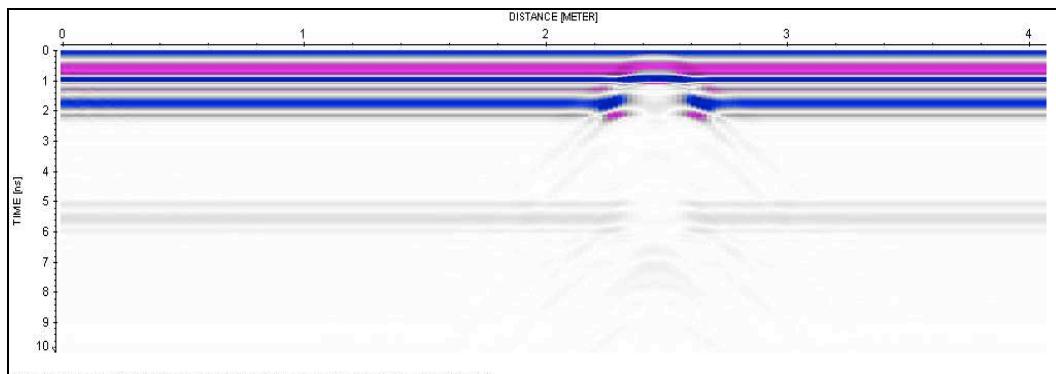


Figure B.2.7. Réponse d'une chaussée au GPR à 1GHz pour une fissure saturée en eau dans l'asphalte de 6cm située à 2.5

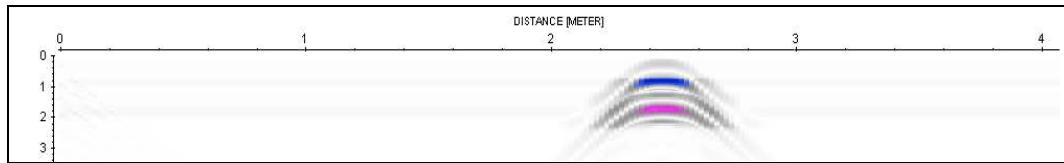


Figure B.2.8. Réponse d'une chaussée au GPR à 1GHz pour une fissure saturée dans l'asphalte de 6cm située à 2.5 sans le background de chaussée uniforme

### Observations

On observe la fissure au radar. A priori on peut aussi supposer que la présence d'eau fait un bon écran réflecteur car l'amplitude dans l'image sans traitement est meilleure pour une fissure saturée que aérée.

On observe en effet, beaucoup de bruit du à la réflexion sur pour la fissure saturée et probablement au traitement des données qui consiste à augmenter l'amplitude.

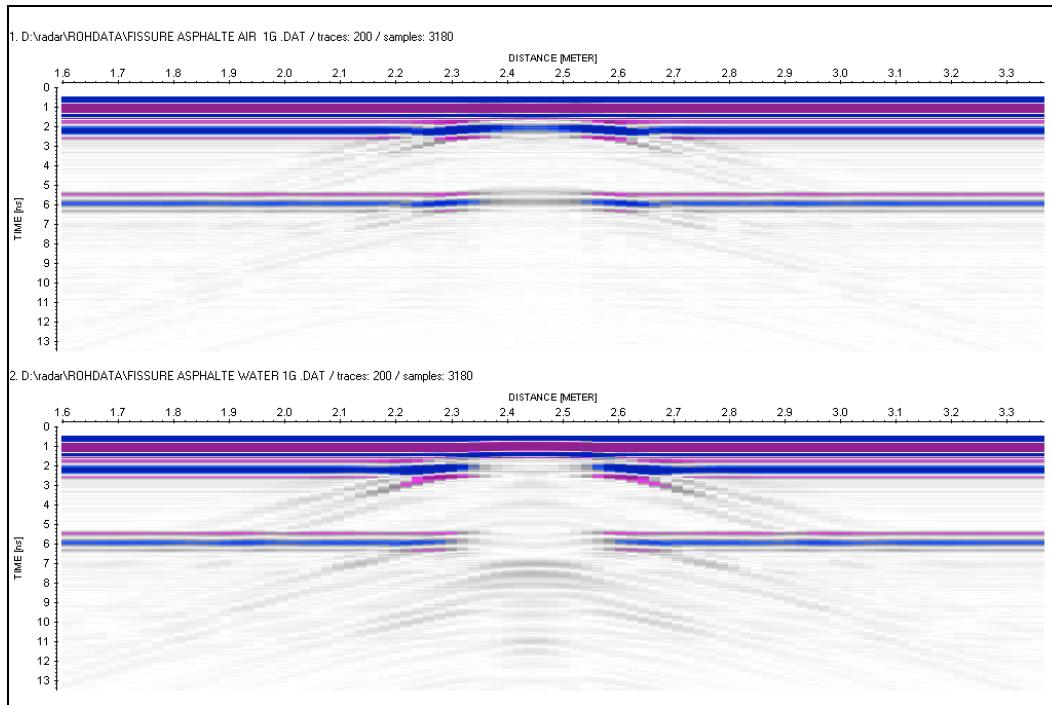


Figure B.2.9. Comparaison fissure asphalte aérée (en haut) ou saturée (en bas).

### 3/Fissure béton aérée

#### Electrique

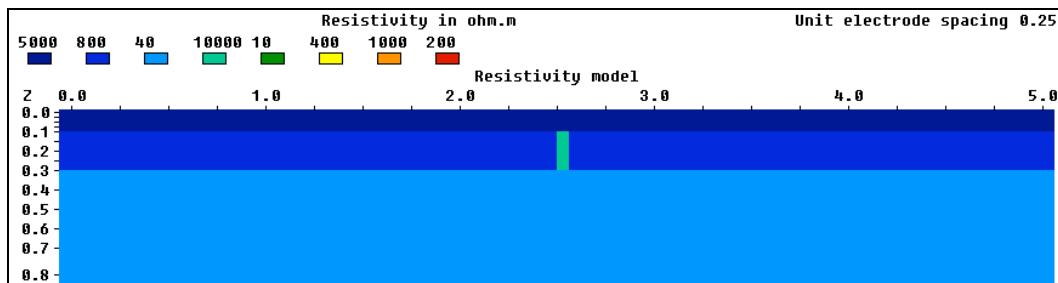


Figure B.3.1. Modèle électrique d'une fissure dans le béton remplie d'air.

#### Dipôle-dipôle aligné

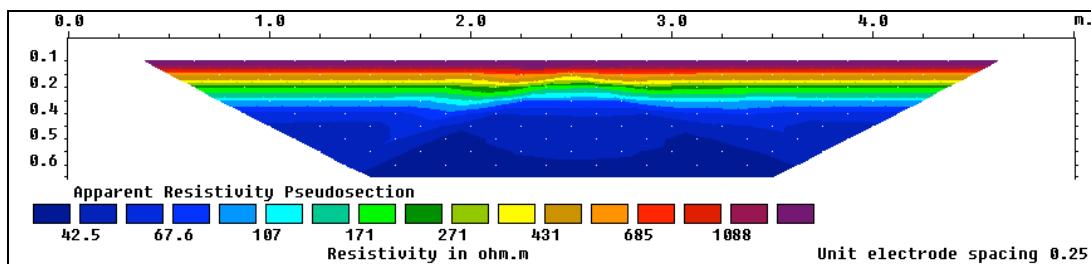


Figure B.3.2. Pseudo section de résistivité apparente d'une fissure aérée dans le béton en dipôle-dipôle aligné.

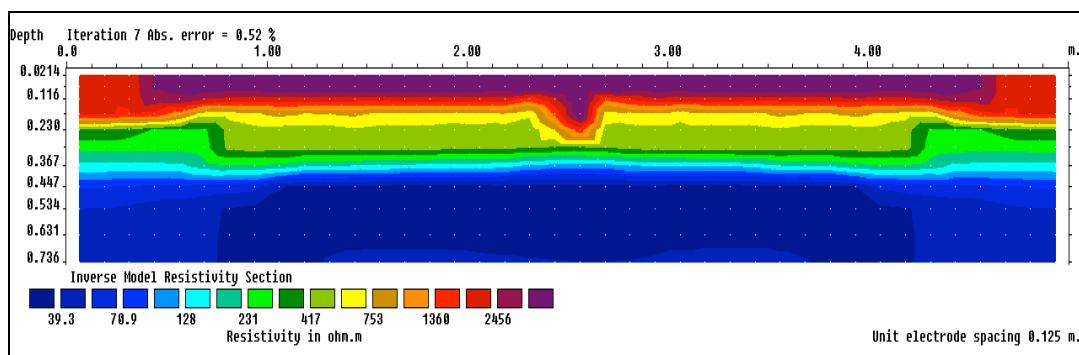


Figure B.3.3. Résultats d'inversion pour une fissure aérée dans le béton en dipôle-dipôle aligné.

### Dipôle-dipôle Equatorial

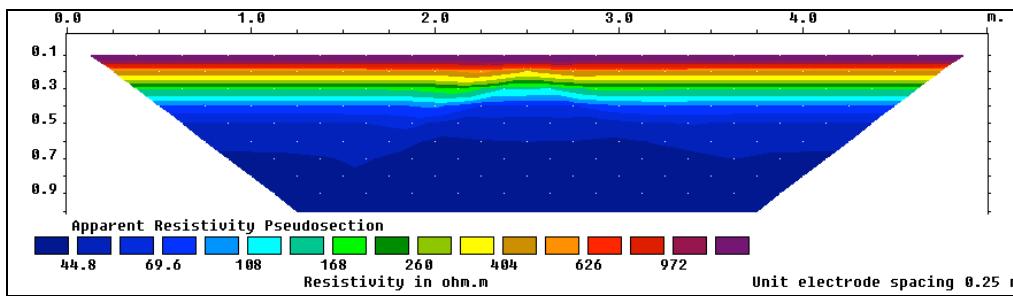


Figure B.3.4. Pseudo section de résistivité apparente pour une fissure aérée dans le béton en dipôle-dipôle équatorial.

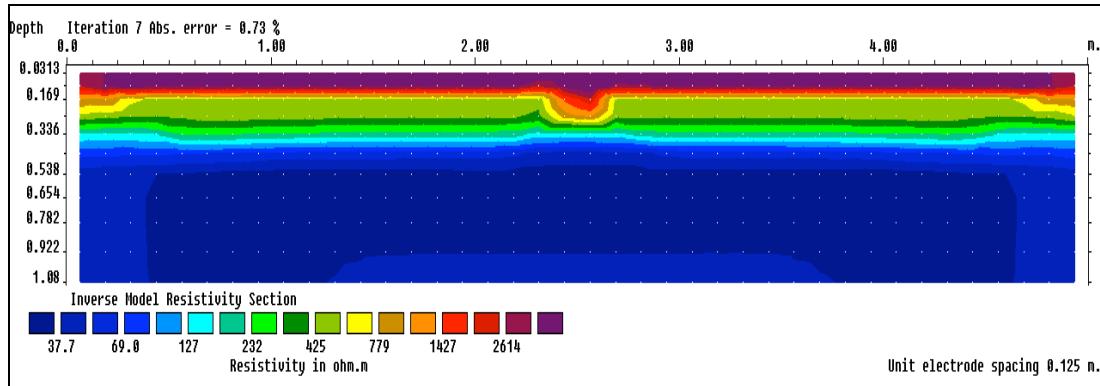


Figure B.3.5. Résultats d'inversion une fissure aérée dans le béton en dipôle-dipôle équatorial.

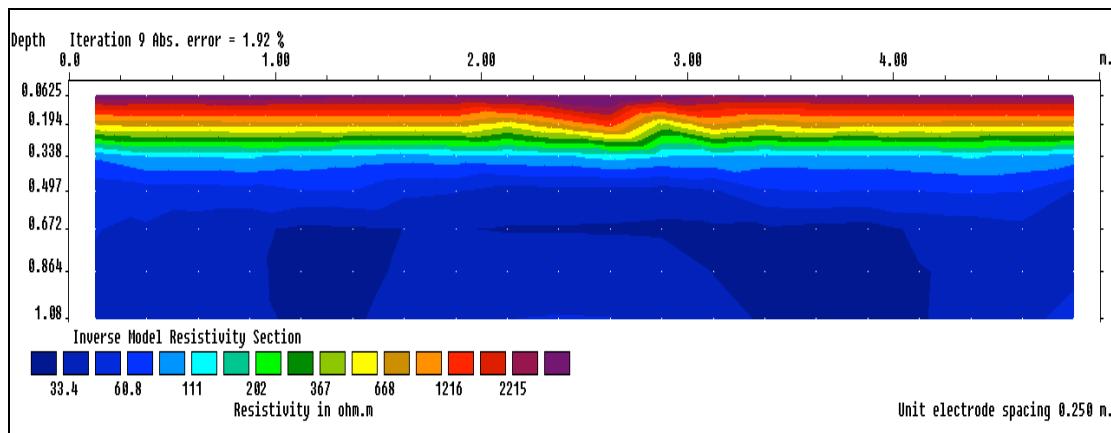


Figure B.3.6. Résultats d'inversion une fissure aérée dans le béton en dipôle-dipôle équatorial avec ajout de bruit (1%)

### Observations

On observe des contrastes correspondant à la fissure dans les inversions mais peu stables (si on ajoute du bruit lors de l'inversion, les contrastes diminuent rapidement). L'anomalie a cependant l'air plus marquée en dipôle-dipôle aligné.

## Radar

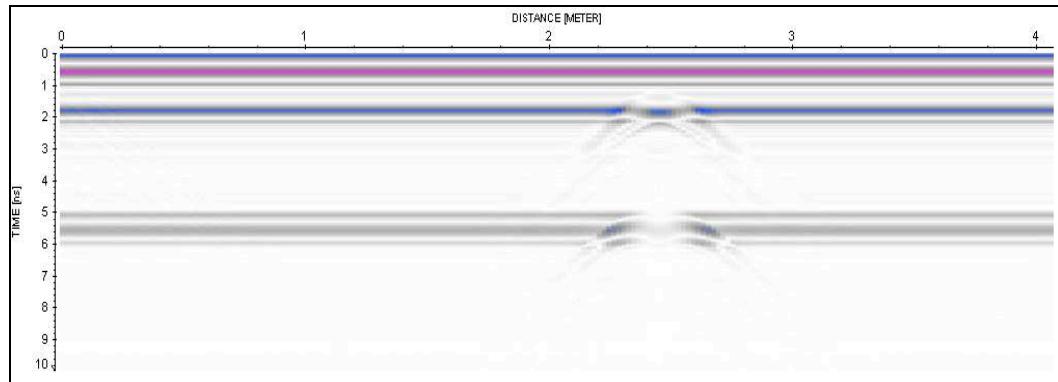


Figure B.3.7. Réponse d'une chaussée au GPR à 1GHz pour une fissure dans le béton de 6cm située à 2.5m

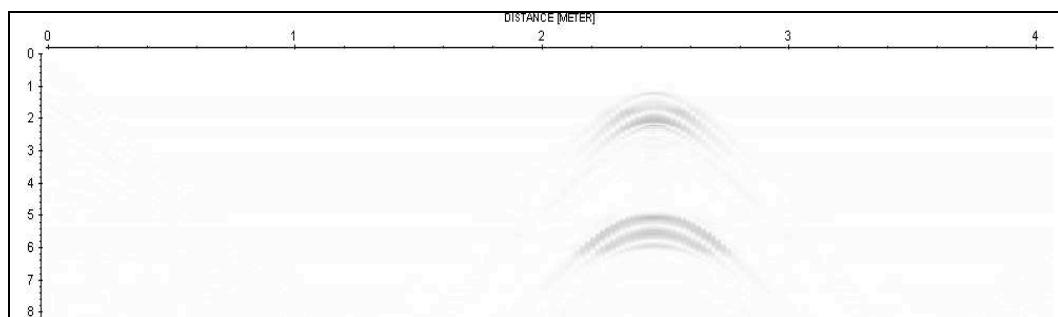


Figure B.3.8. Réponse d'une chaussée au GPR à 1GHz pour une fissure dans le béton de 6cm située à 2.5m sans le background.

## Observations

La fissure modélisée est parfaitement observable à 1GHz. Les autres fréquences donnant des résultats identiques ne sont pas affichées ici.

## 4/Fissure béton saturée

### Electrique

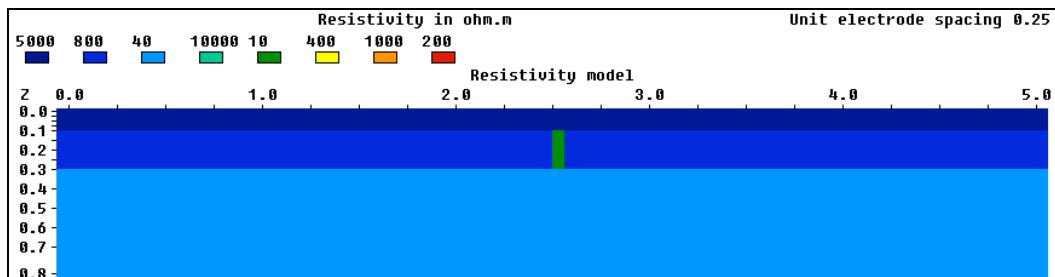


Figure B.4.1. Modèle électrique d'une fissure dans le béton remplie d'eau.

### Dipôle-dipôle aligné

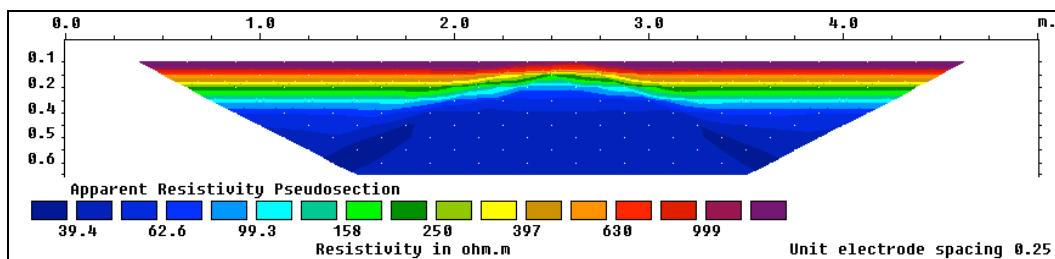


Figure B.4.2. Pseudo section de résistivité apparente d'une fissure saturée dans le béton en dipôle dipôle aligné.

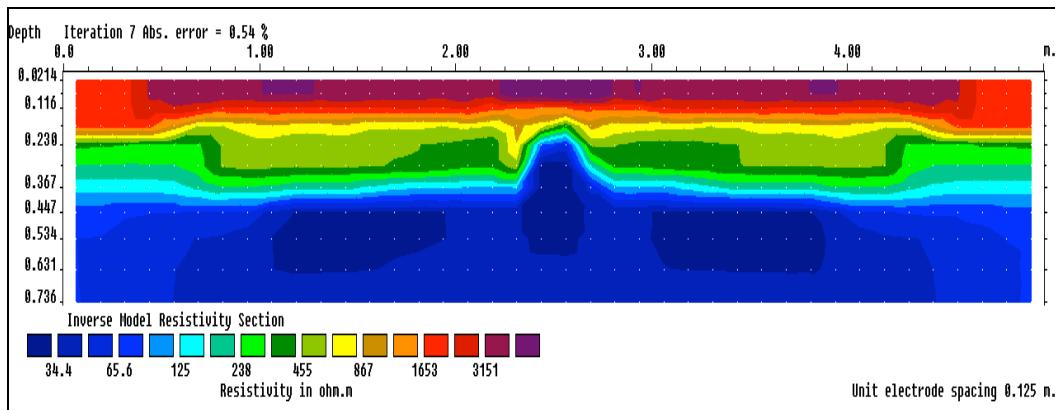


Figure B.4.3. Résultats d'inversion pour une fissure saturée dans le béton en dipôle dipôle aligné.

### Dipôle-Dipôle Equatorial

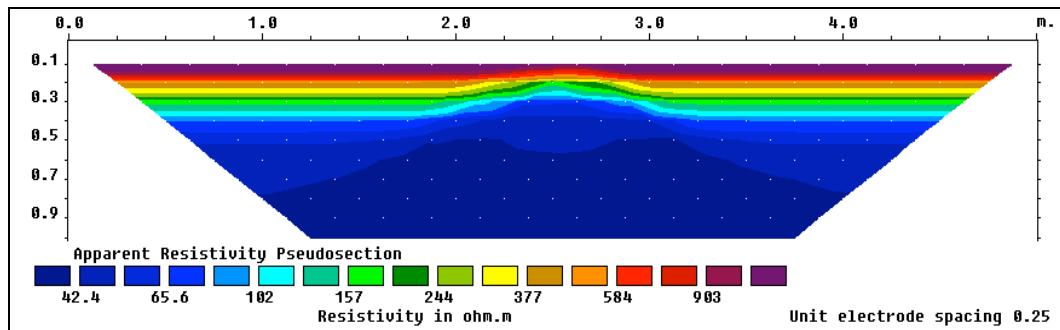


Figure B.4.4. Pseudo section de résistivité apparente pour une fissure saturée dans le béton en dipôle-dipôle équatorial.

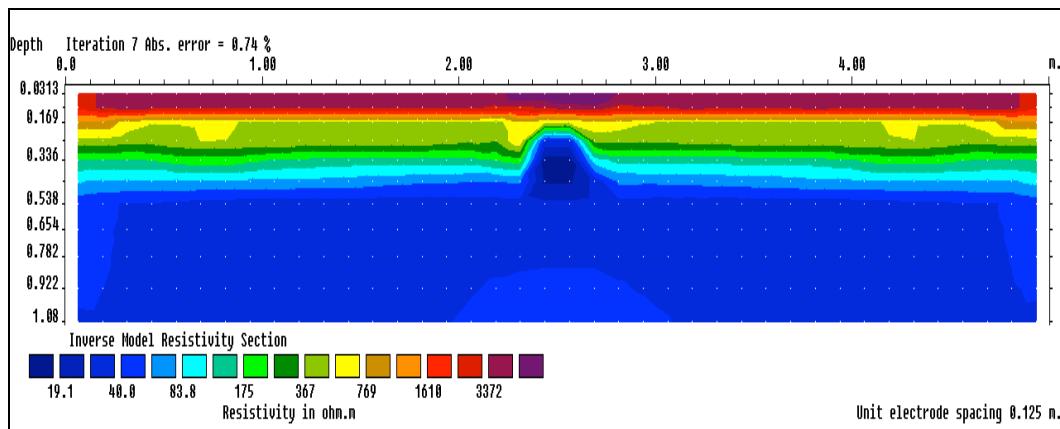


Figure B.4.5. Résultats d'inversion une fissure saturée dans le béton en dipôle-dipôle équatorial.

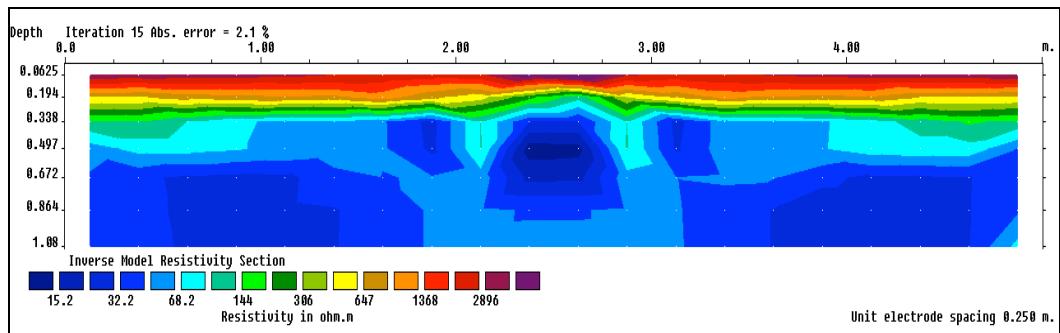


Figure B.4.6. Résultats d'inversion une fissure saturée dans le béton en dipôle-dipôle équatorial avec ajout de bruit (1%)

### Observations

L'observation d'une anomalie de fort contraste de résistivité correspondant à la fissure est possible. On remarque quand même que c'est est plutôt instable.

## Radar

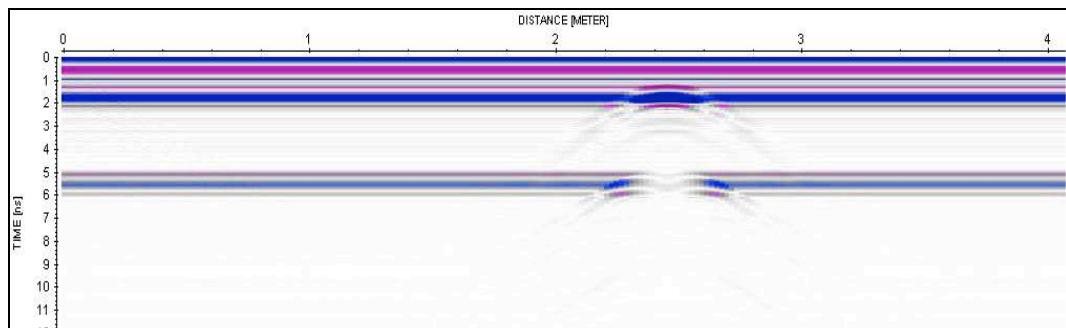


Figure B.4.7. Réponse d'une chaussée au GPR à 1GHz pour une fissure saturée dans le béton de 6cm située à 2.5m

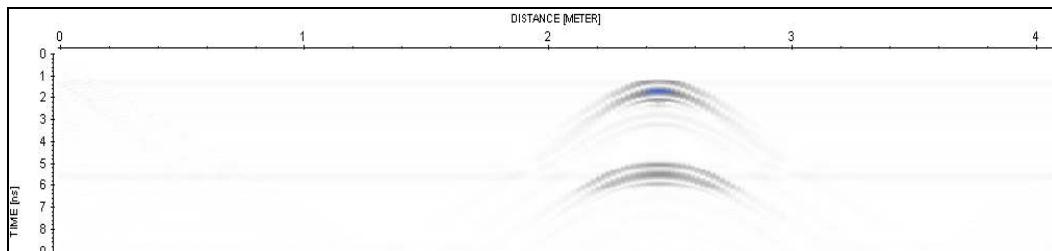


Figure B.4.8. Réponse d'une chaussée au GPR à 1GHz pour une fissure saturée dans le béton de 6cm située à 2.5m sans le background

### Observations :

La fissure saturée dans le béton est correctement observable à 1GHz. On peut faire aussi la même comparaison entre la reflection portant sur la fissure saturée ou la fissure non saturée.

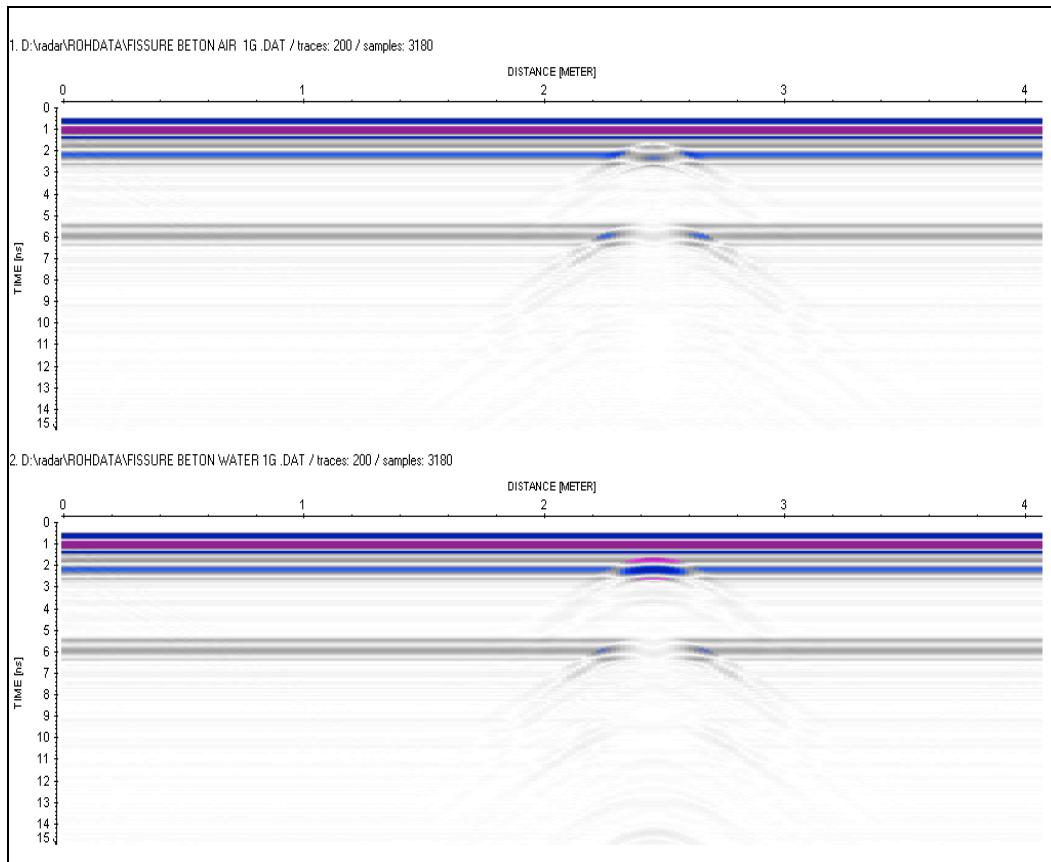


Figure B.4.9. Comparaison fissure béton aérée (en haut) ou saturée (en bas).

## 5/Commentaires sur l'observation de la fissuration

La méthode de résistivité électrique peut *a priori* observer la fissuration mais dans notre situation, on peut uniquement se limiter à dire *qu'a priori* cette observation est instable et fortement influencée par la présence de bruit. Dès que le contraste à proximité d'une électrode est très grand c'est la détection d'un phénomène qu'on cherche habituellement à éviter (*à coup de prise*) qui nous permet de détecter la fissuration. Notre modélisation est aussi limitée par la taille des blocs, ceci du au logiciel utilisé. Il serait intéressant de réaliser la même démarche avec un logiciel différent.

Le GPR de son côté montre une capacité à la détection de la fissuration aussi bien dans l'asphalte que dans le béton. Des travaux précédents au sein du laboratoire en modélisation GPR démontrent une capacité théorique du GPR à détecter les fissures de l'ordre du demi centimètre. Ce n'est probablement pas le cas dans une situation réelle, par conséquent, on ne cherche pas à réduire la taille de la fissure dans cette modélisation numérique. On peut aussi supposer, avec les

observations précédentes, que la présence d'une fissure ou bien même d'un défaut peut masquer la présence d'un phénomène situé plus profond dans la chaussée.

## C.Cavités

Cette annexe présente certains résultats de modélisation pour des cavités :

- dans le béton 10cm\*10cm remplie d'air
- dans une fondation saturée à différentes positions, remplies d'air ou d'eau.

Toutes les modélisations réalisées ne sont pas exposées car cela représenterait un intérêt minimal en considérant que c'est toujours le même protocole qui est appliqué.

On présente ici les résultats aux différentes fréquences, ainsi que les comparaisons de vitesses radar calculées automatiquement avec le logiciel ReflexW à partir des hyperboles de réflexion.

### 1/Cavité dans le béton

#### Électrique

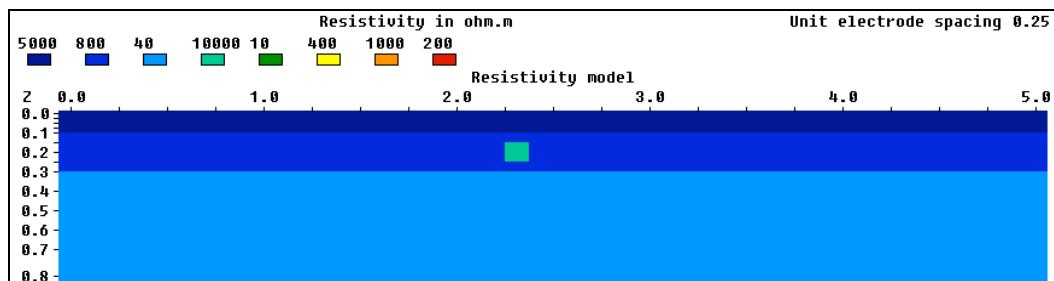


Figure C.1.1. Modèle électrique d'une cavité dans la dalle de béton de 10cm de côté et située à 2.25m

#### Dipôle-Dipôle Aligné

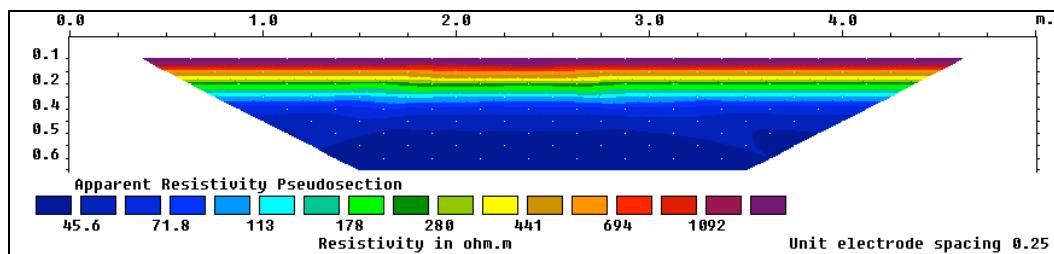


Figure C.1.2. Pseudo section de résistivité apparente calculée pour une cavité dans le béton en dipôle-dipôle aligné.

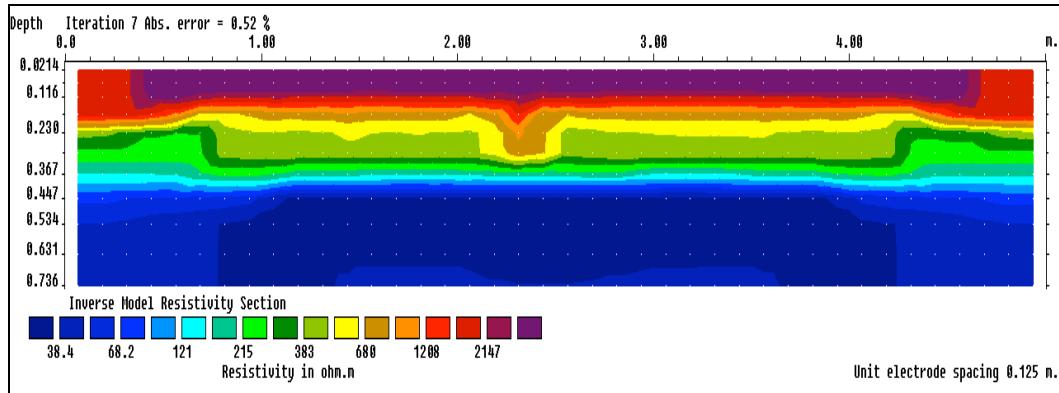


Figure C.1.3. Résultats après inversion pour une cavité dans le béton en dipôle-dipôle alignés

*Dipôle-Dipôle Equatorial :*

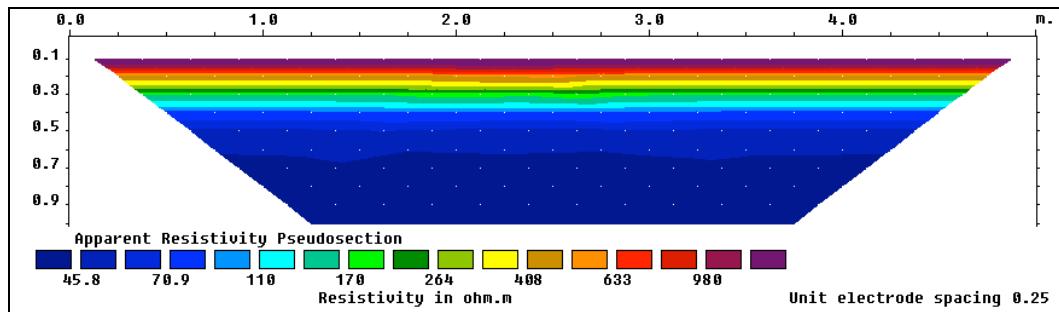


Figure C.1.4. Pseudo section de résistivité apparente calculée pour une cavité dans le béton en dipôle-dipôle équatorial.

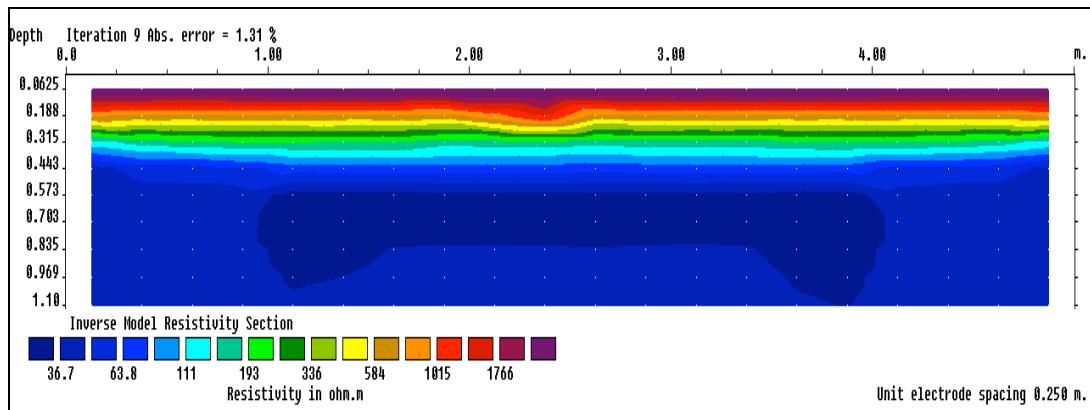


Figure C.1.5. Résultats après inversion pour une cavité dans le béton en dipôle-dipôle équatorial.

### Observations

Pour une cavité de 10cm par 10cm, le dipôle-dipôle aligné montre un faible contraste alors que l'équatorial est presque insensible à la cavité. Dans ces conditions, on n'effectue pas l'inversion avec ajout de bruit car cela serait inutile.

## Radar

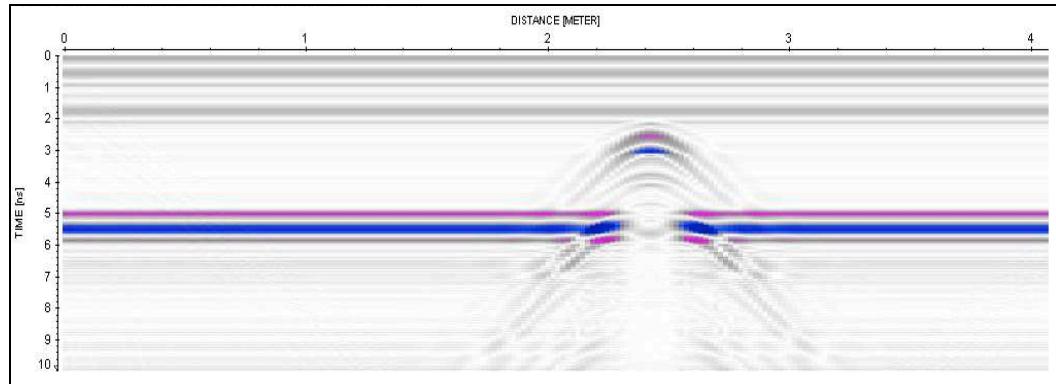


Figure C.1.6. Réponse GPR à 1GHz d'une cavité dans le béton de 10cm de côté.

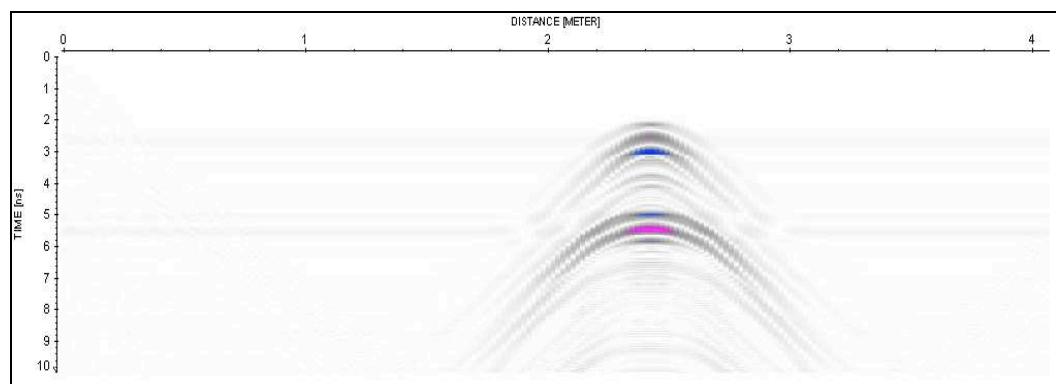


Figure C.1.7. Réponse GPR à 1GHz d'une cavité dans le béton de 10cm de côté sans le background.

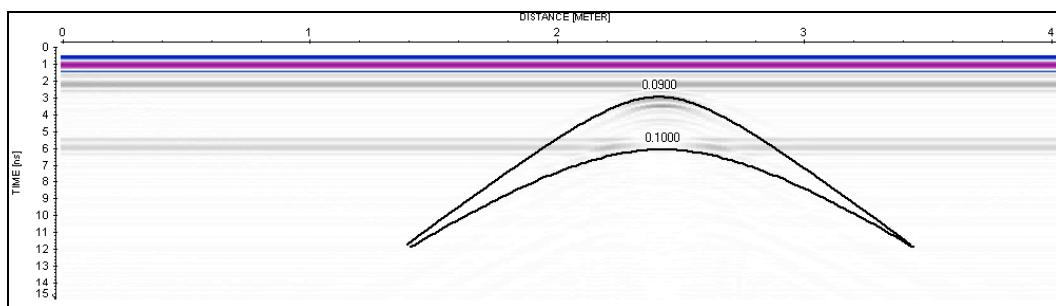


Figure C.1.8. Réponse GPR à 1GHz d'une cavité dans le béton de 10cm de côté avec les hyperboles et calcul de la vitesse.

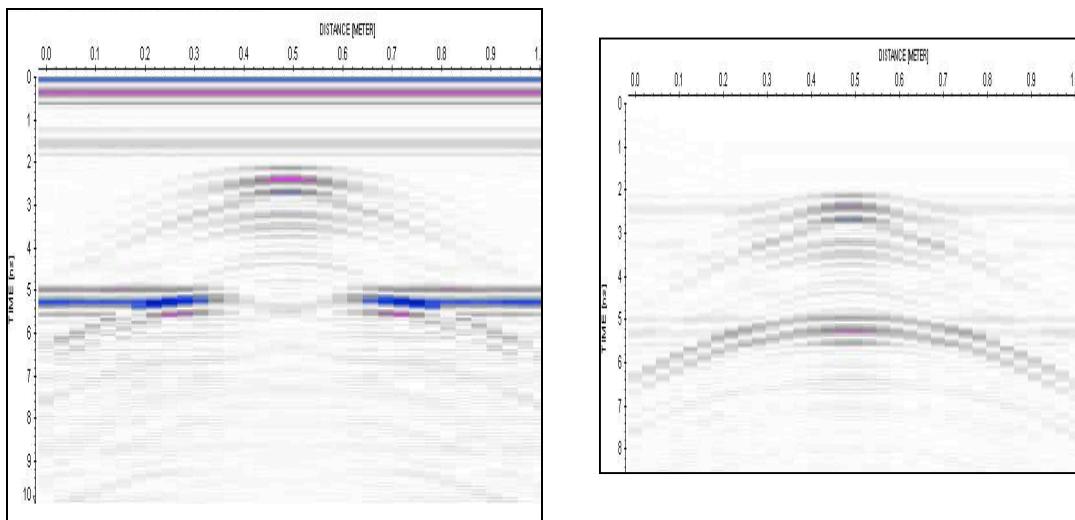


Figure C.1.9. Réponse GPR à 1.5GHz d'une cavité dans le béton de 10cm de côté avec background (à gauche) et sans background et agrandie (à droite).

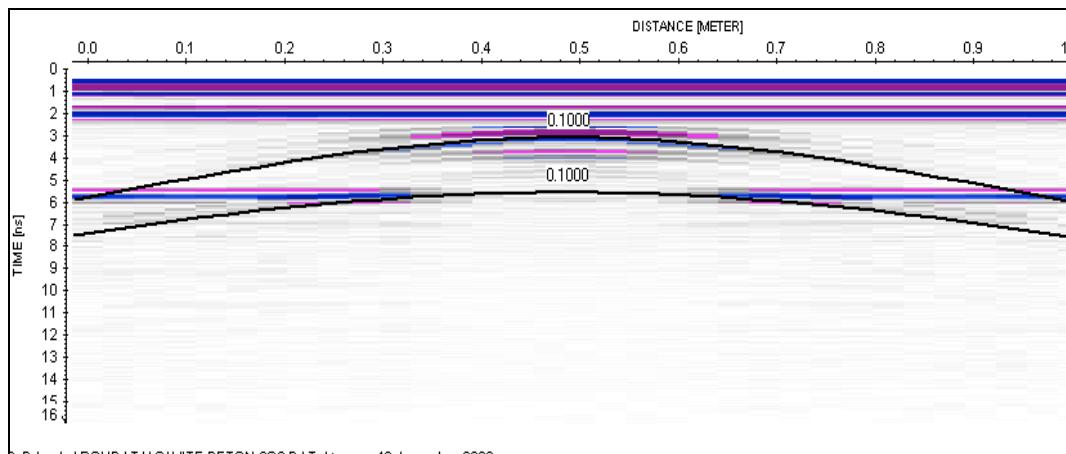


Figure C.1.10. Réponse GPR à 1.5GHz d'une cavité dans le béton de 10cm de côté avec vitesses.

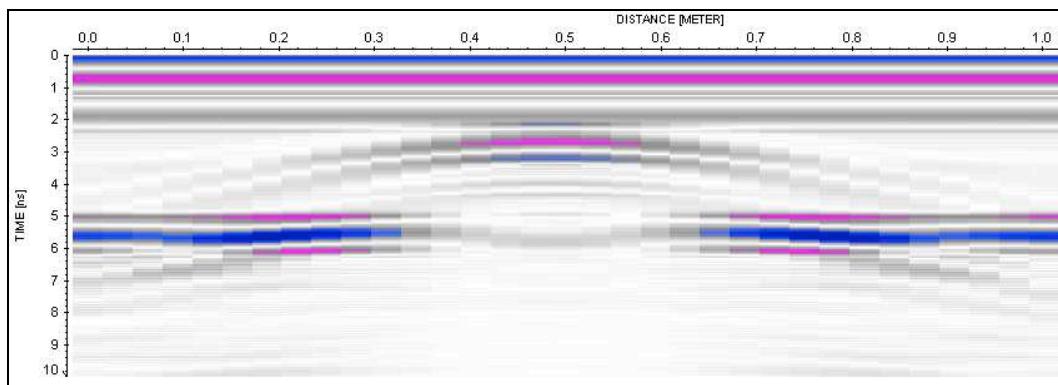


Figure C.1.11. Réponse GPR à 800MHz d'une cavité dans le béton de 10cm de côté.

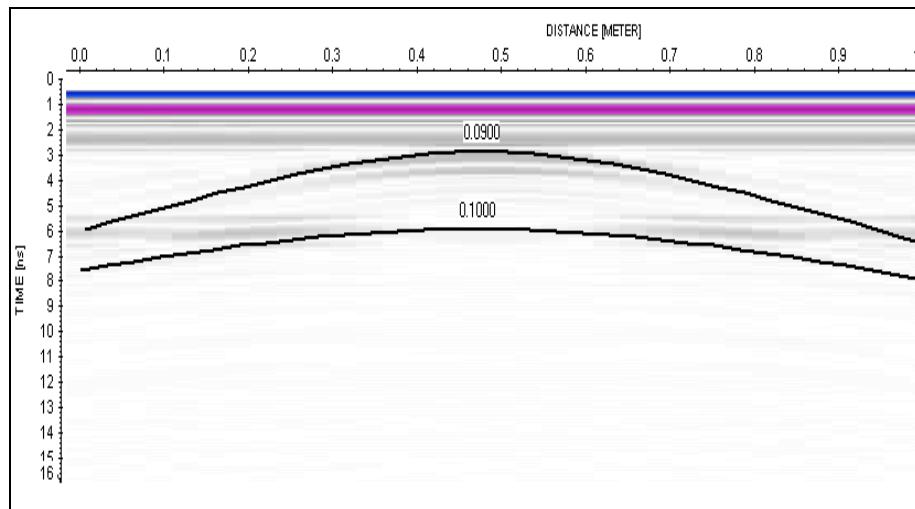


Figure C.1.10. Réponse GPR à 800MHz d'une cavité dans le béton de 10cm de côté avec vitesses.

### Observations

La cavité de 10cm\*10cm est plutôt bien détectée par le radar à toutes les fréquences observées. On remarque bien que les vitesses sont les mêmes quelle que soit la fréquence. On peut déjà souligné que contrairement à une fissuration, on peut voir la propagation de l'onde à l'intérieur de la cavité. Dans une fissure, l'espace est trop faible pour que l'on puisse observer ce phénomène.

## 2/Cavité dans le haut de la fondation remplie d'air

### Electrique

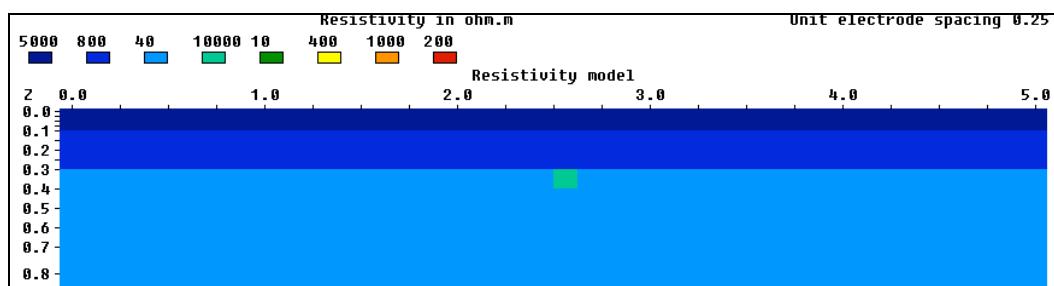


Figure C.2.1. Modèle de électrique d'une cavité air dans le haut de la fondation de 10cm de côté et située à 2.5m

### Dipôle-Dipôle Aligné :

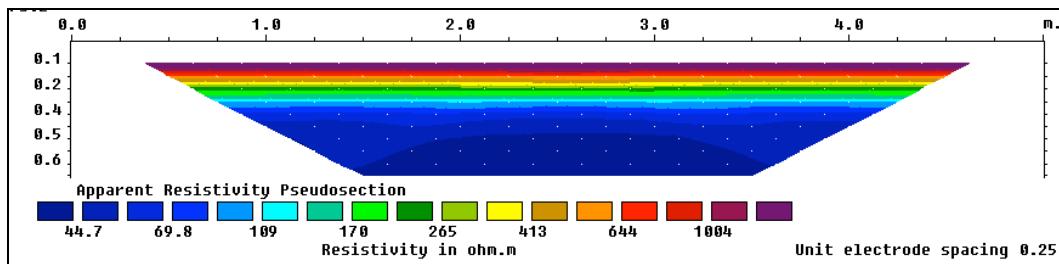


Figure C.2.2. Pseudo section de résistivité apparente calculée pour une cavité dans le haut de la fondation en dipôle-dipôle aligné.

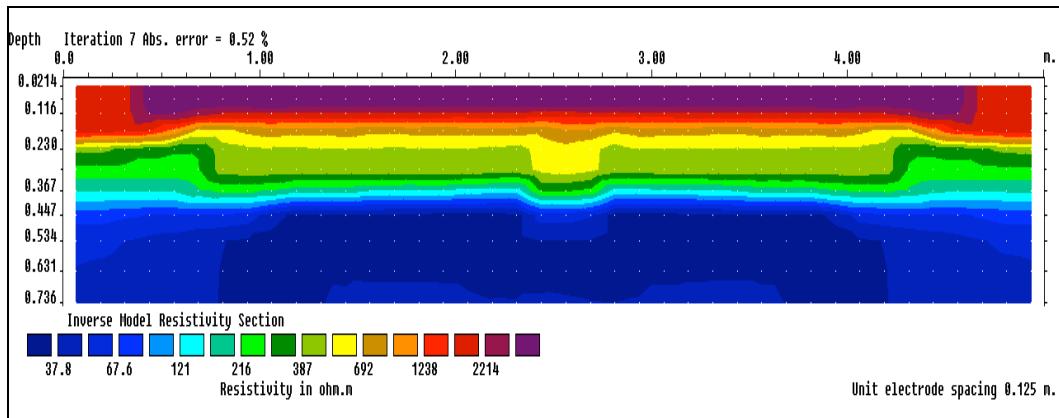


Figure C.2.3. Résultats après inversion pour une cavité dans le béton en dipôle-dipôle alignés.

### Dipôle-dipôle équatorial :

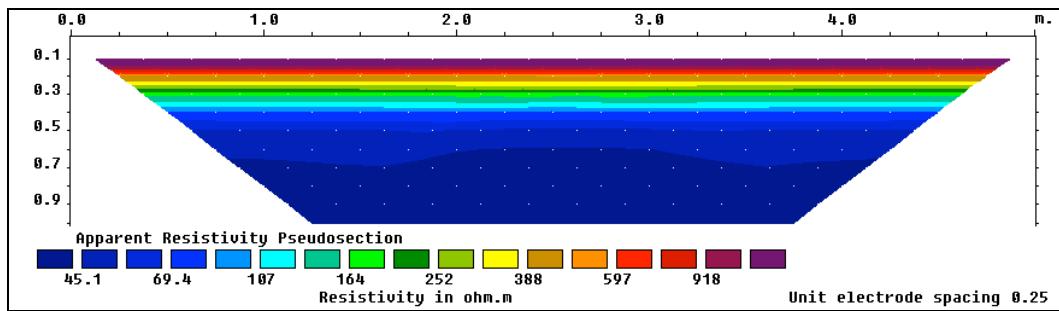


Figure C.2.4. Pseudo section de résistivité apparente calculée pour une cavité dans le haut de la fondation en dipôle-dipôle équatorial.

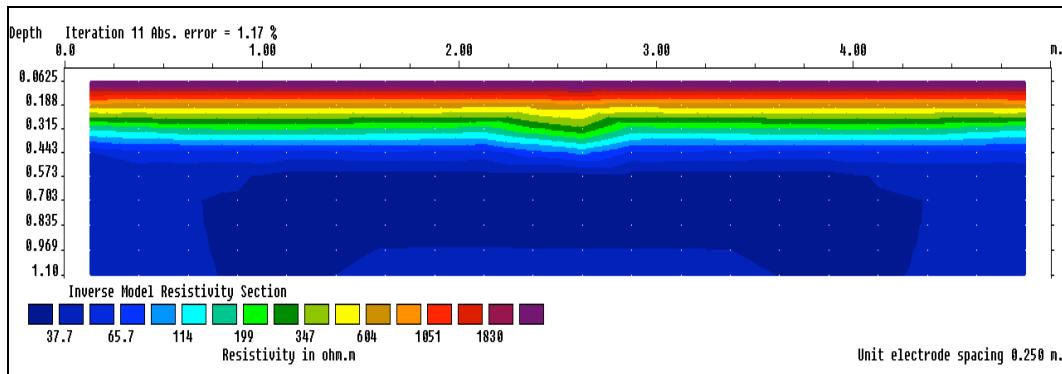


Figure C.2.5. Résultats après inversion pour une cavité dans le haut de la fondation en dipôle-dipôle équatorial.

### Observations

Pour une cavité de 10cm par 10cm, le dipôle-dipôle montre un faible contraste et l'équatorial est presque insensible à la cavité.

### Radar

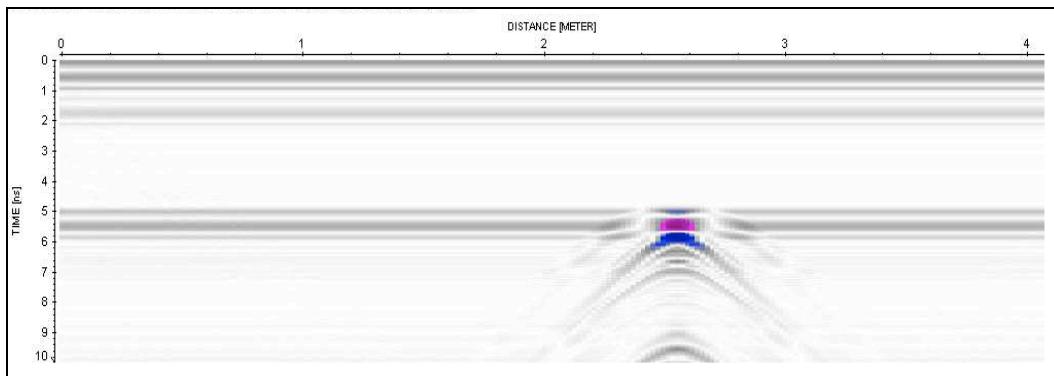


Figure C.2.6. Réponse GPR à 1GHz d'une cavité dans le haut de la fondation de 10cm de côté.

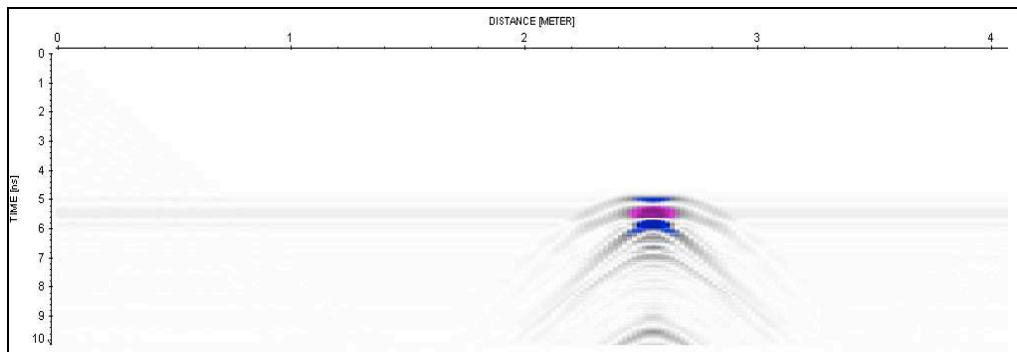


Figure C.2.7. Réponse GPR à 1GHz d'une cavité dans le haut de la fondation de 10cm de côté sans le background.

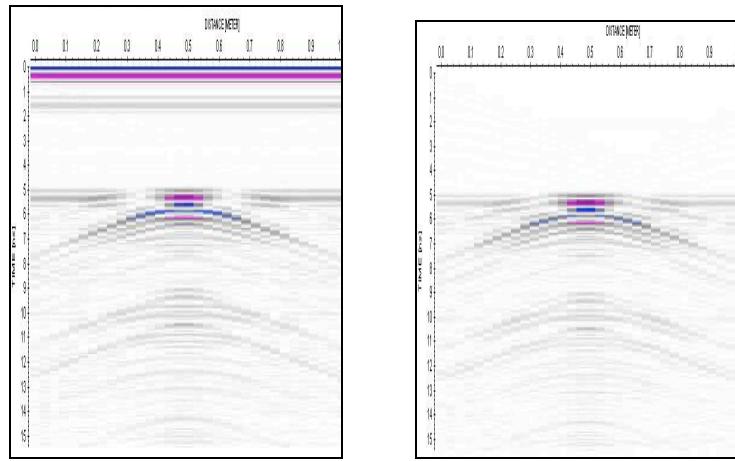


Figure C.2.8. Réponse GPR à 1.5GHz d'une cavité dans le haut de la fondation de 10cm de côté avec background (à gauche) et sans background (à droite).

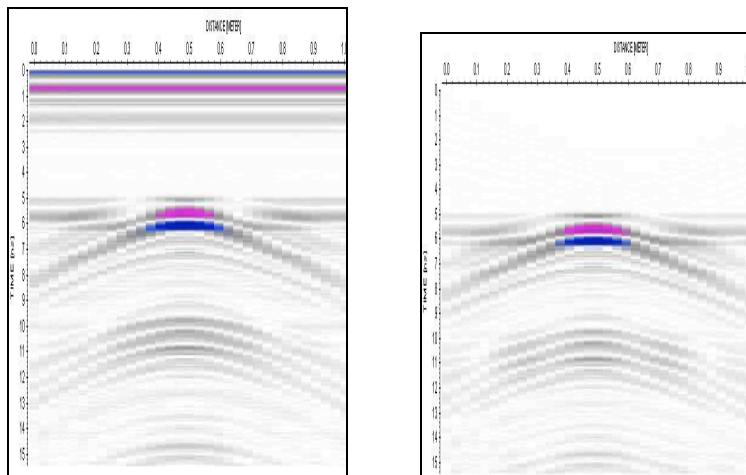


Figure C.2.8. Réponse GPR à 800MHz d'une cavité dans le haut de la fondation de 10cm de côté avec background (à gauche) et sans background (à droite).

### Observations

Contrairement à l'électrique, le radar peut donner une image des petites cavités même pour les cavités situées dans le fond, avec une forte atténuation pour l'antenne de 1.5Ghz. Toutefois dans la plupart des cas réels, l'hétérogénéité des fondations granulaires et les bruits parasites ambiant empêche un bon ratio signal sur bruit pour les petits artefacts en fond de fondation.

### 3/Cavité dans le haut de la fondation remplie d'eau

#### Electrique

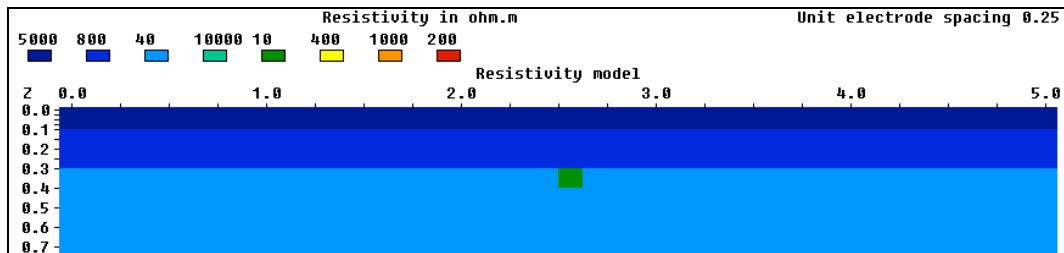


Figure C.3.1. Modèle de électrique d'une cavité remplie d'eau dans le haut de la fondation de 10cm de côté et située à 2.5m

#### Dipôle-Dipôle Aligné :

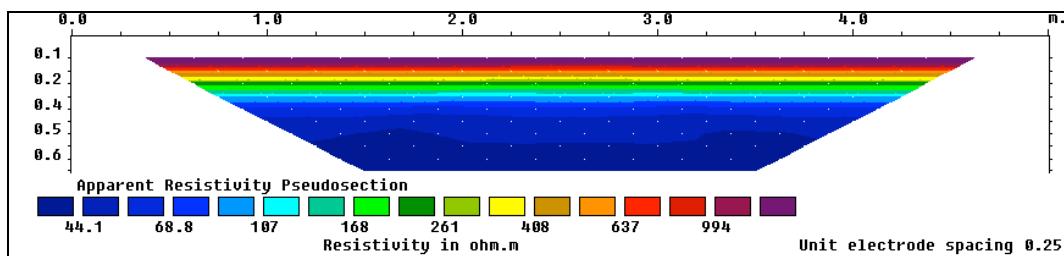


Figure C.3.2. Pseudo section de résistivité apparente calculée pour une cavité remplie d'eau dans le haut de la fondation en dipôle-dipôle aligné.

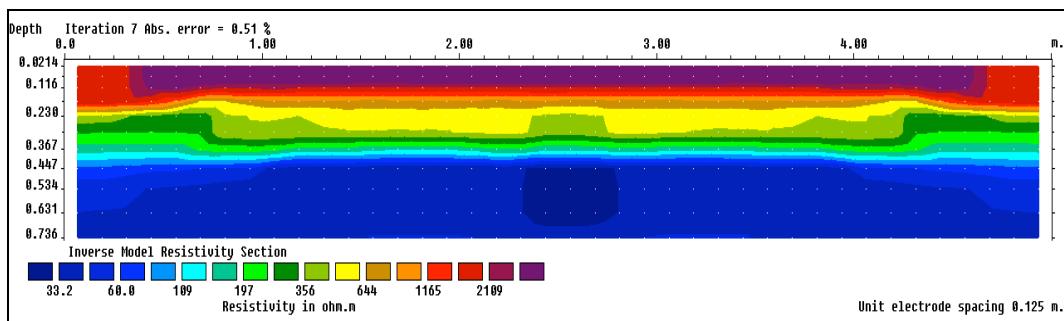


Figure C.3.3. Résultats après inversion pour une cavité remplie d'eau dans le béton en dipôle-dipôle alignés.

### Dipôle-dipôle équatorial

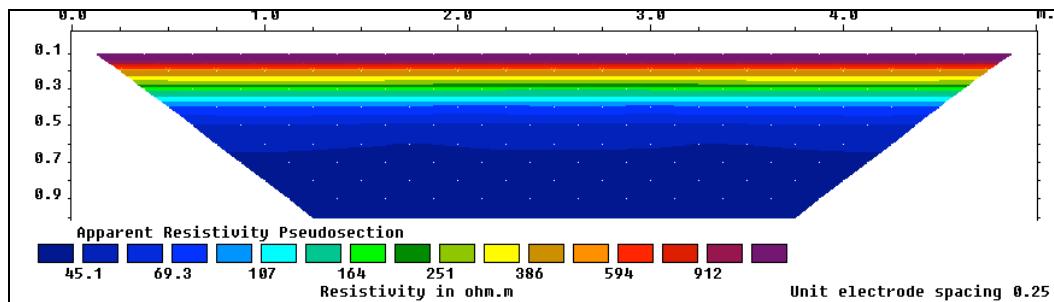


Figure C.3.4. Pseudo section de résistivité apparente calculée pour une cavité remplie d'eau dans le haut de la fondation en dipôle-dipôle équatorial.

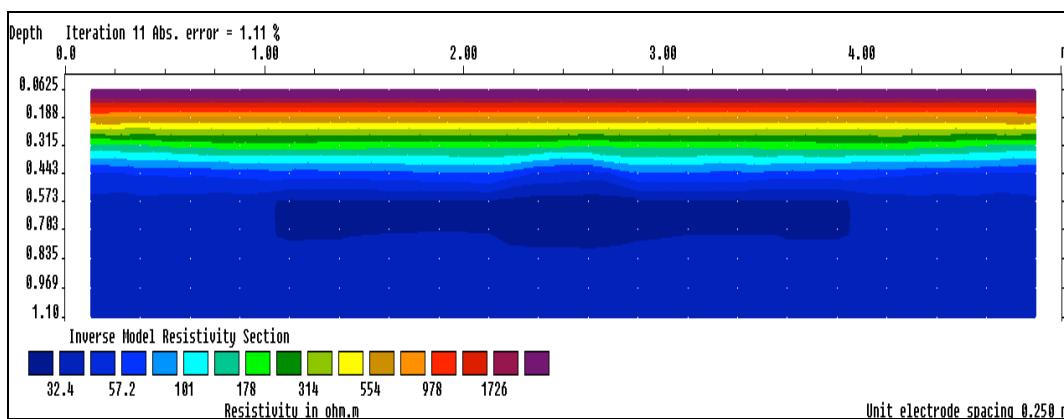


Figure C.3.5. Résultats après inversion pour une cavité remplie d'eau dans le haut de la fondation en dipôle-dipôle équatorial.

### Observations

Le contraste de résistivité est encore moins grand avec une cavité remplie d'eau qu'avec une cavité remplie d'air. On n'observe rien qui pourrait se dissocier nettement d'artefacts résiduels de l'inversion.

### Radar

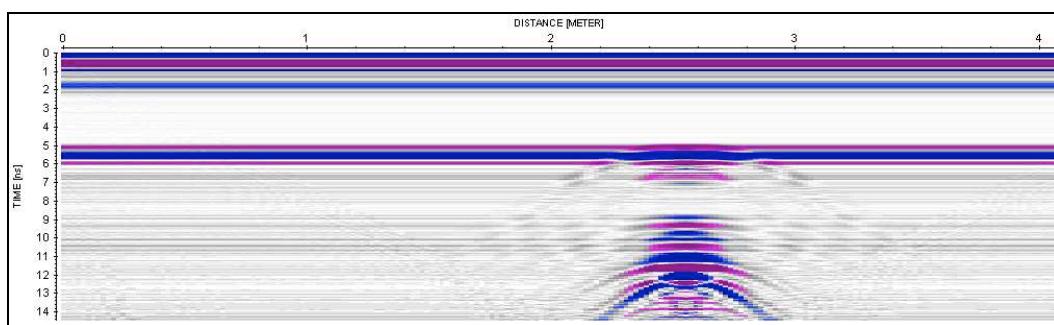


Figure C.3.6. Réponse GPR à 1GHz d'une cavité remplie d'eau dans le haut de la fondation de 10cm de côté.

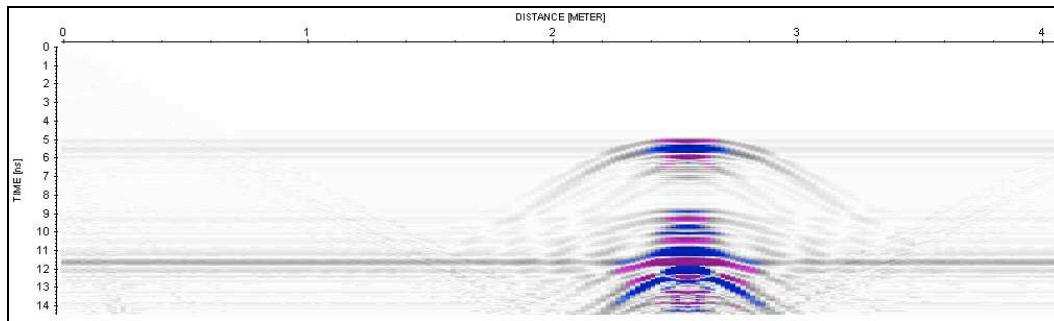


Figure C.3.7. Réponse GPR à 1GHz d'une cavité remplie d'eau dans le haut de la fondation de 10cm de côté sans le background.

### Observations

Le traitement pour pouvoir observer la cavité est de plus en plus long et l'ajout de gain permettant de voir les hyperboles fait aussi apparaître des réflexions parasites. Ce qui montre, d'une certaine façon, l'atténuation due à la fondation granulaire saturée. Toutefois le GPR continue de montrer une bonne détectabilité de la cavité. Contrairement à l'électrique où l'ajout d'eau dans la cavité diminue le contraste de résistivité, le contraste de permittivité est augmenté par l'ajout d'eau dans la cavité et il y a ainsi une augmentation du coefficient de réflexion de l'onde EM.

### **4/Discussion sur les cavités dans la fondation**

Les tests portant sur des cavités dans la fondation effectués en modélisation électrique et radar conjointement sont :

- Cavité en haut de la fondation remplie d'air.
- Cavité en haut de la fondation remplie d'eau.
- Cavité au milieu de la fondation remplie d'air.
- Cavité au milieu de la fondation remplie d'eau.
- Cavité en bas de la fondation remplie d'air.
- Cavité en bas de la fondation remplie d'eau.

A part les temps d'arrivée, après traitement, les tests présentent tous les mêmes caractéristiques que celles présentées précédemment dans les cas d'une cavité dans le haut de la fondation (remplie d'air puis d'eau). On discute dans cette partie des remarques pouvant être faites d'après

les résultats de la modélisation numérique concernant la détectabilité des cavités dans la fondation avec les méthodes électriques et radar.

### Influence de la position de la cavité

Plus la cavité est profonde, moins elle est détectable. En ce qui concerne l'électrique, il faut soit que le contraste augmente soit que la taille augmente pour pouvoir observer quelque chose. Au niveau du radar, elle est théoriquement détectable pour toutes les fréquences observées à toutes les profondeurs mais on observe une atténuation plus forte dans la fondation que dans les couches supérieures ce qui impose un traitement de données constitué d'une forte augmentation de gain. On suppose que la probabilité que ce type de défaut soit détecté en situation réelle est faible.

### Différences entre les cavités remplies d'eau et celles remplies d'air

Au niveau du radar, théoriquement, on peut voir grâce aux hyperboles de diffraction que la vitesse de l'onde dans la cavité est correspondante soit à la vitesse d'une onde EM dans l'air, soit à la vitesse d'une onde EM dans l'eau. Techniquement, pour des cavités de la taille de celles que l'on souhaite observer ici, cette différence est peu visible. Dans le cas d'expériences réelles, il est encore moins probable que l'on puisse observer ce genre de phénomène surtout en présence de bruit dans la chaussée.

L'électrique est soumis aux contrastes de résistivité électrique. Dans le cas des valeurs utilisées pour la modélisation, la méthode électrique est plus à même de détecter les cavités remplies d'air que les cavités remplies d'eau, car les cavités remplies d'eau ont une résistivité proche de celle de la fondation saturée. Comme la résistivité de la glace s'apparente à celle de l'air, les futures modélisations permettront de déterminer plus en détails la capacité de la méthode électrique.

Après réflexion, la taille des cavités considérées n'est pas nécessairement associée à la réalité. Une cavité peut être critique pour la capacité portante de la chaussée lorsqu'elle atteint environ un demi mètre (valeur approximative, sans considération d'autres paramètres pouvant influencer la capacité portante). Les tests réalisés dans le cas de l'évaluation du profil de la teneur en eau seront réfléchis en fonction de cette remarque et la taille minimale d'une cavité remplie d'air ou d'eau détectable dans une chaussée non saturée ou saturée, reste à déterminer.

Par ailleurs, on pourrait supposer que l'infiltration d'eau due à une fuite dans une conduite située dans la fondation est peu probablement détectée sauf quand elle atteint une taille considérable (sous réserve de modélisations à réaliser pour réponse de façon concrète à cette question).

## D.Défauts divers

### 1/Changement de dalle : de plus conducteur à moins conducteur :

#### Electrique

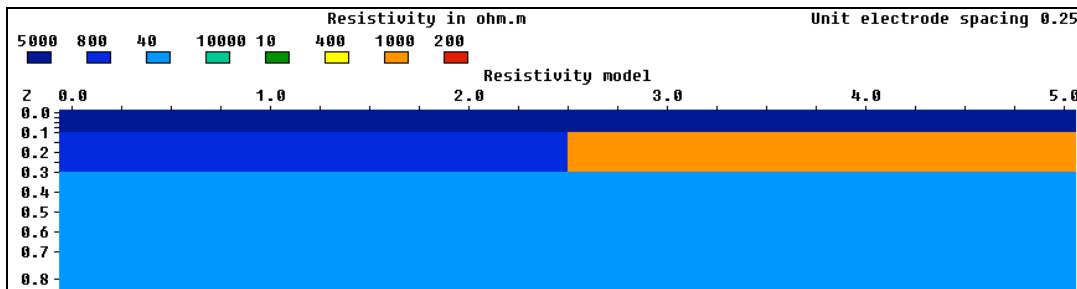


Figure D.1.1. Modèle électrique du passage à une dalle plus résistante.

#### Dipôle-dipôle aligné

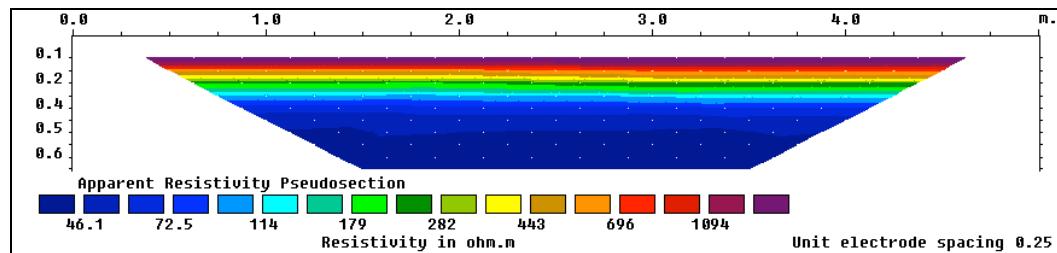
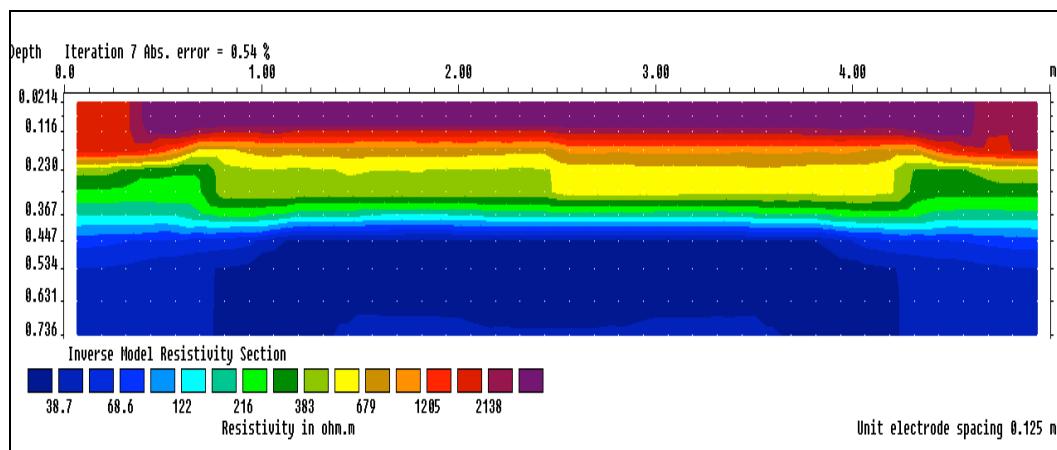


Figure D.1.2. Pseudo section de résistivité apparente du passage à une dalle plus résistante en dipôle-dipôle alignés



Elec38Figure D.1.3. Résultats après inversion du passage à une dalle plus résistante en dipôle-dipôle aligné

### Dipôle-Dipôle Equatorial

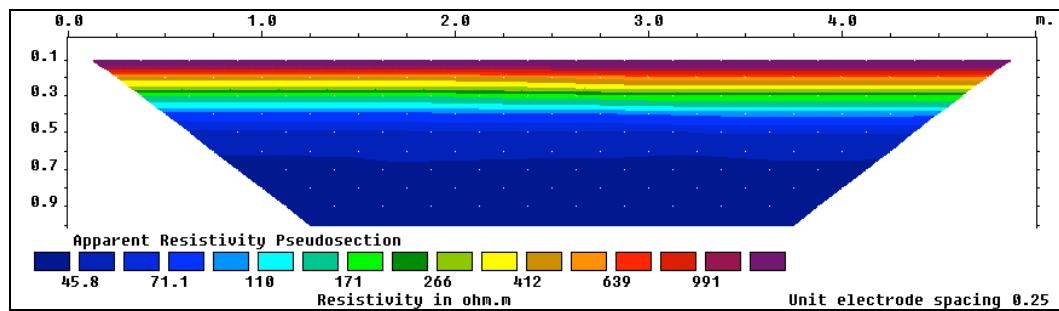


Figure D.1.4. Pseudo section de résistivité apparente du passage à une dalle plus résistante en dipôle-dipôle équatorial.

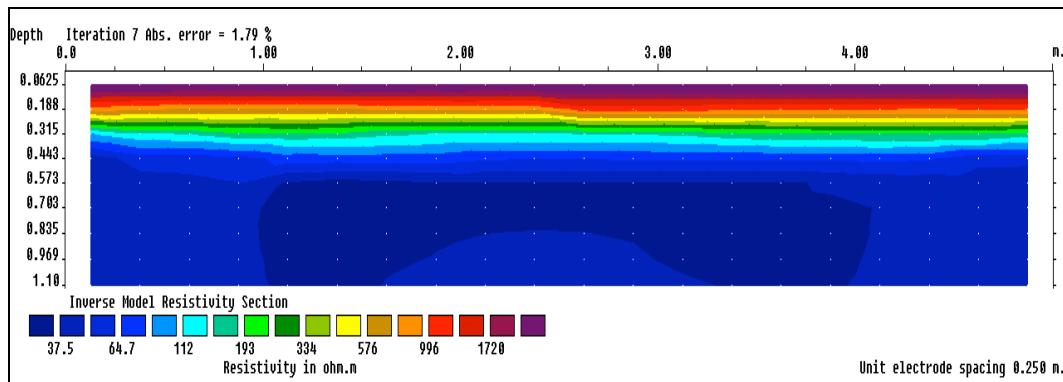


Figure D.1.5. Résultats après inversion du passage à une dalle plus résistante en dipôle-dipôle équatorial.

### Observations

La variation est correctement observée uniquement avec le dipôle-dipôle aligné.

### Radar

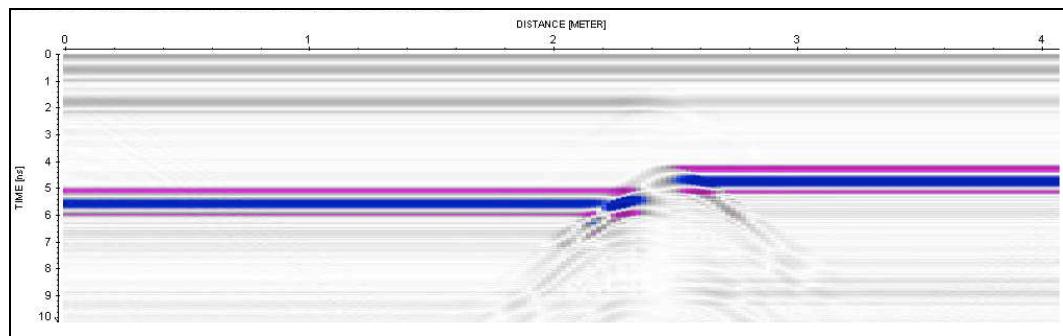


Figure D.1.6. Réponse GPR 1GHz du passage à une dalle plus résistante

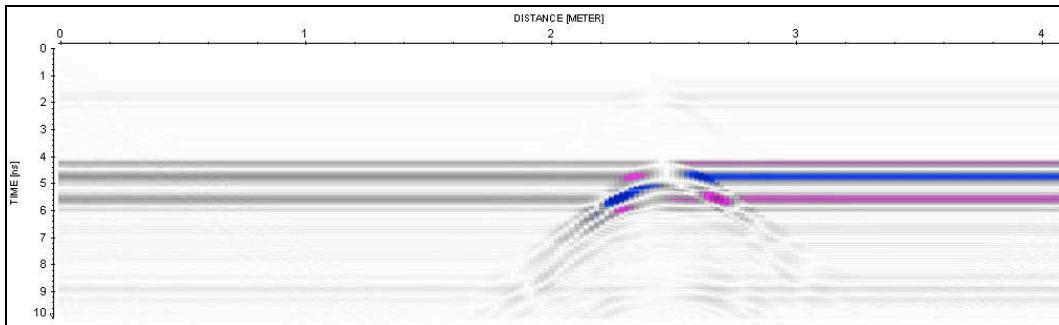


Figure D.1.7. Réponse GPR 1GHz du passage à une dalle plus résistante sans le background

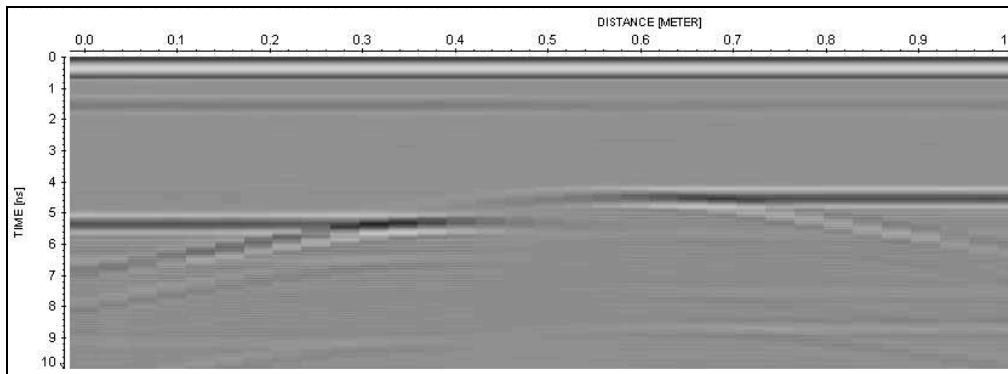


Figure D.1.8. Réponse GPR 1.5GHz du passage à une dalle plus résistante

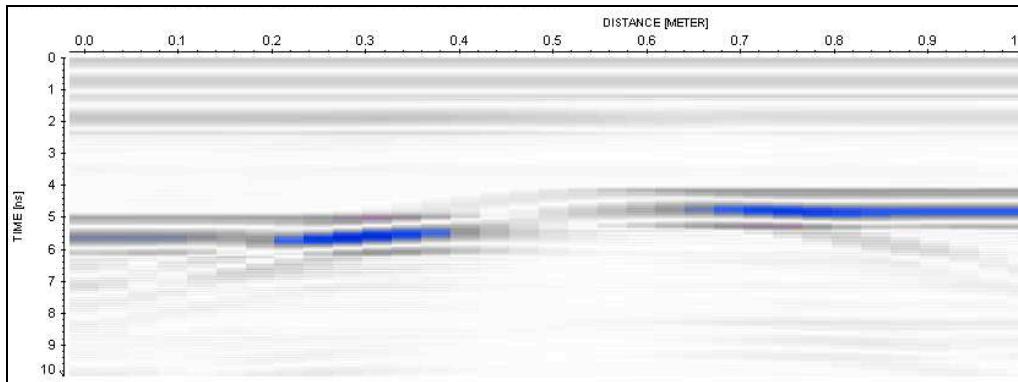


Figure D.1.9. Réponse GPR 800MHz du passage à une dalle plus résistante

### Observations

Dans ce cas, faire une observation sans le background pourrait induire en erreur. Sur l'image radar à 1GHz, on peut observer une variation de l'amplitude au passage du contact entre les 2 bétons. On observe bien le phénomène de variation de vitesses du à la variation de permittivité. Dans ce genre de situation, on remarque aussi que l'électrique permet de considérer ce cas comme un changement de matériau et non comme un changement d'épaisseur de la dalle de béton.

## 2/De moins conducteur à plus conducteur

### Electrique

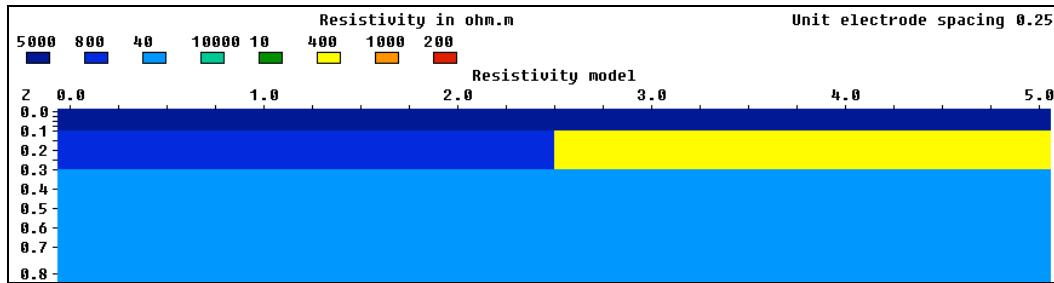


Figure D.2.1. Modèle électrique du passage à une dalle moins résistante.

### Dipôle-Dipôle aligné

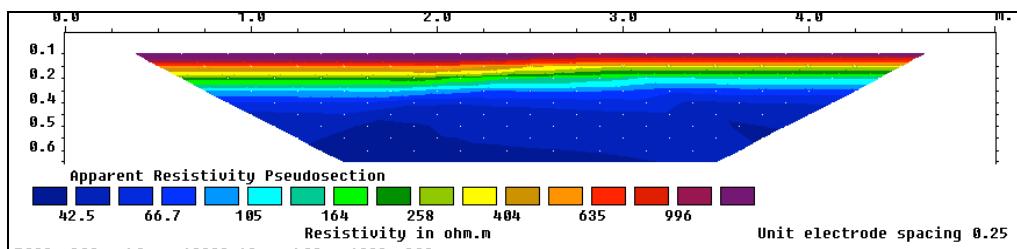


Figure D.2.2. Pseudo section de résistivité apparente du passage à une dalle moins résistante en dipôle-dipôle alignés

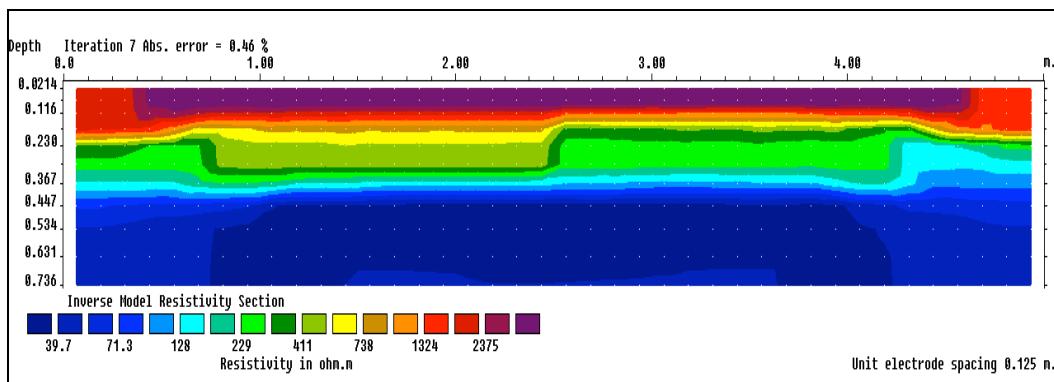


Figure D.2.3. Résultats après inversion du passage à une dalle moins résistante en dipôle-dipôle alignés

### Dipôle-dipôle Equatorial

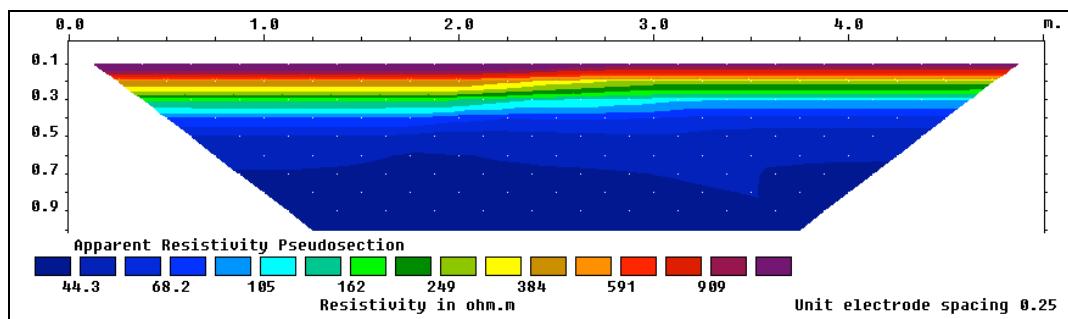


Figure D.2.4. Pseudo section de résistivité apparente du passage à une dalle moins résistante en dipôle-dipôle équatorial.

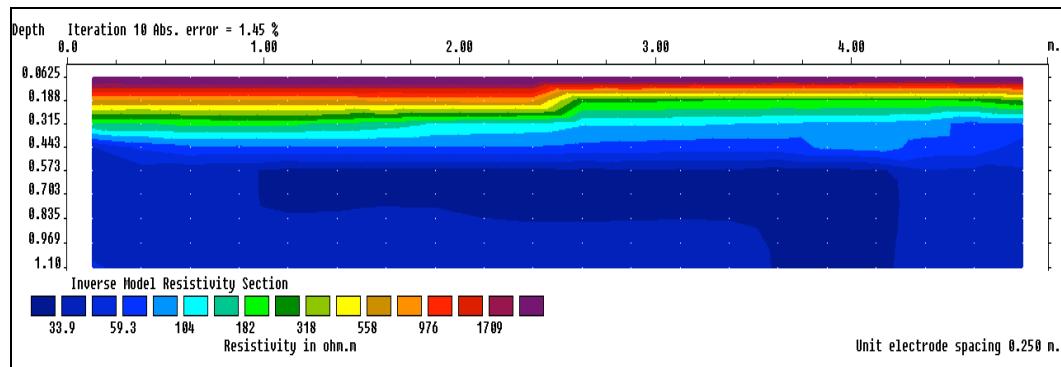


Figure D.2.5. Résultats après inversion du passage à une dalle moins résistante en dipôle-dipôle équatorial.

### Radar

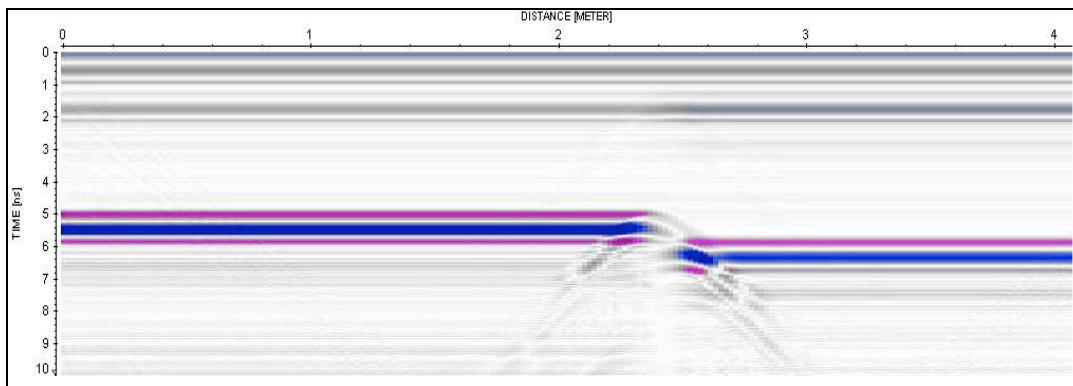


Figure D.2.6. Réponse GPR 1GHz du passage à une dalle moins résistante

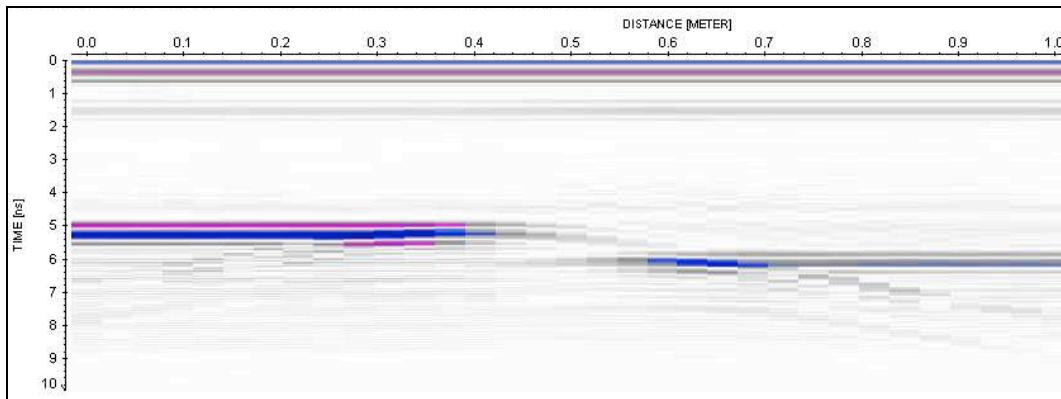


Figure D.2.7. Réponse GPR 1.5GHz du passage à une dalle moins résistante

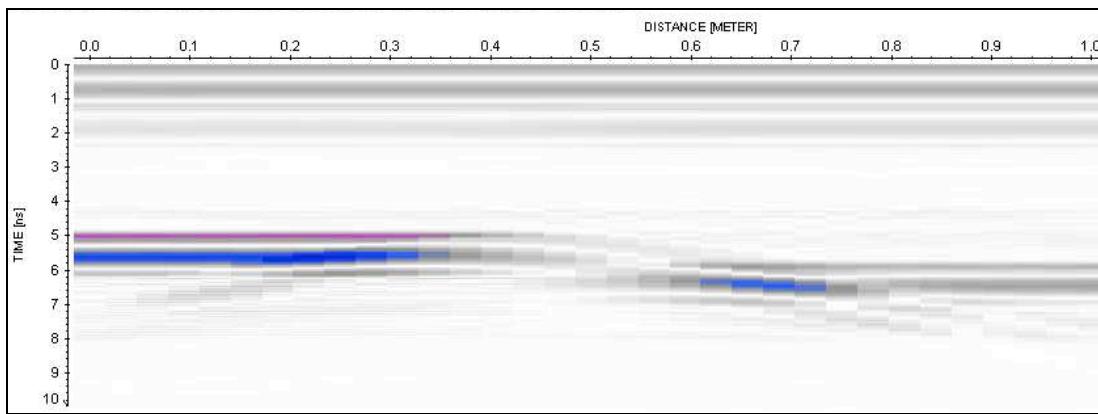


Figure D.2.8. Réponse GPR 800MHz du passage à une dalle moins résistante

### Observations

Les remarques sont les mêmes que pour le passage inverse. Cette modélisation est faite surtout pour vérifier la réciprocité.

### **3/Test objet métallique**

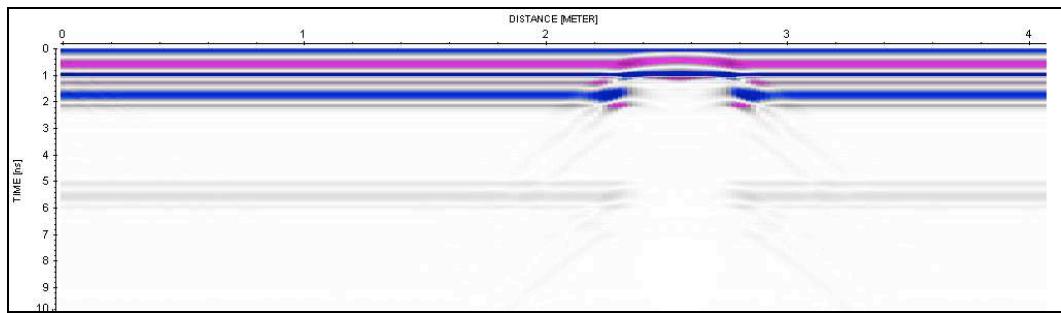


Figure D.3.1. Réponse GPR 1GHz au passage d'un plaque métallique 25cm de long et 3cm d'épaisseur.

### Observations :

On ne présente que la modélisation radar car l'inversion électrique est instable pour un objet très conducteur tel qu'une plaque de métal. La présence d'un objet métallique va empêcher toute auscultation radar de la chaussée en dessous de lui.

### 4/Nid de poule

#### Électrique

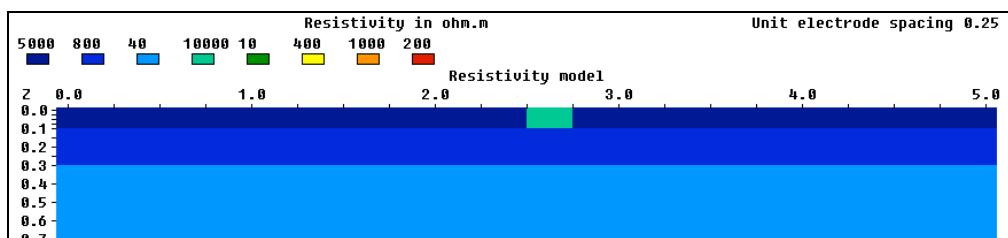


Figure D.4.1. Modèle électrique de la présence d'un nid de poule.

#### Dipôle-dipôle aligné

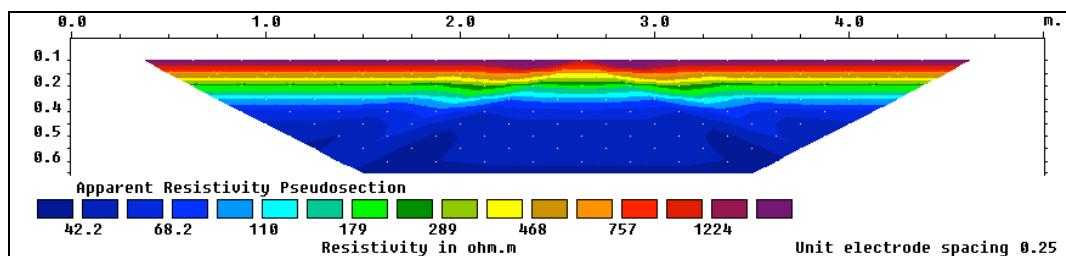


Figure D.4.2. Pseudo section de résistivité apparente d'un nid de poule en dipôle-dipôle alignés

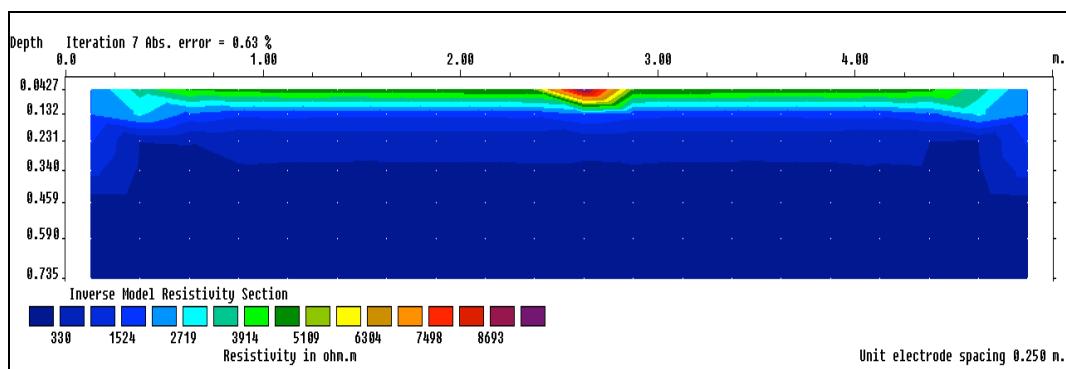


Figure D.4.3. Résultats après inversion du passage à une dalle moins résistante en dipôle-dipôle alignés.

### Dipôle-dipôle équatorial

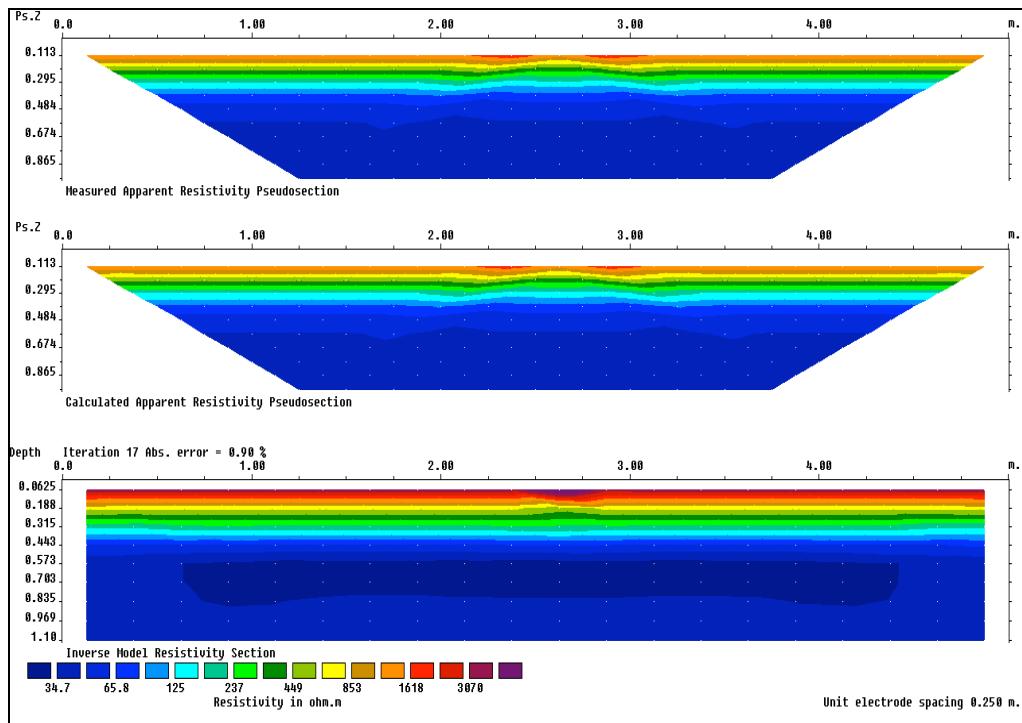


Figure D.4.4. Résultats après inversion de la réponse à un nid de poule en dipôle-dipôle équatorial (en haut: pseudo section modélisés, milieu: pseudo section calculée, en bas: résultats d'inversion).

### Observations

Le nid de poule n'est pas visible en modélisation de la méthode électrique. Dans la réalité, cela ne pose pas un gros problème car il est observable. Toutefois, cela signifie qu'il faut absolument une évaluation visuelle en parallèle de l'observation électrique pour un diagnostic le plus complet possible.

### Radar

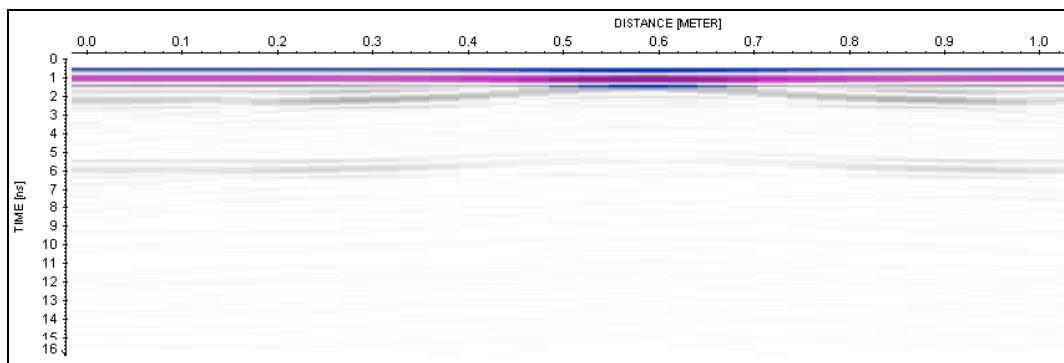


Figure D.4.5. Réponse GPR 1GHz au passage d'un nid de poule de 25cm de long.

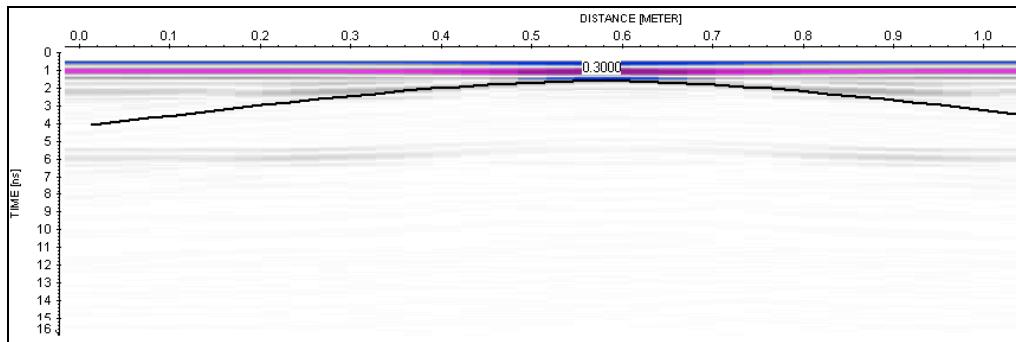


Figure D.4.6. Réponse GPR 1GHz au passage d'un nid de poule de 25cm de long avec vitesse.

### Observations

On voit une variation de l'interface asphalte/béton. L'hyperbole observée donne après traitement une vitesse correspondante à celle de l'air, ce qui est logique. La présence d'un nid de poule a une influence sur les temps d'arrivée.

## 5/Délamination entre l'asphalte et le béton

### Electrique

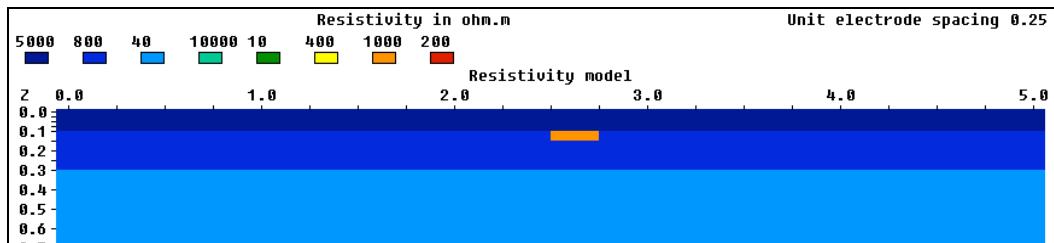


Figure D.5.1. Modèle électrique de la présence de délamination.

### Dipôle-dipôle aligné

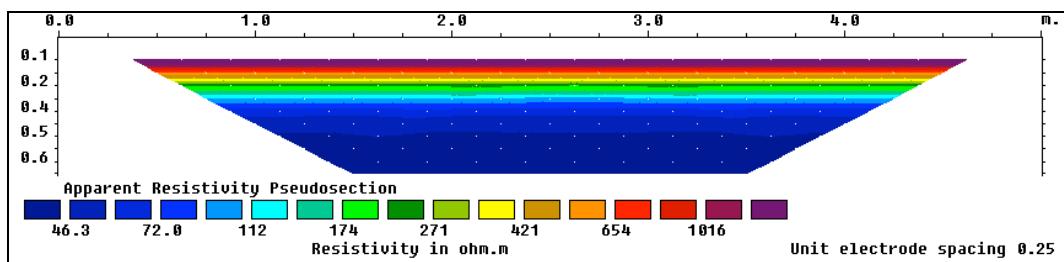


Figure D.5.2. Pseudo section de résistivité apparente d'une délamination de 25cm de long en dipôle-dipôle alignés.

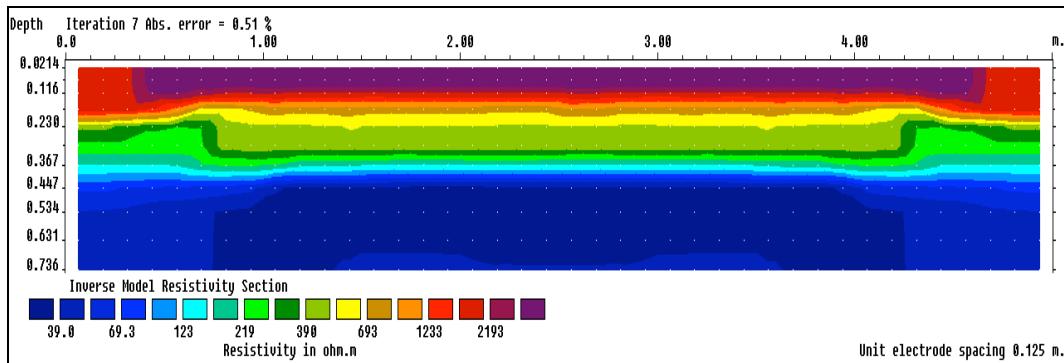


Figure D.5.3. Résultats après inversion d'une délamination de 25cm de long en dipôle-dipôle alignés.

### Dipôle-dipôle équatorial

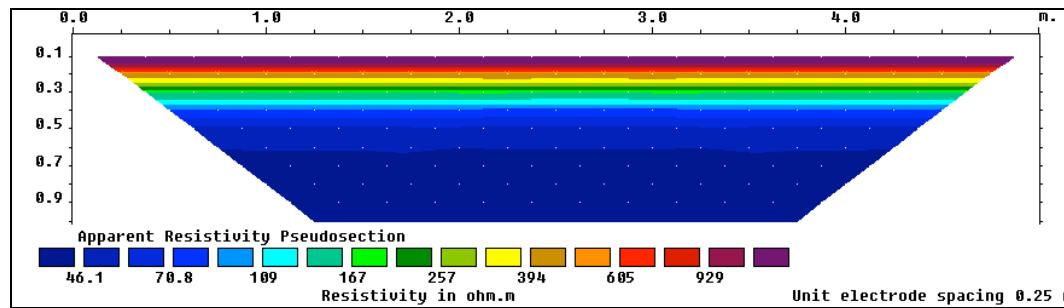


Figure D.5.4. Pseudo section de résistivité apparente d'une délamination de 25cm de long en dipôle-dipôle équatorial.

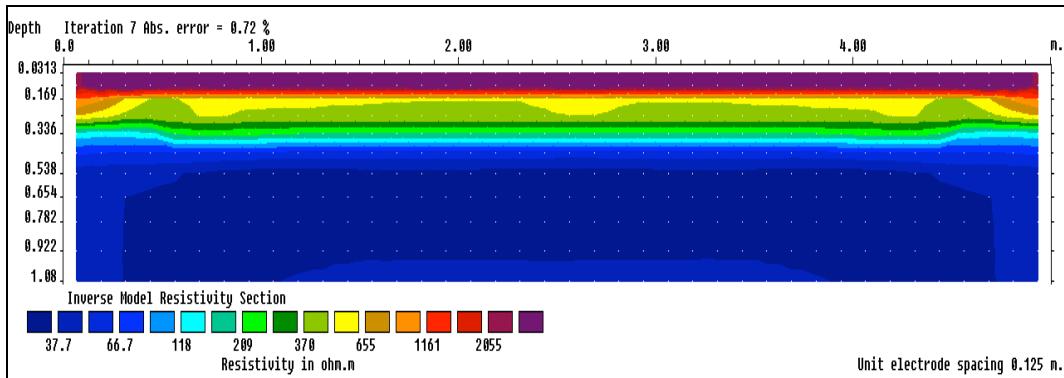


Figure D.5.5. Résultats après inversion d'une délamination de 25cm de long en dipôle-dipôle équatorial.

### Observations

Pas d'observation possible pour cette dimension de délamination et ce contraste de résistivité.

## Radar

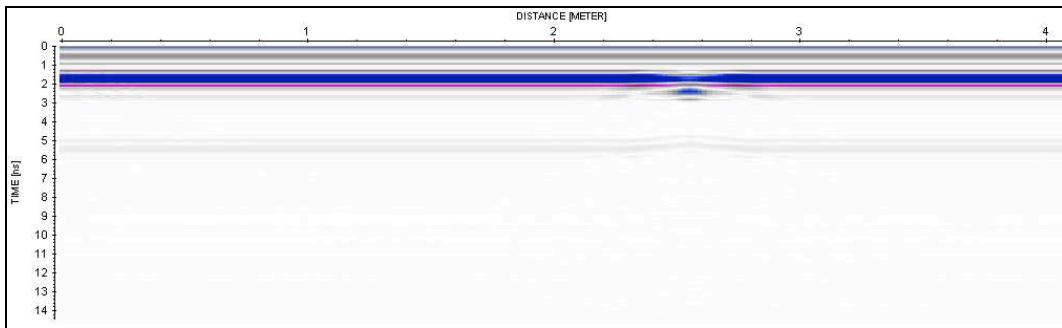


Figure D.5.6. Réponse GPR 1GHz pour observer une délamination de 25cm de long.

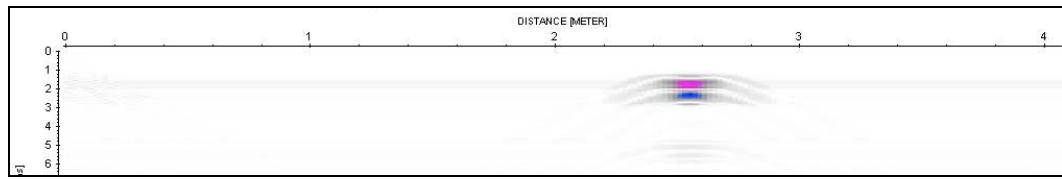


Figure D.5.7. Réponse GPR 1GHz pour observer une délamination de 25cm de long sans background.

## Observations

La délamination en surface du béton peut être observée avec le radar.

La modélisation réalisée dans le cas d'une délamination à l'interface béton/fondation fournit des résultats similaires.

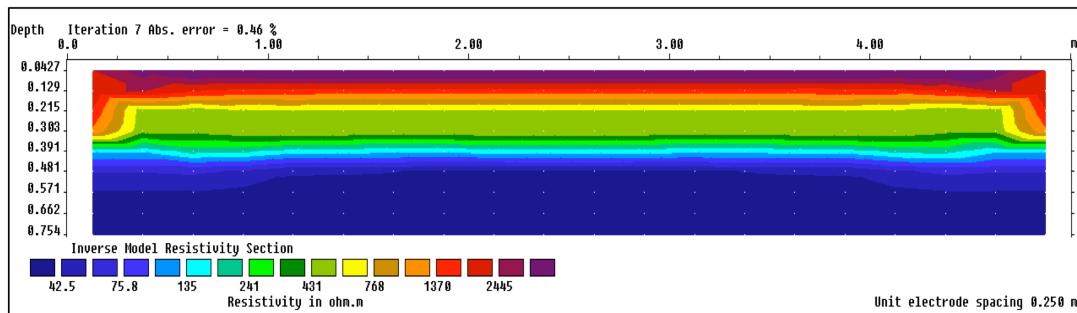
## E.SATURATION

Pour alléger la présentation, ces résultats sont ceux montrés lors de la conférence de l'AHQ (Association des Hydro-géophysiciens du Québec) du 11 septembre 2009. On y présente 3 modèles géométriques différents pour évaluer l'imagerie obtenue lors de l'étude du profil de la teneur en eau dans la fondation. Les valeurs de propriétés diélectriques sont les même que celles des modélisations précédentes.

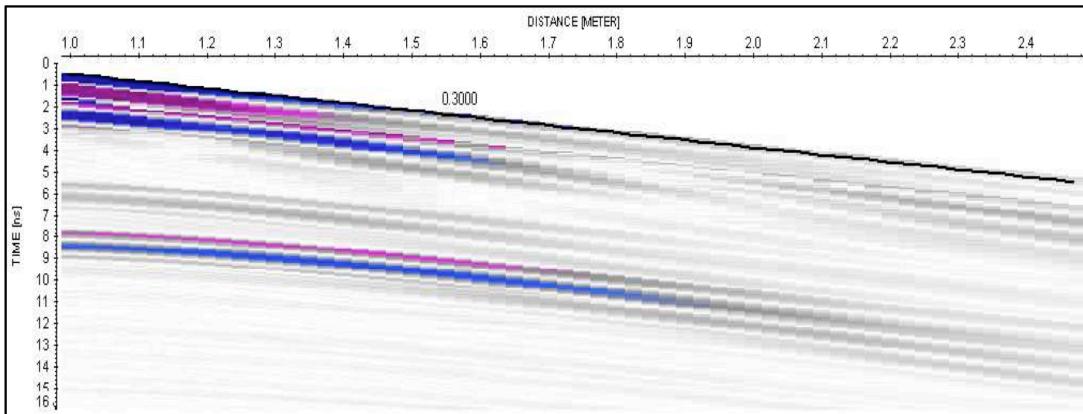
### 1/Profil uniforme :



*E.1.1. Modèle géométrique pour un profil uniforme.*

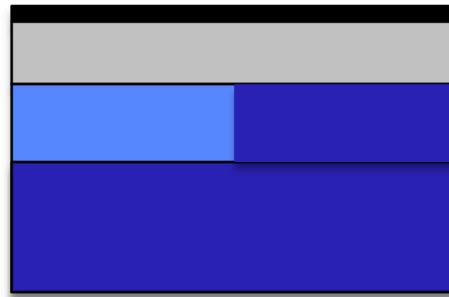


*E.1.2 . Inversion pour un dipôle-dipôle aligné.*

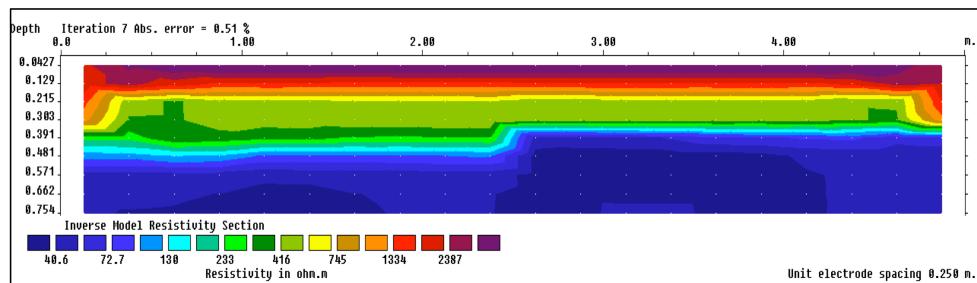


E.1.3 . Réponse radar en WARR 1GHz.

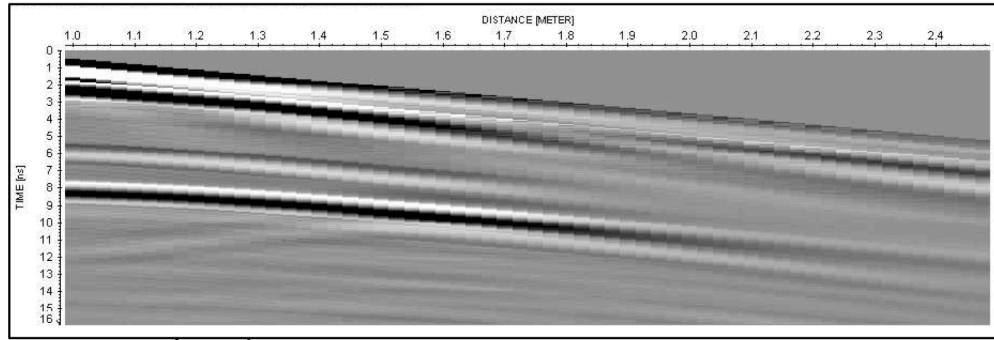
## 2/Variation du profil



E.2.1.Modèle géométrique.

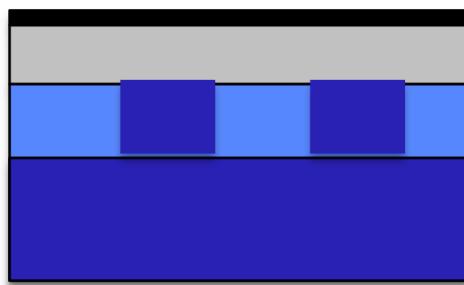


E.2.2 . Inversion pour un dipôle-dipôle aligné.

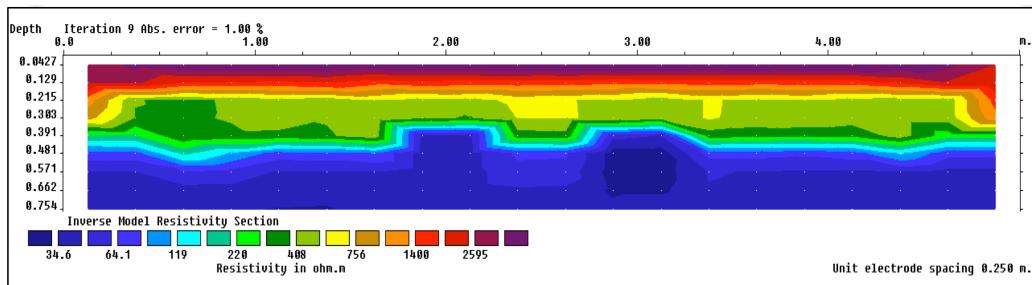


E.2.3 . Réponse radar en WARR 1GHz.

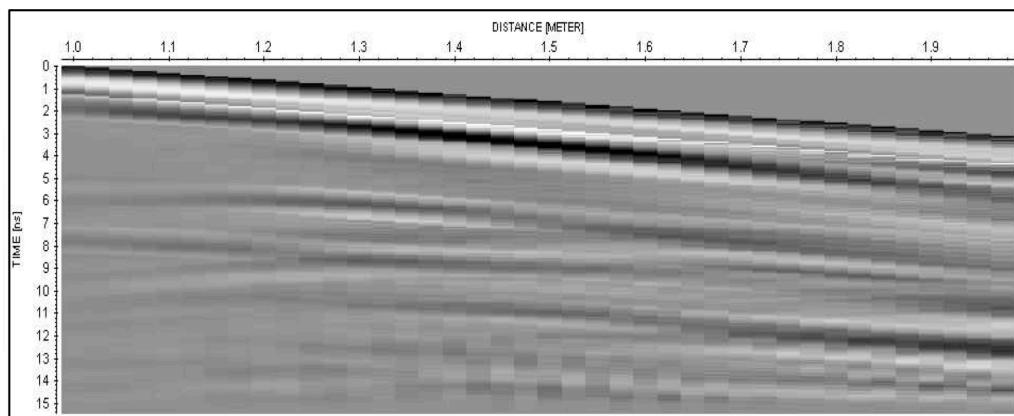
### 3/Profil en créneaux de 20cm



E.3.1.Modèle géométrique.



E.3.2 . Inversion pour un dipôle-dipôle aligné.



E.3.3 . Réponse radar en WARR 1GHz.

## F. Notes

Bien qu'elle couvre un large champ de défauts structuraux, la modélisation ci-présente est limitée par de nombreux facteurs autant techniques (limitations dues au logiciel) que sur un point de vue de réflexion. Les notes ci-après peuvent être utilisées comme mémo pour la poursuite du projet.

- l'extension de l'anomalie engendrée par les défauts observés dans le cas du radar est visible sur un mètre au maximum. Une modélisation sur 4 mètres est donc inutile pour l'observation d'un défaut. On peut en déduire que si les défauts sont espacés d'un mètre on pourra les observer très nettement via la modélisation tout du moins.

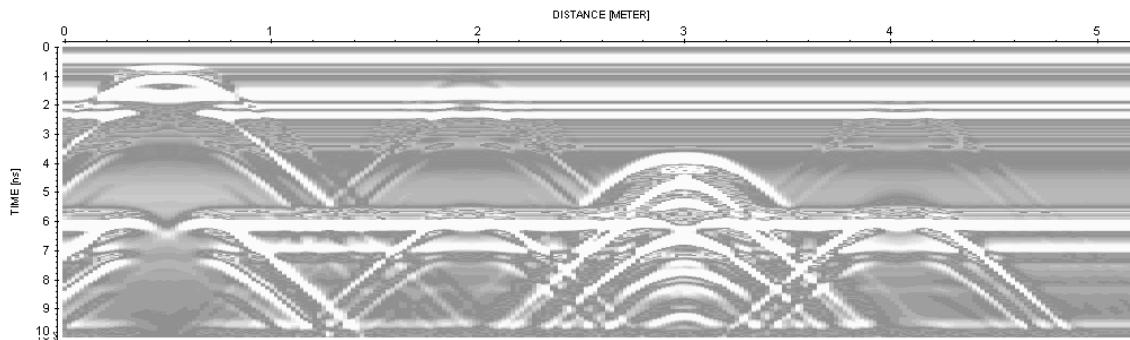


Figure F.1. Modélisation GPR à 1GHz de 4 défauts positionnés tous les mètres. De gauche à droite : plaque métallique, fissure de 2cm aérée dans l'asphalte, cavité dans le béton, fissure dans le béton.

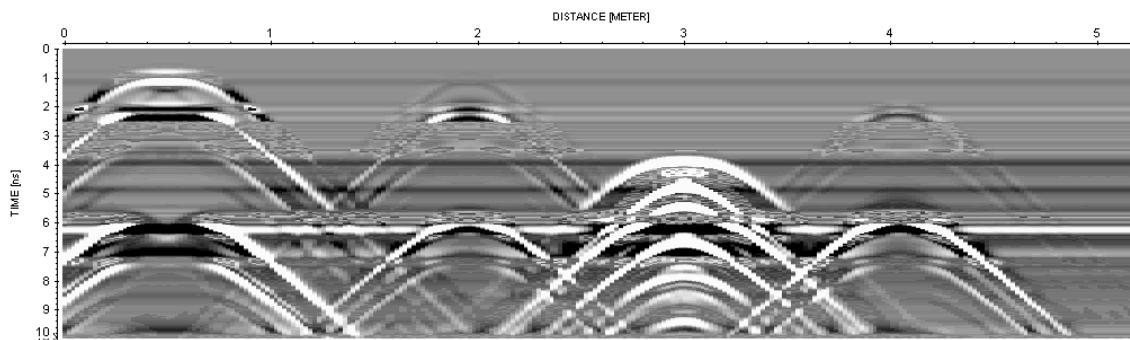
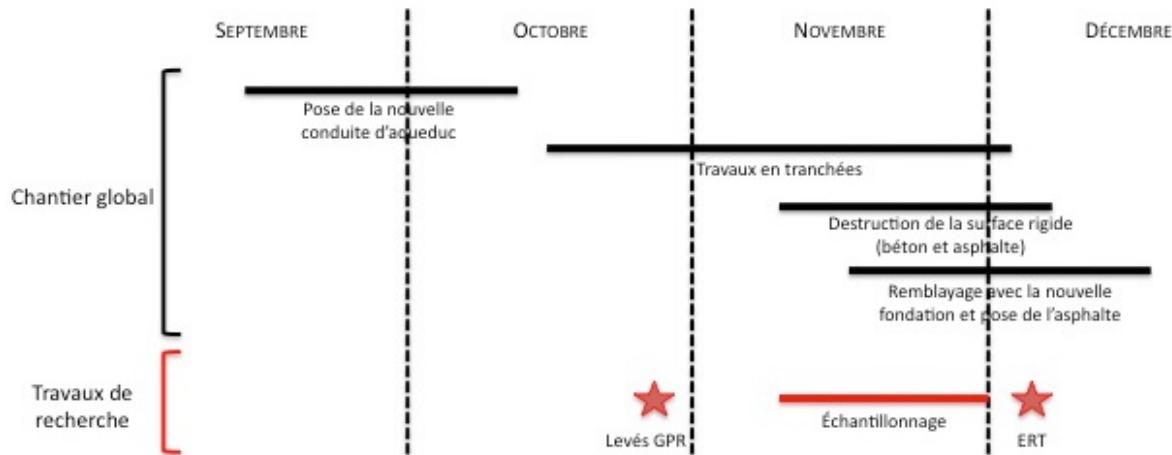


Figure F.2. Modélisation GPR à 1GHz de 4 défauts positionnés tous les mètres sans background. De gauche à droite : plaque métallique, fissure de 2cm aérée dans l'asphalte, cavité dans le béton, fissure dans le béton.

- Le problème de cavités dans la fondation est dans la pratique souvent lié à la teneur en eau dans la fondation. L'étude axée sur la détermination du profil de la teneur en eau permettra donc de compléter l'étude sur les cavités.
- Les défauts étudiés ici ne sont pas nécessairement d'une taille correspondant aux réalités du terrain. Il faudrait faire la différence entre la question « quelle est la taille minimale observable ? » et « A partir de quelle dimension de défaut est-ce que j'ai réellement besoin d'observer et avec quelle marge d'erreur ? ».
- Il faut garder en tête que les géométries sont simplifiées au maximum et qu'on travaille avec l'hypothèse de milieux homogènes.

## ANNEXE 2 - Chronologie des travaux



*Schéma global récapitulatif des travaux.*

Les travaux ont été réalisés à l'Automne 2009. Le bon déroulement du chantier implique que plusieurs actions doivent être effectuées en même temps par différentes équipes de travail. La chronologie précédente montre l'enchaînements des travaux sur la totalité de la de chaussée en rénovation. En fonction du déroulement des travaux sur les 40 mètres auscultés, la chronologie détaillée concernant les travaux de recherche est la suivante:

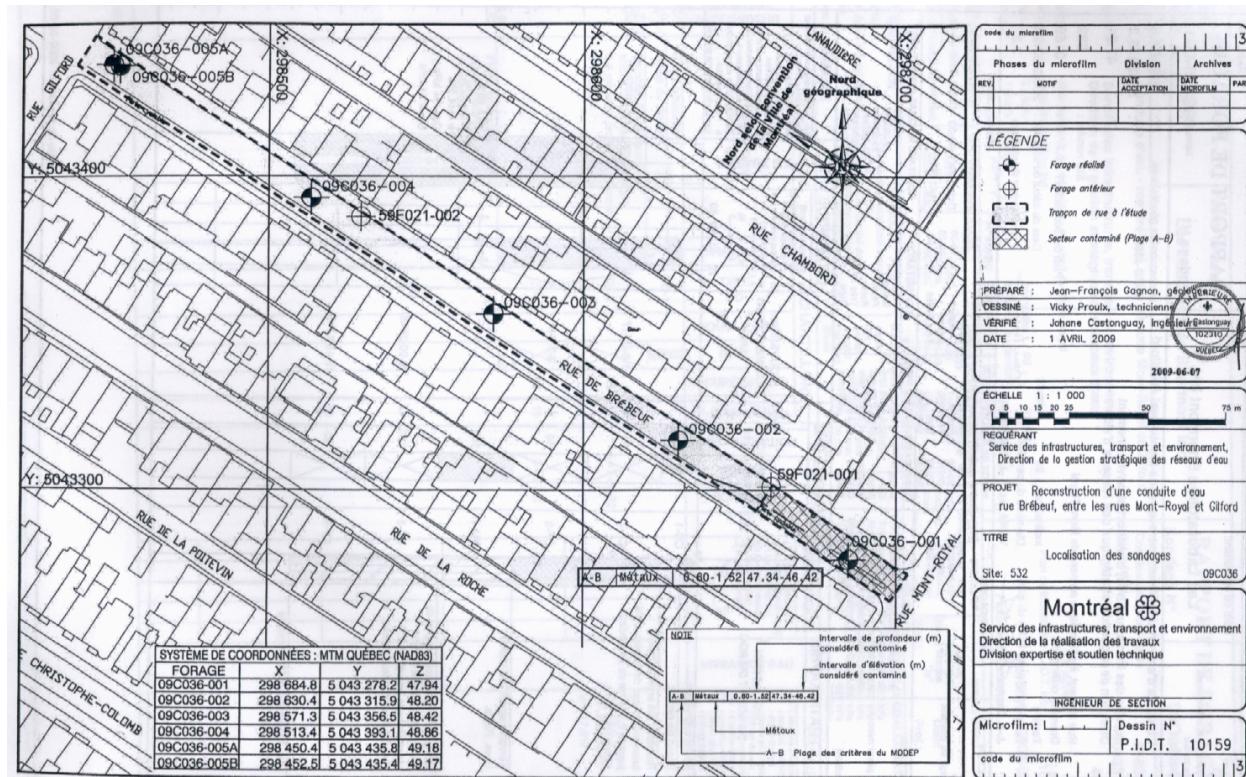
- Nouvelle conduite d'aqueduc posée en septembre
- Levés GPR le 27 octobre.
- Échantillonnage lors des travaux en chantier du 8 novembre au 18 novembre.
- Échantillonnage lors de la destruction de la dalle du 18 novembre au 20 novembre.
- Mesures ERT sur une portion de chaussée reconstruite en chaussée souple le 2 décembre.

Les mesures ERT ont été réalisées sur une partie de chaussée plus avancée que celle où les levés GPR ont été faits. En effet, cette portion de chaussée n'aurait pas pu être auscultée sans perturber le travail des ouvriers sachant que l'asphalte a été posé juste après le compactage de la nouvelle fondation (le 15 et le 16 décembre).

## ANNEXE 3 - Données techniques

Ci après, les rapports géotechniques et d'excavation fournis par la Ville de Montréal et le contremaître du chantier:

- Plan des forages réalisés en Avril 2009
- Rapport de forage pour les forages 1, 2 et 3 (les plus proches de la section sur laquelle les levés GPR ont été faits).
- Analyse granulométrique pour les forages 2 et 3 (l'analyse n'a pas été communiquée pour le forage 1).
- Plan des conduites de gaz.



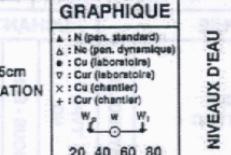
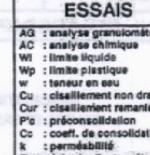
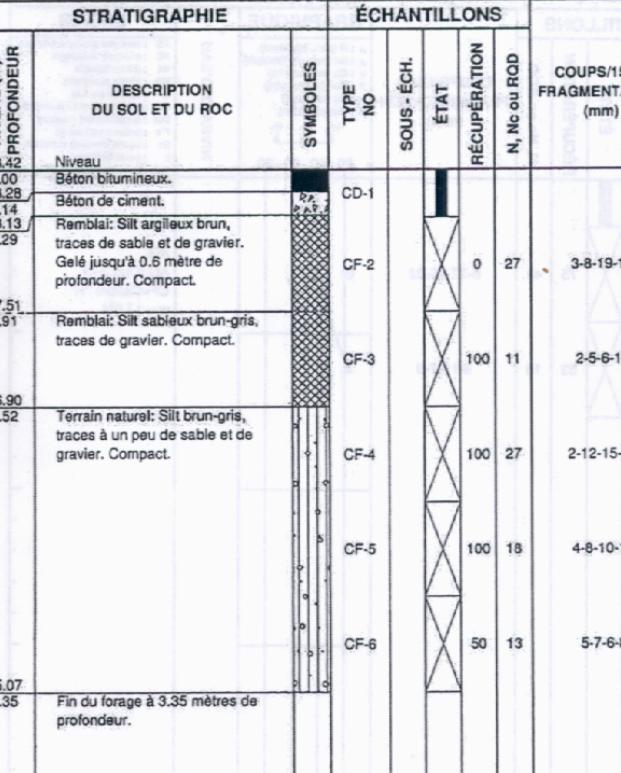
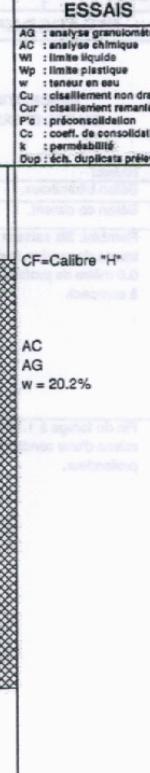
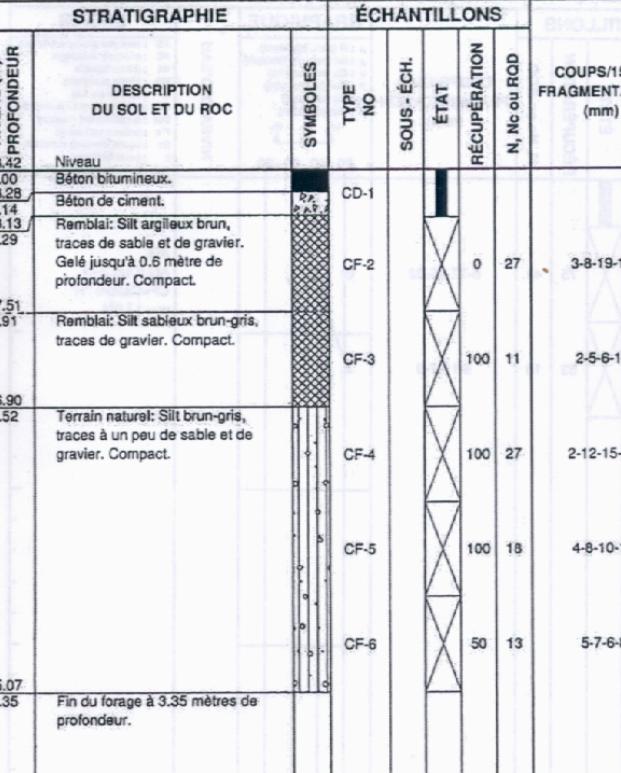
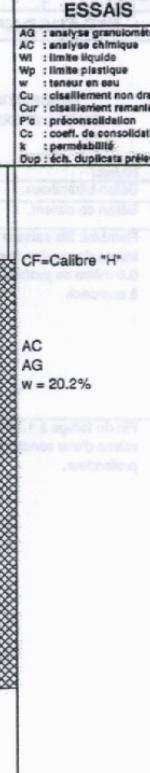
Plan des forages réalisés en Avril 2009.

<b>Montréal</b>  Service des infrastructures, transport et environnement Direction de la réalisation des travaux Division expertise et soutien technique		Nom du consultant: <b>Les Laboratoires Shermont inc.</b>				Page 1 de 1 <b>RAPPORT DE FORAGE</b> <b>Sondage N° 09C036-001</b>						
Nom du projet: <b>Conduite d'eau - rue Brébeuf, entre les rues Mont-Royal et Gifford</b>												
Nom du requérant : <b>Service des Infrastructures, transport et environnement</b> <b>Direction de la gestion stratégique des réseaux d'eau</b>												
Localisation civile : <b>Rue Brébeuf, à ± 18 mètres au nord de Mont-Royal</b>						Site numéro : <b>532</b> Plan de localisation P.I.D.T. N° : <b>10159</b> Date du début du sondage : <b>2009-03-26</b> Profondeur du sondage : <b>3.35</b>						
Entrepreneur en forage : <b>Downing drilling inc.</b>												
Type de forage : <b>Tarière</b>		Inclinaison : <b>90</b> Azimut : <b>10159</b>										
Diamètre du forage: <b>Tarière (150 mm)</b>		Diamètre du carottier: <b>150 mm</b>										
Préparé par : <b>J.-F. Gagnon</b>		Vérifié par : <b>J. Castonguay</b>										
<b>TYPE D'ÉCHANTILLON</b> CF Cuillère fendue TM Tube à paroi mince CD Échantillon par forage au diamant TA Tarière EM Manuel		<b>TERMINOLOGIE</b> "traces" 1-10% "un peu" 10-20% "assez" 20-35% "et" 35-50%		<b>INDICE DE QUALITÉ DU ROC</b> % RQD <25 Qualificatif 25-50 Pauvre 50-75 Passable 75-90 Bon 90-100 Excellent		<b>COMPACITÉ</b> Très lâche 0-4 Lâche 4-10 Compact 10-30 Dense 30-50 Très dense >50						
<b>ÉTAT DE L'ÉCHANTILLON</b>  Remanié  Intact (tube à paroi mince)  Perdu  Forage au diamant		<b>SYMBOLES</b> N: Indice de pénétration standard R: Refus (N > 100) R.Q.D: Indice de qualité du roc (Rock Quality Designation) % R.Q.D = E. Carottes > 4 po. (10 cm) longueur forte		<b>CLASIFICATION (SYSTÈME UNIFIÉ)</b> Argile < 0,002 mm Silt 0,002 à 0,075 mm Sable 0,075 à 4,75 mm Gravier 4,75 à 75 mm Cailloux 75 à 300 mm Blocs > 300mm		<b>CONSISTANCE</b> Très molle <12 kPa Molle 12-25 kPa Ferme 25-50 kPa Raide 50-100 kPa Très raide 100-200 kPa Dure >200 kPa						
						<b>RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT (Cu)</b> <12 kPa 12-25 kPa 25-50 kPa 50-100 kPa 100-200 kPa >200 kPa						
<b>STRATIGRAPHIE</b>		<b>ÉCHANTILLONS</b>				<b>GRAPHIQUE</b>						
<b>PROFONDEUR (m)</b> PROF - pl	<b>NIVEAU (m)/PROFONDEUR</b>	<b>DESCRIPTION DU SOL ET DU ROC</b>		<b>SYMBOLES</b>	<b>TYPE NO</b>	<b>ÉTAT</b>	<b>RÉCUPÉRATION</b>	<b>COUPS/15cm</b>	<b>FRAGMENTATION (mm)</b>	<b>N, NC ou RQD</b>	<b>NIVEAUX D'EAU</b>	<b>ESSAIS</b>
47.94		Niveau										
0.00		Béton bitumineux.										
47.79		Béton de ciment.										
0.14												
47.63		Remblai: Silt argileux brun à brun-gris, traces de gravier. Gelé jusqu'à 0.6 mètre de profondeur. Compact à lâche.										
0.30												
1												
5	46.42	Terrain naturel: Silt argileux brun. Raide.										
1.52												
2	45.81	Silt brun-gris, traces à un peu de sable, de gravier et d'argile; devenant gris à partir de 2.7 mètres de profondeur. Dense.										
3	2.13											
10	44.59	Fin du forage à 3.35 mètres de profondeur.										
3.35												
Remarque(s):												
Date de production 2009-06-05												

Rapport de forage pour le forage 1.

<b>Montréal</b>  Service des infrastructures, transport et environnement Direction de la réalisation des travaux Division expertise et soutien technique		Nom du consultant: <b>Les Laboratoires Shermont inc.</b>				<b>RAPPORT DE FORAGE</b> Page 1 de 1					
Nom du projet: <b>Conduite d'eau - rue Brébeuf, entre les rues Mont-Royal et Gilford</b>		Coordonnées géodésiques (NAD-1983) X: 296630.4 Y: 5043315.9 Z: 48.20				Sondage N° <b>09C036-002</b>					
Nom du requérant: <b>Service des infrastructures, transport et environnement</b> Direction de la gestion stratégique des réseaux d'eau											
Localisation civile: <b>Rue Brébeuf, à 55 mètres au nord de Mont-Royal</b>						Site numéro: <b>532</b>					
Entrepreneur en forage: <b>Downing drilling inc.</b>						Plan de localisation P.I.D.T. No.: <b>10159</b>					
Type de forage: <b>Tarière</b>		Inclinaison: 90 Azimut:				Date du début du sondage: <b>2009-03-26</b>					
Diamètre du forage: <b>Tarière (150 mm)</b>		Diamètre du carottier: <i>Armand Lantier</i>				Profondeur du sondage: <b>1.52</b>					
Préparé par: <b>J.-F. Gagnon</b>		Vérifié par: <i>J. Castonguay</i>									
<b>TYPE D'ÉCHANTILLON</b> CF Cuillère fendue TM Tube à paroi mince CD Échantillon par forage au diamant TA Tarière EM Manuel		<b>TERMINOLOGIE</b> "traces" "un peu" adjectif (...eux) "st"		<b>INDICE DE QUALITÉ DU ROC</b> % RQD <25 Très pauvre 25-50 Pauvre 50-75 Passable 75-90 Bon 90-100 Excellent		<b>COMPACITÉ</b> Très lâche Lâche Compact Dense Très dense					
<b>ÉTAT DE L'ÉCHANTILLON</b>  Remanié  Intact (tube à paroi mince)  Perdu  Forage au diamant		<b>SYMBOLES</b> N: Indice de pénétration standard R: Refus (N > 100) R.Q.D: Indice de qualité du roc (Rock Quality Designation) % R.Q.D = E. Carottes > 4 po. (10 cm) longueur forée		<b>CLASSIFICATION (SYSTÈME UNIFÉ)</b> Argile < 0,002 mm Silt 0,002 à 0,05 mm Sable 0,075 à 4,75 mm Gravier 4,75 à 75 mm Cailloux 75 à 300 mm Blocs > 300mm		<b>CONSISTANCE</b> Très molle Molle Ferme Raide Très raide Dure					
<b>STRATIGRAPHIE</b>		<b>ÉCHANTILLONS</b>				<b>GRAPHIQUE</b>					
<b>PROFONDEUR (m)</b> PROF - pl	<b>NIVEAU (m)/ PROFONDEUR</b>	<b>DESCRIPTION DU SOL ET DU ROC</b>		<b>SYMBOLES</b>	<b>TYPE NO</b>	<b>SOUS - ÉCH.</b>	<b>ÉTAT</b>	<b>RÉCUPÉRATION</b>	<b>COUPS/15cm FRAGMENTATION (mm)</b>	<b>GRAPHIQUE</b>	<b>NIVEAUX D'EAU</b>
		Niveau 48.20									
0.00	Béton bitumineux.	 CD-1	 CF-2	 CF-3	 75	 43	 5-17-26-32	 9-11-7-9	 AG AC (Dup 2-4) CF=Calibre "H" w = 17.9%		
0.00	Béton de ciment.									 CD-1	 CF-2
0.13	Remblai: Silt sableux brun, traces de gravier. Gelé jusqu'à 0.6 mètre de profondeur. Dense à compact.										
0.30											
1											
5											
10											
15											
20											
25											
30											
35											
40											
45											
50											
55											
60											
65											
70											
75											
80											
85											
90											
95											
100											
105											
110											
115											
120											
125											
130											
135											
140											
145											
150											
155											
160											
165											
170											
175											
180											
185											
190											
195											
200											
205											
210											
215											
220											
225											
230											
235											
240											
245											
250											
255											
260											
265											
270											
275											
280											
285											
290											
295											
300											
305											
310											
315											
320											
325											
330											
335											
340											
345											
350											
355											
360											
365											
370											
375											
380											
385											
390											
395											
400											
405											
410											
415											
420											
425											
430											
435											
440											
445											
450											
455											
460											
465											
470											
475											
480											
485											
490											
495											
500											
505											
510											
515											
520											
525											
530											
535											
540											
545											
550											
555											
560											
565											
570											
575											
580											
585											
590											
595											
600											
605											
610											
615											
620											
625											
630											
635											
640											
645											
650											
655											
660											
665											
670											
675											
680											
685											
690											
695											
700											
705											
710											
715											
720											
725											
730											
735											
740											
745											
750											
755											
760											
765											
770											
775											
780											
785											
790											
795											
800											
805											
810											
815											
820											
825											
830											
835											
840											
845											
850											
855											
860											
865											
870											
875											
880											
885											
890											
895											
900											
905											
910											
915											
920											
925											
930											
935											
940											
945											
950											
955											
960											
965											
970											
975											
980											

## *Rapport de forage pour le forage 2.*

<b>Montréal</b> Service des infrastructures, transport et environnement Direction de la réalisation des travaux Division expertise et soutien technique		Nom du consultant: <b>Les Laboratoires Shermont inc.</b>		<b>RAPPORT DE FORAGE</b> Sondage N°: <b>09C036-003</b>					
Nom du projet: <b>Conduite d'eau - rue Brébeuf, entre les rues Mont-Royal et Gilford</b> Nom du requérant: <b>Service des Infrastructures, transport et environnement</b> <b>Direction de la gestion stratégique des réseaux d'eau</b>  Localization civile: <b>Rue Brébeuf, à ± 156 mètres au nord de Mont-Royal</b> Entrepreneur en forage: <b>Downing drilling inc.</b> Type de forage: <b>Tarière</b> Diamètre du forage: <b>Tarière (150 mm)</b> Préparé par: <b>J.-F. Gagnon</b>		Coordonnées géodésiques (NAD-1983) <b>X: 298571.3</b> <b>Y: 5043356.5</b> <b>Z: 48.42</b>  Site numéro: <b>532</b> Plan de localisation P.I.D.T. No.: <b>10159</b> Date du début du sondage: <b>2009-03-27</b> Profondeur du sondage: <b>3.35</b>							
<b>TYPE D'ÉCHANTILLON</b> CF Culière fendue TM Tube à paroi mince CD Échantillon par forage au diamant TA Tarière EM Manuel		<b>TERMINOLOGIE</b> "traces" 1-10% "un peu" 10-20% adjectif (...eux) 20-35% "et" 35-50%		<b>INDICE DE QUALITÉ DU ROC</b> % RQD <b>QUALIFICATIF</b> <25 Très pauvre 25-50 Pauvre 50-75 Passable 75-90 Bon 90-100 Excellent					
<b>ÉTAT DE L'ÉCHANTILLON</b> Remanié Intact (tube à paroi mince) Perdu Forage au diamant		<b>SYMBOLES</b> N: Indice de pénétration standard R: Refus (N > 100) R.Q.D: Indice de qualité du roc (Rock Quality Designation) % R.Q.D = $\frac{\text{Carottes} > 4 \text{ po. (10 cm)}}{\text{longueur forée}}$		<b>COMPACTÉ</b> Très lâche 0-4 Lâche 4-10 Compact 10-30 Dense 30-50 Très dense >50					
				<b>INDICE "N"</b> 0-4 4-10 10-30 30-50 >50					
				<b>NIVEAU D'EAU</b> TUBE PERFORÉ      TUBE PERFORÉ Date: 2009-03-30      Date: 2009-04-06 Prof.: 3.17      Prof.: 0.79					
				<b>RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT (Cu)</b> <12 kPa 12-25 kPa 25-50 kPa 50-100 kPa 100-200 kPa >200 kPa					
<b>PROFONDEUR (m)</b> PROF. + pl	<b>STRATIGRAPHIE</b>  <b>DESCRIPTION DU SOL ET DU ROC</b>  Niveau		<b>ÉCHANTILLONS</b> SYMBOLS		<b>GRAPHIQUE</b>  	<b>ESSAIS</b>  			
			<b>TYPE</b> <b>NO</b>	<b>ÉTAT</b> <b>SOUS - ÉCH.</b>			<b>RÉCUPÉRATION</b> <b>N. Nc ou RQD</b>		
<b>COUPS/15cm</b> <b>FRAGMENTATION (mm)</b>									
1  1  5  2  3  4	<b>NIVEAU (m)/PROFONDEUR (m)</b> 48.42  0.00 0.14 0.29  47.51 0.91  46.90 1.52  2  3  4	<b>SYMBOLS</b> CD-1 CF-2 CF-3 CF-4 CF-5 CF-6	<b>ÉCH.</b> 0 100 100 100 100 50	<b>RÉCUPÉRATION</b> 27 11 11 27 18 13	<b>COUPS/15cm</b> 3-8-19-18 2-5-6-10 2-12-15-21 4-8-10-10 5-7-6-8	<b>GRAPHIQUE</b>  	<b>NIVEAUX D'EAU</b>  		
								<b>SYMBOLS</b> CD-1 CF-2 CF-3 CF-4 CF-5 CF-6	
								<b>ÉTAT</b> 0 100 100 100 100 50	
								<b>RÉCUPÉRATION</b> 27 11 11 27 18 13	
								<b>COUPS/15cm</b> 3-8-19-18 2-5-6-10 2-12-15-21 4-8-10-10 5-7-6-8	
								<b>GRAPHIQUE</b>  	
								<b>NIVEAUX D'EAU</b>  	
<b>Remarque(s):</b> - Un échantillon a été récupéré avec les rejets de tarière (TA-2) entre 0.29 et 0.91 mètre de profondeur.									

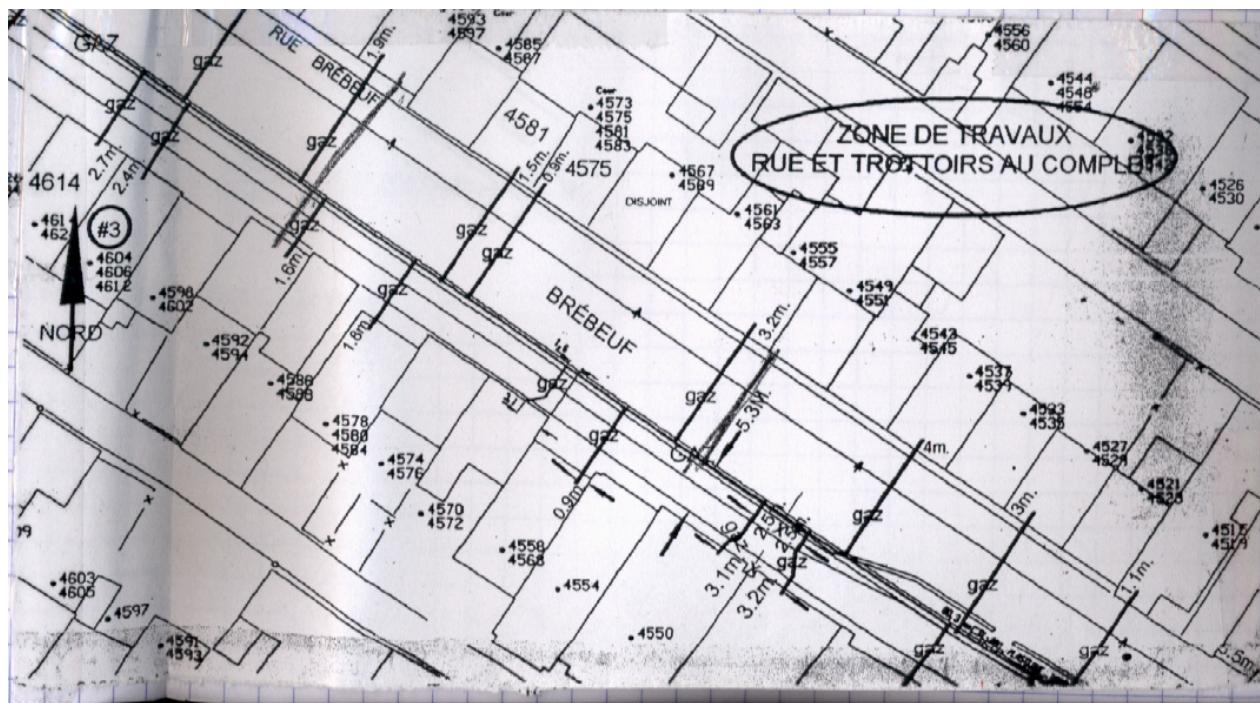
### *Rapport de forage pour le forage 3.*

LABORATOIRES SHERMONT		RÉPORT DE FORAGE		SOLS ET GRANULATS			
PROJET: MONVE228-074-15		LOT: 1		Rapport granulométrique avec courbe			
Projet :	MONVE228-074-15	Contrat :	09C036	Client :	Ville de Montréal		
Lot:	1	Fournisseur :	-	Rapport de laboratoire Shermont Inc.			
Site :	Boulevard de l'Acadie, Montréal, Québec, Canada, H3C 2G8						
<b>Prélèvement</b>							
Prélevé par:	Jacques St-Pierre		N°	MO-0065			
Usage proposé:			N° de référence:				
Calibre:	Forage, Remblai (séparé)		Date prélevée:	2009-03-26			
Endroit prélevé:	09C036-2-2 (0,30 à 0,91 mètre)		Date reçue:	2009-03-30			
<b>Analyse granulométrique LC 21-040</b>							
Tamis	% Passant Cumulatif	Spécifications		Tamis	% Passant Cumulatif	Spécifications	
		Min	Max			Min	Max
112	100						
80	100						
56	100						
40	100						
31.5	100						
20	98						
14	97						
10	96						
5.0	93						
2.5	91						
1.25	88						
0.630	84						
0.315	79						
0.160	71						
0.080	63,6						
<b>COURBE GRANULOMÉTRIQUE</b>							
						Min	Max
						63,10 %	
						17,94 %	
						CC (Coefficient de Courbure)	
						CU (Coefficient d'Uniformité)	
						D <sub>10</sub> :	D <sub>30</sub> :
						D <sub>60</sub> :	
						Remarques: Silt sableux, traces de gravier.	
						* = Non-conforme	
Préparé par:	Karine Pétel		Date :	2009-04-06		Vérifié par:	<i>Johanne L'armand</i>

Analyse granulométrique pour le forage 2.

LES LABORATOIRES SHERMONT		SOLS ET GRANULATS		SOLS ET GRANULATS			
Rapport granulométrique avec courbe				Rapport granulométrique avec courbe			
Projet :	MONVE228-074-15	Client :	Ville de Montréal				
Contrat :	09C036						
Lot :	1						
Fournisseur :	-						
Site :							
<b>Prélèvement</b>							
Prélevé par:	Jacques St-Pierre	N°	MO-0066				
Usage proposé:		N° de référence:					
Calibre:	Forage, Remblai	Date prélevée:	2009-03-27				
Endroit prélevé:	09C036-3-3 (0,91 à 1,52 mètre)	Date reçue:	2009-03-30				
<b>Analyse granulométrique LC 21-040</b>							
Tamis	% Passant Cumulatif	Spécifications		Tamis	% Passant Cumulatif	Spécifications	
		Min	Max			Min	Max
80	100					00	00
56	100					00	00
40	100					00	00
31.5	100					00	00
20	100					00	00
14	99					00	00
10	99					00	00
5.0	98					00	00
2.5	96					00	00
1.25	94					00	00
0.630	91					00	00
0.315	88					00	00
0.160	82					00	00
0.080	75,4					00	00
<b>COURBE GRANULOMÉTRIQUE</b>							
						Lavage / Propreté Norme	75,20 %
						Teneur en Eau Norme	20,19 %
						Module de Finesse Norme	
						CC (Coefficient de Courbure) CU (Coefficient d'Uniformité)	
						D <sub>10</sub> : D <sub>30</sub> : D <sub>60</sub> :	
						Remarques: Silt sableux, traces de gravier.	
						* = Non-conforme	
Préparé par: Karine Pétré		Date: 2009-05-21		Vérifié par: <i>Adriane Turcotte</i>			

Analyse granulométrique pour le forage 3.

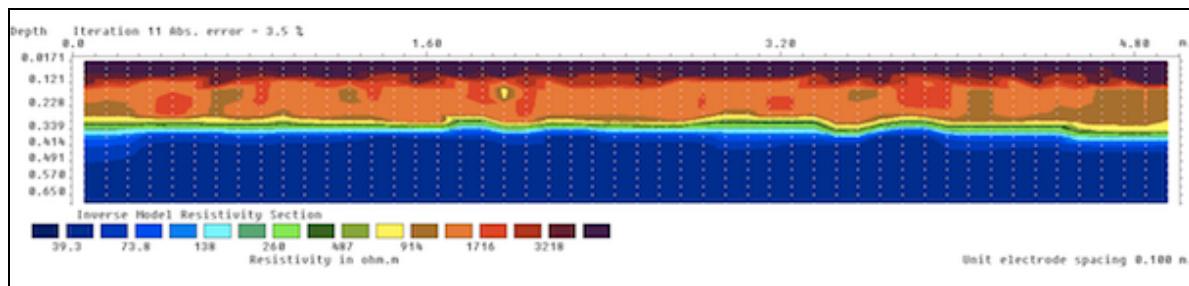


*Plan des conduites de gaz (gracieuseté du contremaître).*

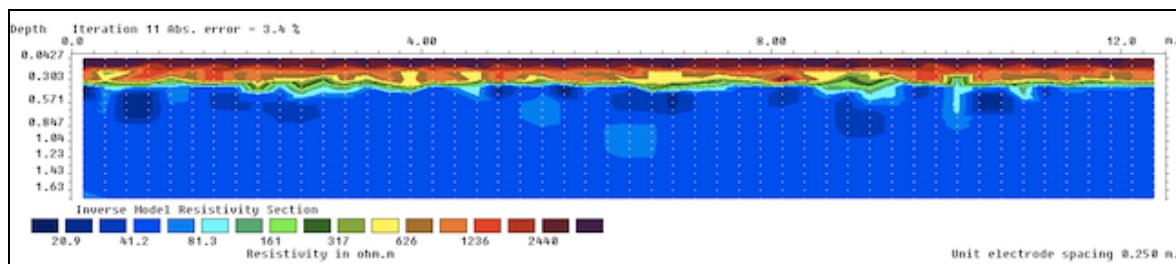
## ANNEXE 4 - Validation

Les configurations utilisées sont celles présentées dans le chapitre 8.

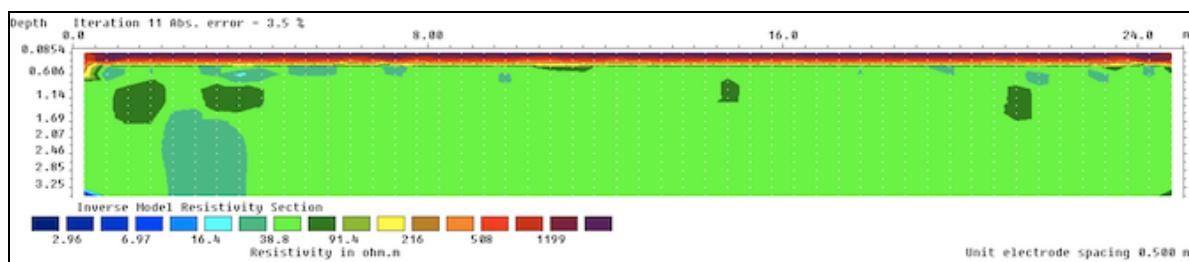
### Configuration 1 :



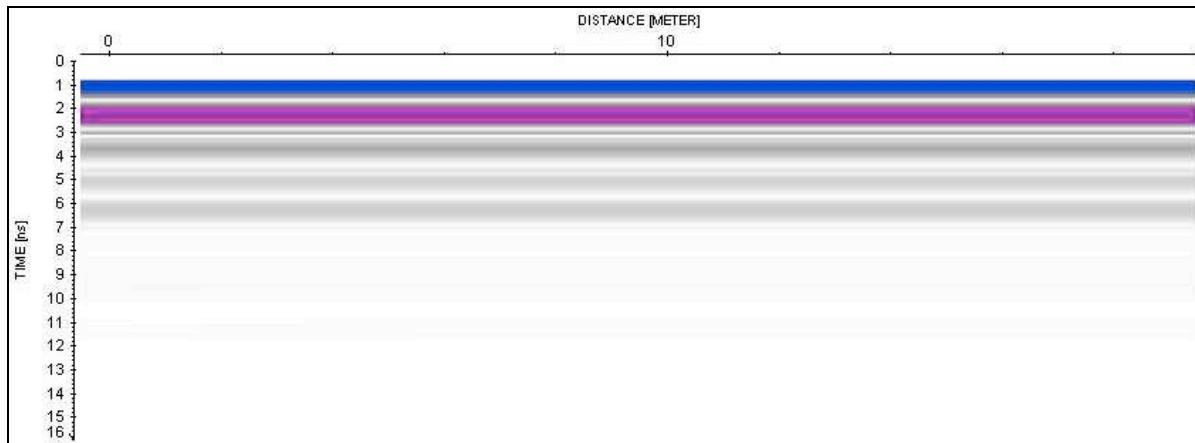
*Configuration 1. Dipôle-dipôle aligné écartement  $a=10\text{cm}$*



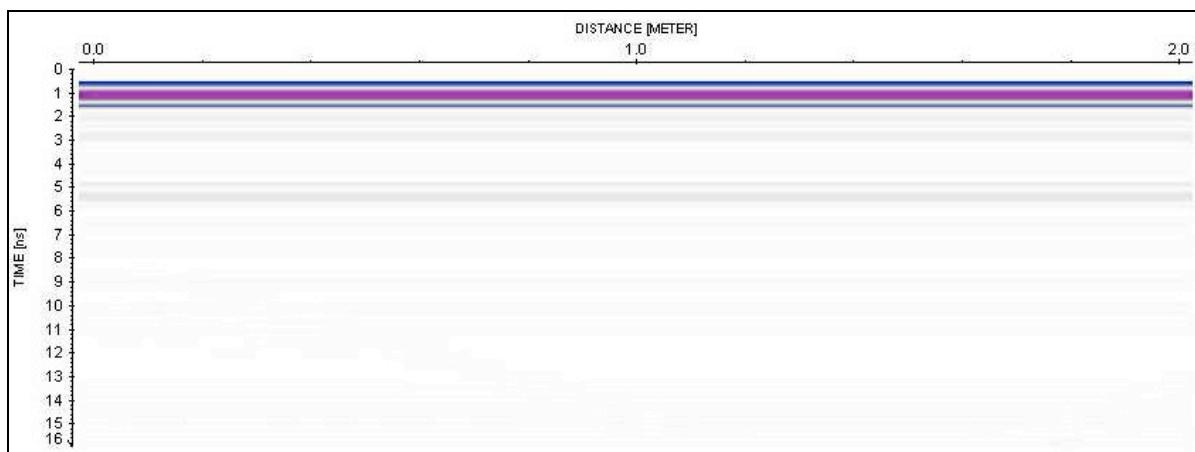
*Configuration 1. Dipôle-dipôle aligné écartement  $a=25\text{cm}$*



*Configuration 1. Dipôle-dipôle aligné écartement  $a=50\text{cm}$*

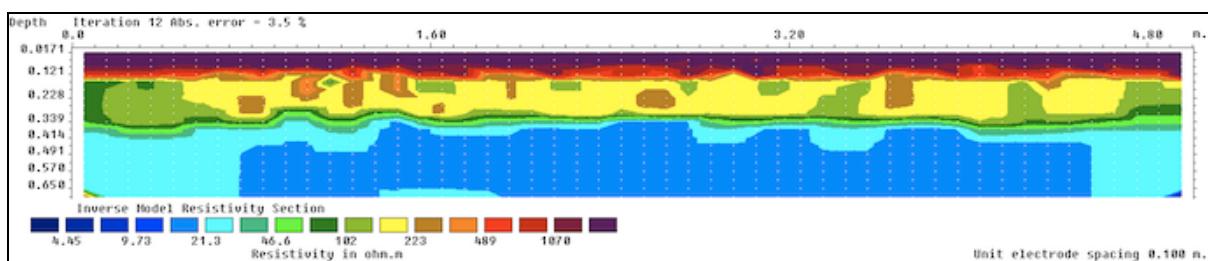


Configuration 1. Radar en réflexion 450MHz.

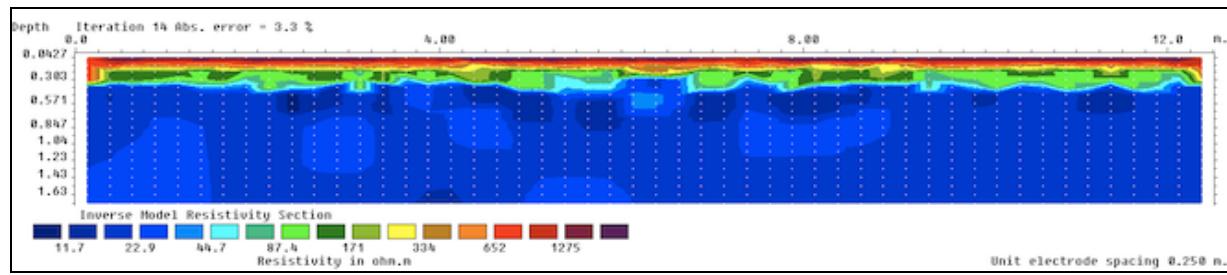


Configuration 1. Radar en réflexion 900MHz.

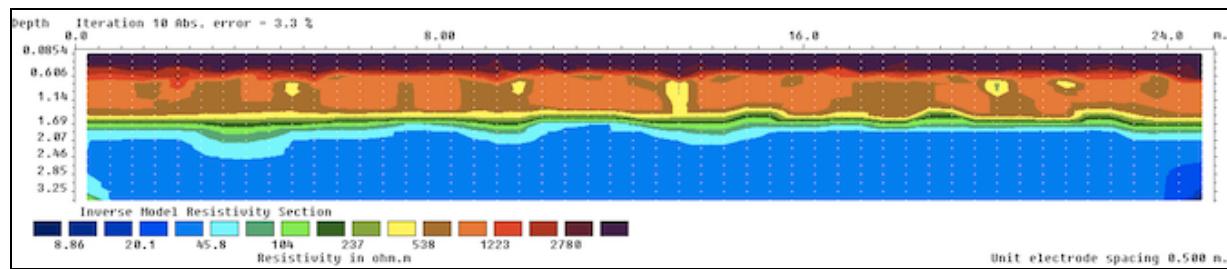
## Configuration 2 :



Configuration 2. Dipôle-dipôle aligné écartement  $a=10\text{cm}$



Configuration 2. Dipôle-dipôle aligné écartement  $a=25\text{cm}$



Configuration 2. Dipôle-dipôle aligné écartement  $a=50\text{cm}$

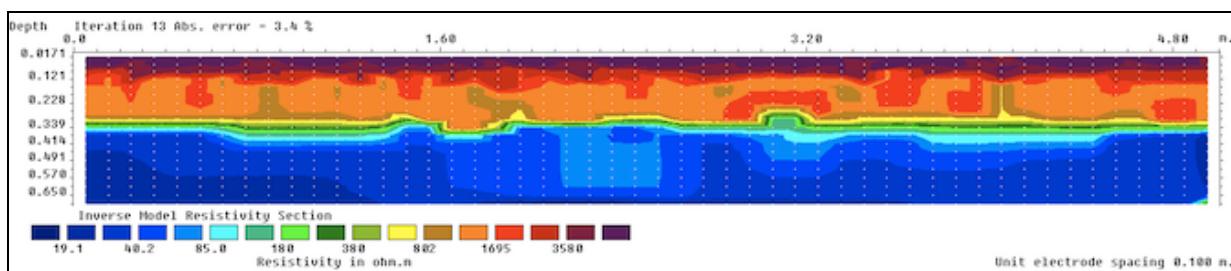


Configuration 2. Radar en réflexion 450MHz.

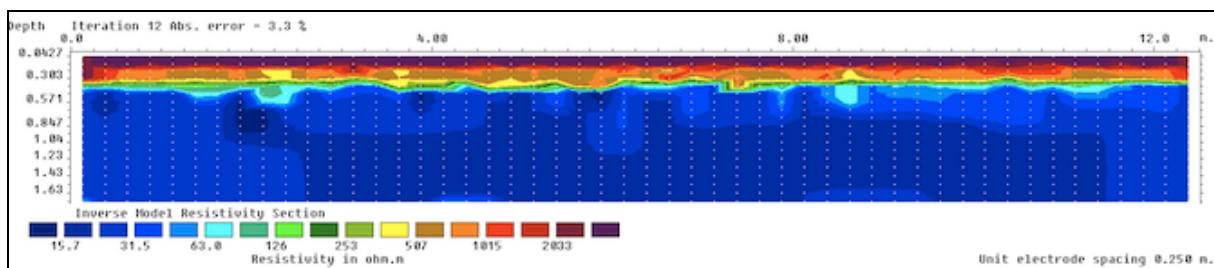


*Configuration 2. Radar en réflexion 900MHz.*

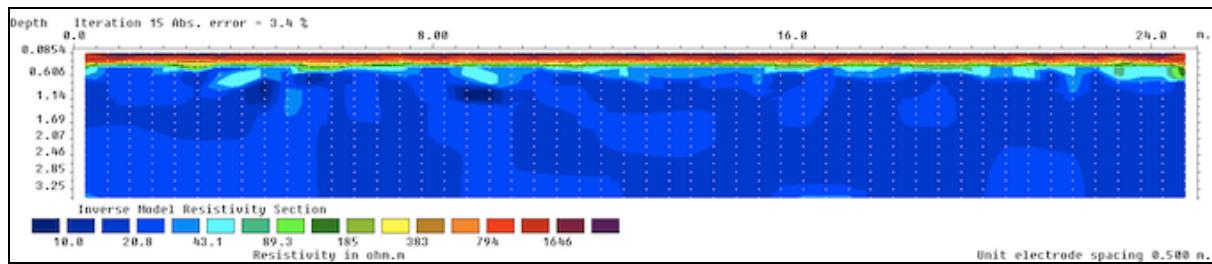
### Configuration 3 :



*Configuration 3. Dipôle-dipôle aligné écartement a=10cm*



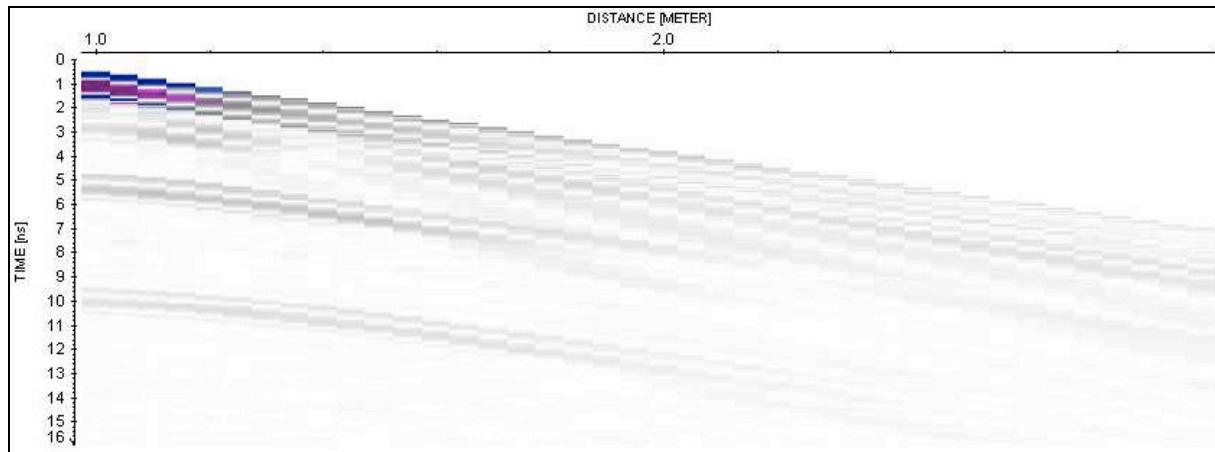
*Configuration 3. Dipôle-dipôle aligné écartement a=25cm*



*Configuration 3. Dipôle-dipôle aligné écartement  $a=50\text{cm}$*

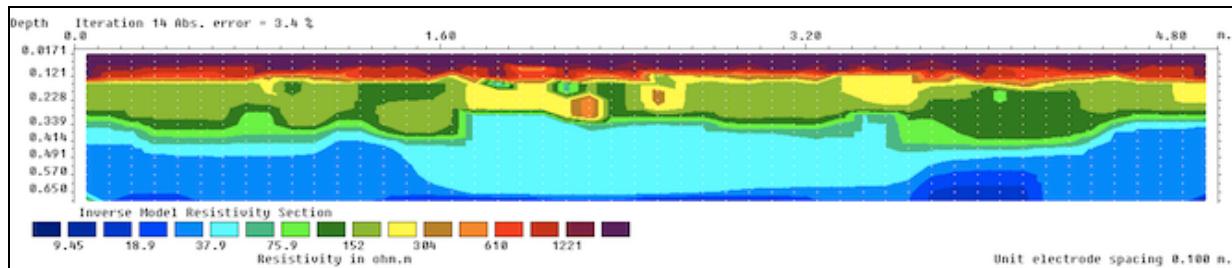


*Configuration 3. Radar en WARR 450MHz.*

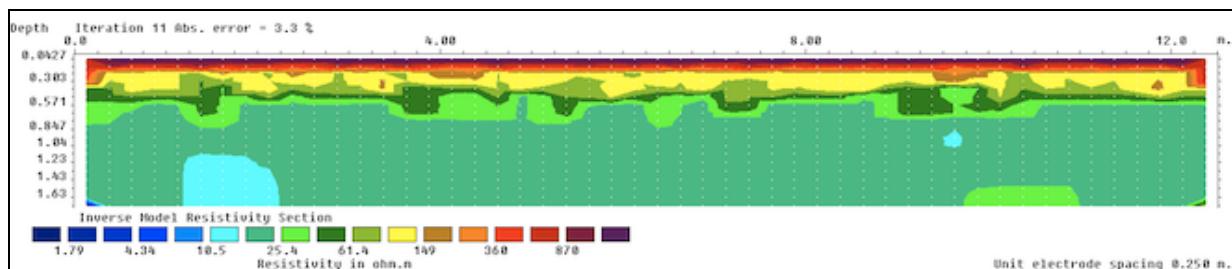


*Configuration 3. Radar en WARR 900MHz.*

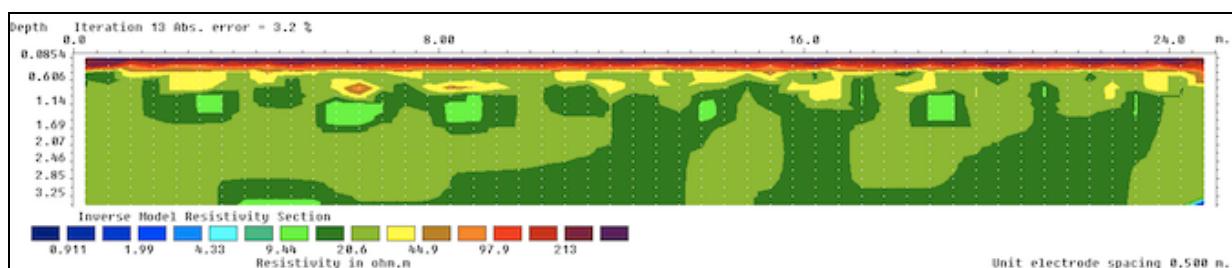
### Configuration 4 :



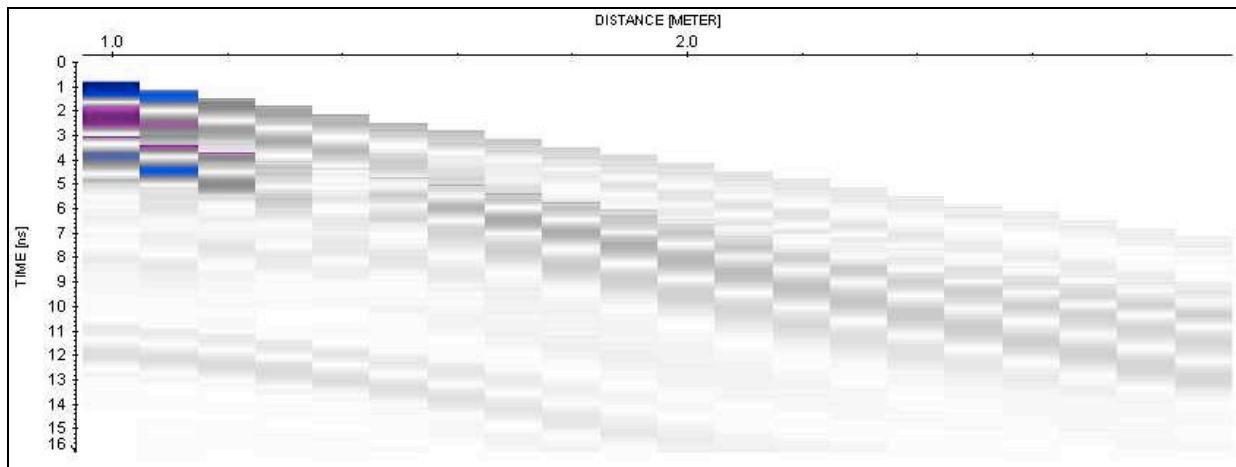
*Configuration 4. Dipôle-dipôle aligné écartement  $a=10\text{cm}$*



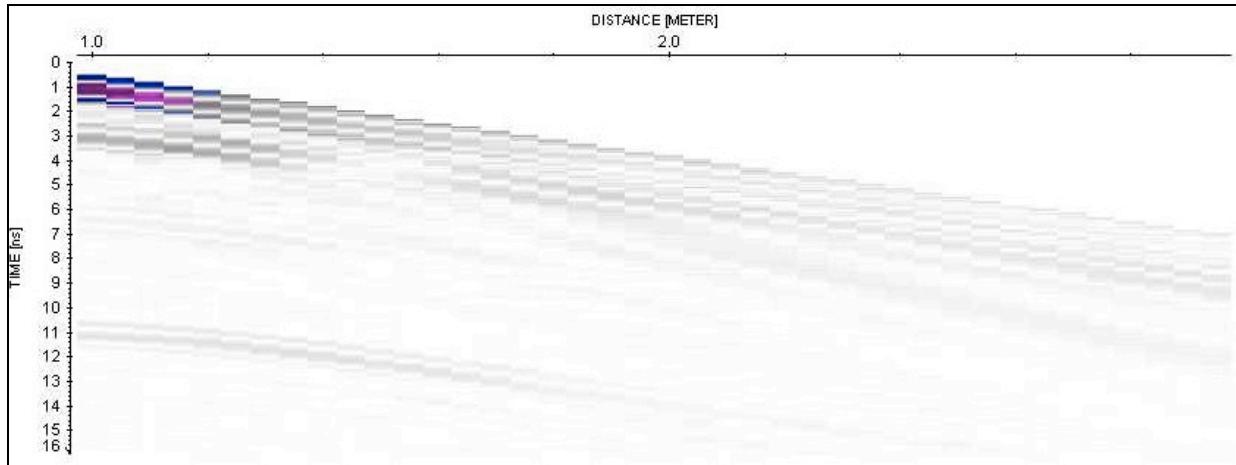
*Configuration 4. Dipôle-dipôle aligné écartement  $a=25\text{cm}$*



*Configuration 4. Dipôle-dipôle aligné écartement  $a=50\text{cm}$*



*Configuration 4. Radar en WARR 450MHz.*



*Configuration 4. Radar en WARR 900MHz.*