



**HAL**  
open science

# Caractérisation des discontinuités dans des ouvrages massifs en béton par la diagraphie électrique de résistivité

Elodie Taillet

► **To cite this version:**

Elodie Taillet. Caractérisation des discontinuités dans des ouvrages massifs en béton par la diagraphie électrique de résistivité. Autre. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I; Université de Sherbrooke (Québec, Canada), 2013. Français. NNT : 2013BOR15242 . tel-00982066

**HAL Id: tel-00982066**

**<https://theses.hal.science/tel-00982066>**

Submitted on 23 Apr 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de Génie  
Département de Génie Civil

UNIVERSITÉ DE BORDEAUX  
École Doctorale des Sciences  
Physiques et de l'Ingénieur

# CARACTÉRISATION DES DISCONTINUITÉS DANS DES OUVRAGES MASSIFS EN BÉTON PAR LA DIAGRAPHIE ÉLECTRIQUE DE RÉSISTIVITÉ

Thèse en cotutelle  
Spécialité : Génie Civil et Mécanique

Élodie TAILLET

Soutenue le 17 décembre 2013

Devant la commission d'examen formée de :

M. GIROUX Bernard, Professeur, IRNS de Québec	(Président)
M. KARRAY Mourad, Professeur, Université de Sherbrooke	(Rapporteur)
M. CHOUTEAU Michel, Professeur, École Polytechnique de Montréal	(Rapporteur)
M. GARNIER Vincent, Maître de Conférences HDR, Université d'Aix-Marseille	(Rapporteur)
M. DENIS Alain, Professeur, Université de Bordeaux	(Directeur)
M. LATASTE Jean-François, Maître de Conférences, Université de Bordeaux	(Directeur)
M. RIVARD Patrice, Professeur, Université de Sherbrooke	(Directeur)



*À mon papi Jean et à mes parents,*



# RÉSUMÉ

---

Le vieillissement des ouvrages en béton est une préoccupation majeure affectant la pérennité et l'efficacité des structures. Le maître d'ouvrage se doit de maintenir les fonctions d'usage de la structure tout en gardant une gestion économique efficace. L'objectif final de ces travaux de recherche est, donc de pouvoir renseigner sur l'état global de fissuration de la structure afin d'aider le maître d'ouvrage à respecter ses engagements.

Dans cette optique, cette thèse développe une nouvelle technique aidant à la quantification de l'état des ouvrages massifs en béton. Elle s'appuie, pour cela, sur la méthode non-destructive de résistivité électrique en surface, connue pour sa sensibilité face à des facteurs révélateurs d'une altération. Toutefois, à cause de sa dépendance entre la profondeur d'investigation et la résolution, la méthode ne peut pas garantir de l'état global d'un ouvrage. De ce fait, il a été décidé d'utiliser la résistivité électrique via des forages préexistants dans la structure (diagraphie électrique). L'outil utilisé est une sonde en dispositif normal réservée jusqu'à présent pour la prospection pétrolière et hydrogéologique. En plus d'une prospection en profondeur via le forage, cette sonde peut acquérir des informations sur un rayon de 3.2m autour du forage. Cependant, à mesure que le volume de béton sondé augmente, la résolution décroît. La difficulté est donc de pouvoir exploiter les capacités de prospection de la sonde tout en sachant que la résolution faillit. Il s'agit de contourner le problème en maîtrisant les concepts de la diagraphie et son nouveau milieu d'application.

Cette thèse est basée sur une première approche numérique permettant d'apporter des corrections sur les données de terrain et de déterminer la sensibilité de l'outil face à de l'endommagement d'ouverture plurimillimétrique à centimétrique. Ceci est validé par des mesures réalisées sur une écluse de la Voie Maritime du Saint-Laurent. Une étude numérique de la réponse de l'outil en fonction des paramètres de fissure tels que l'ouverture, le contraste entre la résistivité de la discontinuité et du béton, et l'extension est réalisée. Elle permet de construire une base de données afin de développer une méthode pour la caractérisation de l'endommagement. Cette méthode s'appuie sur ces réponses diagraphiques pour retrouver les paramètres de fissure recherchés (problème inverse). Nous procédons tout d'abord par une analyse préliminaire se basant sur un croisement des informations apportées par les différentes électrodes de la sonde puis nous optimisons les résultats par la méthode de recuit simulé. La méthode, ainsi développée est ensuite appliquée à un deuxième ouvrage pour en déterminer l'état interne. Ces travaux détectent plusieurs zones endommagées et caractérisent l'une d'elles par une ouverture centimétrique et une extension comprise entre 1.6m et 3.2m.

Ces travaux prometteurs, attestent d'un premier diagnostic interne des ouvrages massifs en béton, un enjeu qui restait sans réponses satisfaisantes jusqu'à maintenant.

Mots clés : Résistivité électrique, discontinuités, ouvrage massif de béton, sonde normale, inversion



# ABSTRACT

---

The aging of concrete structures is a major problem affecting their sustainability and their efficiency. The owner must maintain the structure serviceability and provide cost-effective management. The goal of this work is to provide detailed information about the state of cracking inside the structure in order to assist the owner to meet its commitments.

In this context, this thesis develops a new technology to assess the condition of mass concrete structures. It relies on a non-destructive method based on electrical resistivity measured from surface, known for its sensitivity to factors associated with concrete deterioration. However, because of its dependence between the investigation depth and the resolution, the method cannot assess the overall state of a structure. Therefore, it was decided to use the electrical resistivity through preexisting boreholes in the structure (electrical logging). The tool used is a normal probe, which has been traditionally used for oil and hydrogeological exploration. In addition to the investigation in depth via boreholes, this probe can get information over a radius of 3.2m around the borehole. However, as the probing volume of concrete increases, the resolution decreases. Difficulty is to use the exploration abilities of the tool, knowing that the resolution is limited. This is to get around the problem by mastering logging concepts and its new application environment.

This thesis is based on a first numerical approach to make corrections on field data and to determine the tool sensitivity with regard to the multi-millimeter and centimeter crack size damage. This was validated with measurements made on a full-size lock located on the St. Lawrence Seaway. A numerical study of the tool response versus the discontinuities parameters such as the crack aperture, the resistivity contrast between the discontinuity and the concrete, and the extension was done. It allowed building a database used to develop a method for the characterization of the damage. This method is based on the tool responses to find the crack parameters (inverse problem). First, we proceed with a preliminary analysis based on a cross of information provided by the different electrodes of the probe then we optimize the results by the method of simulated annealing. The characterization method is applied to another structure to quantify its internal state. These studies detect several damaged areas and characterize one of them by a centimeter aperture and an extension between 1.6m and 3.2m.

This work attest to a first internal diagnosis of massive concrete structures, an issue that remained without satisfactory answers so far.

Keywords: Electrical resistivity, discontinuities, massive concrete structure, normal probe, inversion



# REMERCIEMENT

---

Ce mémoire de thèse est un aboutissement personnel qui n'aurait jamais vu le jour sans d'innombrables personnes.

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs et co-directeurs de thèse Patrice Rivard, Alain Denis et Jean-François Lataste pour m'avoir proposé ce sujet à l'issue du stage 2010, de m'avoir fait confiance et de m'avoir soutenu pendant ces trois années. J'ajouterai un merci au combien particulier à Jean-François qui a aussi fait preuve de patience et de compréhension lors de grands moments de doute. Je peux dire aujourd'hui, grâce à toi, que j'aime la recherche pour le travail d'équipe, de partage et de complicité qui mènent vers un enrichissement scientifique, mais également personnel.

Je tiens à remercier toute cette équipe formidable travaillant pour l'Université de Bordeaux et de Sherbrooke. Et Dieu sait qu'ils sont indispensables ! Merci à Charlotte Lavennier de m'avoir aidé pour ces papiers interminables, de m'avoir à chaque fois trouvé un petit bureau et surtout d'avoir su résister à mes interruptions incessantes dans son bureau (juste pour parler). Merci à Danick Charbonneau de sa bonne humeur en tout temps, de son expérience et son savoir-faire. Le terrain avec toi était tellement agréable.

Je remercie tous les chercheurs que j'ai pu côtoyer de près ou de loin faisant part de leur lumière scientifique et personnelle et de leurs conseils avertis. Je citerai M. Ballivy, M. Breyse, M. Chouteau, M. Garnier, M. Giroux, M. Gravel et M. Kodjo.

À tous mes collègues et amis de labos, je vous remercie grandement, car vous avez su amener joie et plaisir dans les méandres de la thèse. Merci à Batman (Alias Olivier Nouailletas), Esra, Jessica, Mathilde, Marion, Nico, Olivier G., Thibaut et Sébastien. Je n'oublie pas tous les stagiaires qui sont passés à Sherbrooke !

Un immense merci à toute ma famille de cœur c'est-à-dire à mes amis ! Chacun avait contribué à cette thèse par votre soutien infaillible, votre amitié et votre Amour. Je tiens tout particulièrement à remercier à Aude, Cyrielle, Djazia, Emmanuelle, Geoffroy, Imad, Laetitia, Marion, Mélanie, Pierre, Wanis et Yasmina.

Je tiens à remercier M. Samson Étienne ! Tu as été présent pour cette dernière année de thèse et non des moindres puisqu'il s'agissait de la rédaction, le moment le plus difficile dans une thèse. Tu as su me porter et m'élever pour réussir à finir à temps et à produire ce travail. Je te remercie pour ta patience et ton amour. Je ne serai jamais comment te remercier. Je t'aime de tout mon cœur.

Et pour finir, MERCI à ma famille et mes parents Geneviève et Xavier Taillet. Merci de leur amour continu, de leur persévérance, de leur éducation et bien d'autres... Vous m'avez permis de faire ce que je voulais et de pouvoir continuer dans la sphère scientifique. J'espère vous rendre fier. En tout cas, j'essaierai toujours de le faire. Je vous dédie ce mémoire de thèse ainsi qu'à mon regretté papi Jean. Tu as toujours su que j'irai loin et que je réussirai. Merci d'avoir cru en moi...

Merci à TOUS !



# TABLE DES MATIÈRES

---

RÉSUMÉ.....	i
ABSTRACT.....	iii
REMERCIEMENT.....	v
TABLE DES MATIÈRES.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xv
INTRODUCTION.....	1
Chapitre 1 Revue des connaissances.....	5
1.1 Les discontinuités dans le béton et les massifs rocheux.....	6
1.1.1 Définition de la discontinuité.....	6
1.1.2 Origines des discontinuités.....	6
1.1.3 Exigences des maîtres d'ouvrage.....	11
1.2 Auscultation par la méthode de résistivité électrique.....	13
1.2.1 Définition de la résistivité électrique.....	13
1.2.2 Les propriétés électriques dans le béton.....	15
1.2.3 Aptitudes de la méthode de résistivité électrique.....	16
1.3 La diagraphie électrique.....	20
1.3.1 Qu'est-ce que la diagraphie?.....	21
1.3.2 Dispositif normal.....	22
1.3.3 Paramètres enregistrés.....	24
1.4 L'interprétation en diagraphie.....	30
1.4.1 Modélisation du problème direct.....	31
1.4.2 Traitement par inversion.....	36
1.5 Conclusion.....	38

Chapitre 2	Modélisation de la réponse diagraphique .....	45
2.1	Phase préparatoire.....	43
2.1.1	<i>Hypothèses simplificatrices</i> .....	43
2.1.2	<i>Définition de la géométrie</i> .....	44
2.1.3	<i>Complexification du modèle</i> .....	48
2.2	Correction des données diagraphiques.....	53
2.2.1	<i>Modélisation de l'effet de forage</i> .....	53
2.2.2	<i>Équation de correction</i> .....	54
2.2.3	<i>Validation de l'équation de correction</i> .....	57
2.3	Sensibilité aux paramètres de fissure .....	58
2.3.1	<i>Signature d'une fissure</i> .....	58
2.3.2	<i>Les paramètres d'une discontinuité conductrice</i> .....	64
2.4	Caractérisation théorique de la fissuration.....	73
2.4.1	<i>Étape 1 : Analyses préliminaires</i> .....	73
2.4.2	<i>Étape 2 : Régression multiple non linéaire</i> .....	77
2.4.3	<i>Étape 3 : Recuit simulé</i> .....	86
2.5	Conclusion .....	93
Chapitre 3	Application in situ.....	95
3.1	Présentation du site et du matériel .....	96
3.1.1	<i>Contexte</i> .....	96
3.1.2	<i>Caractéristiques des écluses</i> .....	97
3.1.3	<i>Ouvrage d'essai : l'écluse de Saint-Lambert</i> .....	98
3.1.4	<i>Déroulement de l'essai</i> .....	100
3.2	Étude du protocole de mesure.....	102
3.2.1	<i>Position de B</i> .....	102
3.2.2	<i>L'excentricité</i> .....	104

## TABLE DES MATIÈRES

3.2.3 <i>Le pas de mesure</i> .....	106
3.2.4 <i>Le bruit de mesure</i> .....	107
3.2.5 <i>Conclusion</i> .....	110
3.3 Mesures de terrain – interprétations qualitatives .....	110
3.3.1 <i>Observations préliminaires</i> .....	111
3.3.2 <i>Comparaison avec la monoélectrode</i> .....	115
3.3.3 <i>Comparaison avec des diagraphies d'imagerie</i> .....	118
3.3.4 <i>Conclusions</i> .....	121
3.4 Inversion des mesures .....	122
3.4.1 <i>Étape 1 : Calcul de la variation relative</i> .....	123
3.4.2 <i>Analyse des résultats de l'enregistrement</i> .....	126
3.4.3 <i>Conclusion</i> .....	128
Chapitre 4 Validation de la méthode.....	131
4.1 Interprétation des variations relatives de résistivité apparente .....	132
4.1.1 <i>Description du site : Écluse de Côte-Sainte-Catherine</i> .....	132
4.1.2 <i>Étude préliminaire</i> .....	133
4.1.3 <i>Mesures et analyse des résultats</i> .....	135
4.1.4 <i>Confrontations Résistivité versus Diagraphie d'imagerie optique et acoustique</i> .....	138
4.2 Inversion des résultats et diagnostic des discontinuités .....	140
4.2.1 <i>Résultats et interprétation</i> .....	140
4.2.2 <i>Analyse des résultats de l'enregistrement</i> .....	144
4.3 Synthèse et discussion.....	145
CONCLUSION .....	149
ANNEXES .....	155
LISTE DES RÉFÉRENCES .....	171



# LISTE DES FIGURES

---

Figure 1-1 : Résistivité électrique de divers matériaux [Whiting et Nagi, 2003].....	14
Figure 1-2 : Répartition des lignes de courant et des équipotentiels dans un sol homogène et isotrope .....	14
Figure 1-3 : Schéma de configuration entre AB perpendiculaire à la fissure (a) et AB parallèle à la fissure (b) .....	19
Figure 1-4 : Schéma du dispositif normal .....	23
Figure 1-5 : Représentation du volume d'investigation .....	25
Figure 1-6 : Influence de l'épaisseur des bancs et de la résistivité [Serra, 1979] .....	29
Figure 1-7 : Représentation simple des frontières radiales et horizontales .....	32
Figure 1-8 : Processus direct et inverse [Marecot, 2004] .....	36
Figure 2-1 : Configuration du modèle 3D (a.) et sa simplification en 2D-axisymétrique (b.) ..	43
Figure 2-2 : Maillage du modèle initial .....	45
Figure 2-3 : Conditions aux limites d'un domaine homogène .....	46
Figure 2-4 : Modèle 2D discrétisé et conditions limites.....	49
Figure 2-5 : Théorie des images .....	52
Figure 2-6 : Erreurs liées à l'effet de surface en fonction de l'espacement .....	53
Figure 2-7 : Variations de l'écart à la valeur pour différents diamètres de forage et différents contrastes a. $C_{t/m} = 4$ et b. $C_{t/m} = 20$ .....	54
Figure 2-8 : Écart à la valeur en fonction d'AM/Df pour des contrastes différents a. $C_{t/m} = 4$ et b. $C_{t/m} = 20$ .....	56
Figure 2-9 : Comparaison entre des données corrigées et non corrigées pour quatre points de mesure et pour différentes configurations – a. $C_{t/m} = 4$ et $D_f = 0.150$ m, b. $C_{t/m} = 20$ et $D_f = 0.150$ m, c. $C_{t/m} = 4$ et $D_f = 0.080$ m et d. $C_{t/m} = 20$ et $D_f = 0.080$ m.....	57
Figure 2-10 : Paramètres de modélisation de l'influence de la résistivité de la discontinuité ..	58
Figure 2-11 : Réponses de couches minces résistantes pour différents ratios entre l'espacement AM et l'épaisseur h [Yang et Ward, 1984] .....	59

## LISTE DES FIGURES

Figure 2-12 : Log de résistivité apparente corrigée d'une fissure résistante pour différents $C_{t/f}$ : <b>a.</b> pour $M_8$ et <b>b.</b> pour $M_{16}$ ( $h=0.02m$ et $C_{t/m}=20$ ).....	60
Figure 2-13 : Log de résistivité apparente corrigée d'une fissure résistante pour différents $C_{t/f}$ : <b>a.</b> pour $M_{32}$ et <b>b.</b> pour $M_{64}$ ( $h=0.02m$ et $C_{t/m}=20$ ).....	61
Figure 2-14 : Réponses de couches minces conductrices pour différents ratios entre l'espacement AM et l'épaisseur h [Yang et Ward, 1984].....	62
Figure 2-15 : Log de résistivité apparente corrigée d'une fissure conductrice pour différents $C_{t/f}$ : <b>a.</b> pour $M_8$ et <b>b.</b> pour $M_{16}$ ( $h=0.02m$ et $C_{t/m}=20$ ).....	62
Figure 2-16 : Log de résistivité apparente corrigée d'une fissure conductrice pour différents $C_{t/f}$ : <b>a.</b> pour $M_{32}$ et <b>b.</b> pour $M_{64}$ ( $h=0.02m$ et $C_{t/m}=20$ ).....	63
Figure 2-17 : Influence de $C_{t/m}$ sur la réponse diagraphique pour différents $C_{t/f}$ et pour l'espacement $M_8$ .....	65
Figure 2-18 : Influence de $C_{t/m}$ sur la réponse diagraphique pour différents $C_{t/f}$ : a. pour $M_{16}$ , b. pour $M_{32}$ et c. pour $M_{64}$ .....	66
Figure 2-19 : Influence du paramètre $C_{t/f}$ sur la réponse diagraphique pour $M_8$ ( $h = 0.02m$ et $C_{t/m} = 2$ ).....	67
Figure 2-20 : Influence du paramètre $C_{t/f}$ sur la réponse diagraphique pour : a. $M_{16}$ , b. $M_{32}$ et c. $M_{64}$ .....	68
Figure 2-21 : Variation relative au droit de la fissure en fonction de l'ouverture et pour chaque espacement ( $C_{t/m} = 2$ et $C_{t/f} = 10$ ).....	69
Figure 2-22 : Influence de l'ouverture de la fissure sur la réponse diagraphique pour l'espacement a. $M_8$ , b. $M_{16}$ , c. $M_{32}$ et d. $M_{64}$ ( $C_{t/m} = 2$ et $C_{t/f} = 10$ ).....	70
Figure 2-23 : Influence de l'extension L sur la réponse diagraphique pour l'espacement $M_8$ .	71
Figure 2-24 : Influence de l'extension L sur la réponse diagraphique pour : a. $M_{16}$ , b. $M_{32}$ et c. $M_{64}$ .....	72
Figure 2-25 : Analyse d'une discontinuité d'ouverture $h = 0.02m$ , de $C_{t/f} = 20$ et d'extension variable pour les espacements a. $M_8$ et b. $M_{16}$ .....	74
Figure 2-26 : Analyse incrémentale des paramètres de discontinuité en fonction de la détection par espacement sur la base des cas modélisés.....	75
Figure 2-27 : Variation relative en fonction de l'ouverture pour différents $C_{t/f}$ pour $M_8$ .....	79
Figure 2-28 : Variations relatives observées en fonction des variations relatives prédites par les différents modèles pour l'espacement $M_8$ .....	81

## LISTE DES FIGURES

Figure 2-29 : Distribution de l'ensemble des configurations pour l'espacement $M_8$ .....	83
Figure 2-30 : Distribution de l'ensemble des configurations pour a. $M_{16}$ , b. $M_{32}$ et c. $M_{64}$ .....	84
Figure 2-31 : Comparaison entre un minimum local et un minimum global .....	87
Figure 3-1 : Vue satellite des écluses du fleuve Saint-Laurent (Google, 2013).....	96
Figure 3-2 : Vue transversale des monolithes de l'écluse Saint-Lambert (plans de la Voie Maritime).....	97
Figure 3-3 : Béton de masse de l'écluse de Saint-Lambert (juillet 2013).....	98
Figure 3-4 : Plan des forages de l'écluse de Saint-Lambert [Thivierge, 2011].....	99
Figure 3-5 : Dispositif installé sur le terrain.....	100
Figure 3-6 : Schéma PolyElectric/Poly Gamma 2PEA-1000 [Mount Sopris Instrument Co., 2002].....	101
Figure 3-7 : Comparaison des mesures 1, 2 et 3 pour l'espacement $M_8$ et l'espacement $M_{16}$	103
Figure 3-8 : Comparaison des mesures 1, 2 et 3 pour l'espacement $M_{32}$ et l'espacement $M_{64}$ .....	104
Figure 3-9 : Comparaison entre deux mesures dont les pas sont de 0.01m puis de 0.05m .....	107
Figure 3-10 : Comparaison des logs obtenus avec les deux calibres de mesure : 0-250 et 0-2500 Ohm.m.....	109
Figure 3-11 : Variation de la résistivité apparente corrigée pour les forages de l'écluse de Saint-Lambert, pour les 4 dimensions de la sonde normale.....	112
Figure 3-12 : Observation de la transition sur un zoom du log du forage 6.....	113
Figure 3-13 : Représentation 3D des données inversées du site expérimental.....	114
Figure 3-14 : Schéma du principe de mesure en monoélectrode.....	115
Figure 3-15 : Confrontation entre la résistance et la résistivité apparente pour $M_8$ pour chaque forage.....	117
Figure 3-16 : Identification hypothétique d'unités conductrices pour le forage 2 et 6 .....	118
Figure 3-17 : Confrontation des données de résistivité apparente corrigées et des données d'imagerie optique et acoustique pour le forage 2 .....	120
Figure 3-18 : Confrontation des données de résistivité apparente corrigées et des données d'imagerie optique et acoustique pour le forage 6 .....	120

## LISTE DES FIGURES

Figure 3-19 : Détermination de l'épaisseur de la couche équivalente .....	122
Figure 3-20 : Arrangement des électrodes dans un dispositif cross - hole.....	124
Figure 3-21 : Parallèle entre le log des résistivités apparentes (a.) et le panneau électrique des résistivités vraies (b.).....	125
Figure 3-22 : Variation relative au droit du joint en fonction de l'ouverture et pour chaque espacement ( $C_{vm} = 10$ , $C_{vf} = 10$ et $L = \infty$ ).....	127
Figure 4-1 : Vue satellite de l'écluse de Côte-Sainte-Catherine .....	132
Figure 4-2 : Logs de résistivité avec un pas de mesure de 0.05m et 0.01m pour chaque espacement .....	134
Figure 4-3 : Log des résistivités apparentes corrigées du forage C1 - Côte-Sainte-Catherine – a. Vue d'ensemble et b. Agrandissement entre 16m et 19m.....	136
Figure 4-4 : Log de la résistance et Log de la résistivité apparente corrigée .....	137
Figure 4-5 : Résultats des diagraphies d'imagerie acoustique (a.) et optique (b.) du forage C1 de Côte-Sainte-Catherine en 2008 .....	139
Figure 4-6 : Panneau électrique des données inversées (Itérations : 7 et RMS =4.4%).....	141
Figure 4-7 : Comparaison des logs de résistivité apparente (a.) et de résistivité vraie (b.) ....	141
Figure 4-8 : Translation des données obtenues par l'espacement $M_{64}$ .....	143

# LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 1-1 : Informations et exemples d'application des principales diagraphies différées ...	22
Tableau 2-1 : Dimensions des modèles testés .....	47
Tableau 2-2 : Dimensions et calculs d'erreur liés au maillage EF pour les différents espacements AM.....	48
Tableau 2-3 : Dimensions des unités du modèle 2D .....	49
Tableau 2-4 : Calculs d'erreur pour différentes positions de $M_x$ et différentes configurations, avec et sans prise en compte du mandrin de la sonde .....	51
Tableau 2-5 : Coefficient de détermination et SCR des équations étudiées.....	56
Tableau 2-6 : Coefficients de détermination pour 16 modèles.....	80
Tableau 2-7 : Équation de régression et coefficient de détermination pour chaque espacement .....	82
Tableau 2-8 : Contribution des variables en fonction des configurations de la discontinuité pour l'espacement $M_8$ .....	85
Tableau 2-9 : Comparaison entre les paramètres modélisés et les paramètres estimés (Recuit simulé avec $M_8$ et $M_{16}$ ).....	90
Tableau 2-10 : Comparaison entre les paramètres modélisés et les paramètres estimés (Recuit simulé avec $M_8$ , $M_{16}$ et $M_{32}$ ).....	91
Tableau 2-11 : Comparaison entre les paramètres modélisés et les paramètres estimés (Recuit simulé avec $M_8$ , $M_{16}$ , $M_{32}$ et $M_{64}$ ) .....	92
Tableau 3-1 : Longueurs et diamètres des forages exploités.....	99
Tableau 3-2 : Coefficient de variation pour chaque espacement dans l'étude de position de B .....	104
Tableau 3-3 : Coefficient de variation pour chaque espacement pour l'étude de l'excentricité .....	105
Tableau 3-4 : Coefficient de variation de chaque espacement pour le mode 0-250 Ohm.m...	108
Tableau 3-5 : Coefficient de variation pour chaque espacement pour le mode 0-2500 Ohm.m .....	108
Tableau 3-6 : Profondeur de la transition et position de chaque forage par rapport au canal .	113

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4-1 : Programme de mesure sur l'écluse de Côte-Sainte-Catherine.....	133
Tableau 4-2 : Estimation du bruit de mesure pour chaque espacement pour un pas de mesure de 0.05m et de 0.01m.....	135
Tableau 4-3 : Caractéristiques des zones observées.....	142
Tableau 4-4 : Calcul de la variation relative au droit des zones conductrices pour les espacements $M_8$ , $M_{16}$ et $M_{32}$ .....	143
Tableau 4-5 : Paramètres estimés des discontinuités .....	145
Tableau 4-6 : Comparaison des variations relatives obtenues sur le terrain ( $\rho_t = 55\text{Ohm.m}$ ) et en modélisation ( $h=0,02\text{m}$ , $Ct/f=20$ et $L=1,6\text{m}$ ).....	146
Tableau 4-7 : Nouvelle comparaison des variations relatives obtenues sur le terrain ( $\rho_t = 48\text{ Ohm.m}$ ) et en modélisation ( $h=0,02\text{m}$ , $Ct/f=20$ et $L=1,6\text{m}$ ).....	147

# INTRODUCTION

---

Le vieillissement des structures massives en béton telles que les barrages-poids ou les écluses est un problème majeur en raison de la dégradation des propriétés et des performances du béton. Les maîtres d'ouvrage privilégient un diagnostic global de leur structure pour une gestion économique efficace. Ils doivent pouvoir évaluer l'état de leur ouvrage, et anticiper leur évolution. Pour cela, il est essentiel de détecter, localiser et caractériser les zones endommagées dans la structure interne, et de hiérarchiser leur importance. La connaissance de l'état de dégradation peut être obtenue par des méthodes de contrôle non-destructif (CND).

Il existe de nombreuses méthodes d'auscultation non destructive utilisant les concepts de l'électromagnétisme, de l'acoustique, de la thermique, de l'optique, et de l'électrique. Toutes présentant des avantages et des inconvénients, mais peuvent être complémentaires pour l'interprétation. Si les techniques non destructives ont de fortes capacités, elles ne sont pas toutes validées par le monde des CND et des structures à cause de leur sensibilité aux paramètres extérieurs. Elles doivent faire l'objet d'études approfondies pour devenir opérationnelles.

Dans ces méthodes, la résistivité électrique en surface est considérée comme potentiellement exploitable, en raison de sa sensibilité à certains facteurs révélateurs d'une altération (variation de porosité, présence de discontinuités). Cependant, la méthode est limitée en raison de la dépendance entre la profondeur d'investigation et la résolution. L'augmentation de l'espacement entre les électrodes d'injection permet de sonder sur des profondeurs plus importantes, mais au détriment de la résolution. La résistivité électrique en surface ne peut garantir de l'état global d'un ouvrage massif en béton. Ainsi, l'utilisation des méthodes électriques en forage peut être une solution pour ausculter à l'intérieur de la structure.

Ces méthodes sont appelées : les diagraphies électriques de résistivité. Au début du 20e siècle, différentes techniques de diagraphie (électriques, acoustiques, optiques ou nucléaires) ont été mises au point pour la prospection pétrolière afin d'obtenir un enregistrement continu des propriétés des roches pour l'identification et la caractérisation des réservoirs de gaz ou de pétrole et des aquifères (couches métriques).

## INTRODUCTION

Dans cette thèse, la diaggraphie électrique de résistivité est détournée de sa première fonction de «chercheuse de pétrole» pour une fonction servant à évaluer l'état d'un ouvrage massif en béton dans des forages préexistants. Les objectifs principaux sont de pouvoir détecter, localiser et caractériser les zones d'endommagement. L'accent est notamment mis sur les interfaces liées aux reprises de bétonnage représentant des zones typiques de défauts, sur la zone de contact béton/substratum qui représente toujours une zone sensible de l'ouvrage, ainsi que sur toute autre discontinuité pouvant traduire la présence d'une fissure ou d'une zone altérée.

À ce jour, l'évaluation de l'état d'endommagement des ouvrages massifs en béton reste un enjeu sans réponses totalement satisfaisantes. Déjà utilisées dans les ouvrages de génie, les diaggraphies d'imagerie acoustique et optique offrent une première appréciation de l'état de l'ouvrage. Cependant, l'information obtenue reste limitée à la paroi du forage. La diaggraphie électrique de résistivité permettrait d'envisager l'étude d'un volume de béton plus important autour du forage. L'originalité de ces travaux se situe, donc, dans le volume de l'investigation. La sonde électrique normale utilisée possède plusieurs rayons d'investigation permettant de sonder des volumes variant de quelques centimètres cubes à plusieurs mètres cubes. Si l'on ajoute le fait, que la résistivité est une méthode particulièrement sensible aux paramètres d'altération classique du béton (humidité, porosité...), alors la technique apporterait des informations essentielles sur un rayon important autour du forage.

La stratégie adoptée dans cette thèse, est basée sur une évaluation de la sensibilité de la diaggraphie électrique aux endommagements puis sur une analyse de l'enregistrement afin d'apporter une estimation quantitative des paramètres des discontinuités. Ces deux points reposent, sur une approche numérique (éléments finis) en 2D-axisymétrie, une approche expérimentale sur un ouvrage hydraulique réel (ouvrage test) et une validation de ces travaux sur un second ouvrage hydraulique réel.

Cette thèse s'articule en quatre chapitres. Le Chapitre 1 est un état de l'art sur divers sujets touchant la problématique. Cette revue des connaissances fait état d'un recensement des discontinuités pouvant être caractérisées, de la méthode (résistivité électrique) et de la technique utilisée (les diaggraphies).

La diaggraphie utilisée en géologie a des objectifs et des contraintes différentes de ceux établis dans ce projet. Il est essentiel de revenir aux concepts de base de la diaggraphie pour comprendre

## INTRODUCTION

la réponse de l'outil dans un ouvrage en béton et répondre aux exigences du diagnostic. Ainsi, le chapitre 2 regroupe les travaux de modélisation permettant de comprendre la réponse de l'outil de résistivité électrique face à une discontinuité. La modélisation permet notamment d'appréhender les corrections à apporter sur les mesures et de démontrer l'influence de trois paramètres caractérisant la discontinuité : son ouverture, son extension et sa résistivité. La dernière partie du chapitre établit une méthodologie par inversion pour l'estimation des paramètres de la discontinuité.

Le chapitre 3 est une application directe de la sonde électrique normale de résistivité sur un ouvrage réel en situation. Les différents essais effectués durant ces trois ans, appuie l'étude des paramètres de mesures sur site. Ils permettent de définir un protocole de mesure de l'outil efficace pour chaque utilisation. L'analyse des enregistrements révèle le potentiel de la technique à donner une première estimation de l'état de l'ouvrage étudié. L'inversion est ensuite testée sur cet ouvrage afin de proposer une réponse en matière d'endommagement.

Le chapitre 4 est une validation expérimentale effectuée sur un second ouvrage hydraulique. Il s'agit ici de confronter les méthodologies de mesure et d'inversion à un ouvrage différent de celui ayant servi au développement de la méthode. Ce chapitre de validation permet de cerner les avancées et les limites des méthodologies proposées.



# **CHAPITRE 1 REVUE DES CONNAISSANCES**

---

Afin de comprendre le cadre précis dans lequel se situe ce travail, ce chapitre établit une revue des connaissances. Les notions de discontinuités, de résistivité, de mesures en diagraphie et des procédés mis en place sont abordées. Ils permettront d'acquérir une meilleure appréciation des objectifs du projet d'étude et de ses enjeux. Pour cela, nous avons décidé de justifier nos réponses en divisant ce chapitre en quatre parties. La première fait un recensement des discontinuités présentes dans les ouvrages massifs en béton, mais également dans les massifs rocheux en interaction avec l'ouvrage. Le lecteur sera informé du type de discontinuités étudiées et des caractéristiques recherchées. La deuxième se concentre sur la méthode utilisée : la résistivité électrique. Il s'agit d'expliquer la méthode et la pertinence de ce choix. Dans une troisième partie, le chapitre aborde la technique utilisée pour répondre aux objectifs. Ainsi sont présentées les méthodes électriques de forages appelées diagraphies électriques, utilisées essentiellement à des fins pétrolières et hydrogéologiques. Dans une quatrième partie, les procédés aidant à l'interprétation de la diagraphie sont développés.

### **1.1 Les discontinuités dans le béton et les massifs rocheux**

Cette section fait état de la définition d'une discontinuité de manière succincte et générale afin de comprendre l'objet de l'étude. La question des origines de sa mise en place dans les ouvrages massifs en béton et des massifs rocheux en interaction est traitée. Cette partie permet, non seulement, de réaliser un recensement des discontinuités, mais également d'en déterminer la nature qui pourrait être détectée dans le cadre de notre étude. La dernière partie se concentre sur les caractéristiques de la discontinuité. Ainsi, on pourra apprécier les exigences des maîtres d'ouvrages dans le but d'une gestion efficace de leur ouvrage.

#### **1.1.1 Définition de la discontinuité**

Au point de vue de la géomécanique, une discontinuité est une surface où une perte de cohésion a eu lieu. Une discontinuité est considérée comme le résultat du processus de rupture du matériau [Van Golf-Racht, 1982]. En géologie, il existe plusieurs types de discontinuité : (1) des failles qui suggèrent un déplacement relatif de deux compartiments de matériaux (2) des joints où aucun déplacement n'est admis et souvent regroupés en famille (3) des fissures, distribuées aléatoirement (4) la stratification qui représente la succession de couches géologiques et (5) les interfaces définissant des surfaces de contact entre deux matériaux de propriétés différentes.

Pouvant être considéré comme une roche artificielle, le béton est un matériau hétérogène qui n'échappe pas à la présence de discontinuités (cf. 1.2 : Origines des discontinuités). Cependant, certaines de ces discontinuités citées précédemment ne s'observent pas dans notre contexte et doivent être écartées. C'est le cas des failles et de la stratification. À l'échelle pluridécimétrique, le béton est affecté par de nombreuses discontinuités prenant le plus souvent la forme d'une fissuration unique ou d'un groupe de fissures, de joints de reprise de bétonnage ou d'interface (contact entre l'ouvrage et le socle rocheux). De plus, en se plaçant à une échelle plurimillimétrique, une autre forme d'hétérogénéité peut être observée, la porosité (taille des pores).

#### **1.1.2 Origines des discontinuités**

Les discontinuités ont de multiples origines : physiques, chimiques, biologiques ou structurales. Elles peuvent apparaître très tôt c'est-à-dire dès la mise en place du béton (phase de construction) avant tout chargement ou exploitation de l'ouvrage. La détérioration peut ensuite

## 1.1 LES DISCONTINUITÉS DANS LE BÉTON ET LES MASSIFS ROCHEUX

apparaître à n'importe quelle étape dans la vie de l'ouvrage. On retrouvera de la fissuration pendant la construction de l'ouvrage liée à des causes humaines et extérieures, puis lors de la phase d'exploitation. En tout temps, les discontinuités seront créées puis sollicitées entraînant leur expansion et une évolution éventuelle.

### 1.1.2.1 Mise en place du béton

La microfissuration apparaît aux premiers jours de la réalisation de l'ouvrage par la fabrication du béton. Le béton est un matériau hétérogène qui avant toute sollicitation comporte de la microfissuration. Des fissures d'ouverture inférieure à 0.1 mm à l'interface de la pâte de ciment et du granulat se développent en raison de propriétés mécaniques différentes entre les deux éléments [Neville, 2000; Thomas *et al.*, 1963; Rossi, 1988]. Lors du processus de fabrication du béton, le matériau manifeste des variations volumiques en l'absence de charges : on parle de retrait [Ployaert, 2010]. Avant la prise, un retrait plastique se produit à cause de l'évaporation d'une partie de l'eau que contient le béton. Une première microfissuration se développe à cause d'une dessiccation provoquée par une diminution du volume de matériau. Après la prise, il se produit un retrait (1) endogène (2) hydraulique et (3) thermique :

(1) le retrait endogène est lié à une autodessiccation c'est-à-dire une consommation interne de l'eau lors de la réaction d'hydratation. Les produits de la réaction ont un volume massique plus faible que les volumes massiques des réactifs, on parle de contraction Le Chatelier (1900). Lorsque la pâte de ciment n'a pas encore fait prise, la contraction Le Chatelier peut se développer librement. Lorsque la pâte a fait prise et se comporte comme un solide, le squelette solide ainsi créé s'oppose à la diminution de volume.

(2) Le retrait hydraulique (ou retrait de dessiccation ou retrait de séchage) est dû à la diminution du volume de matériau par dessiccation. L'eau occupant les pores capillaires est en état de tension, ce qui a pour conséquence de rapprocher les parois solides les unes des autres.

(3) Le retrait thermique est lié soit au retour du béton à la température ambiante suite à la réaction exothermique importante de la prise du ciment et du durcissement, en particulier dans le cas de grands volumes, soit aux variations climatiques du milieu. Le retrait est un phénomène physico-chimique qui apparaît dès la mise en place du béton et jusqu'à sa maturation. Les différents retraits influent sur les variations de volume du matériau et donc provoquent de nouveaux états de contraintes. Certains chercheurs ont prouvé que le phénomène

## CHAPITRE 1. REVUE DES CONNAISSANCES

d'autodessiccation provoquait des contraintes de traction dans les plans tangents à l'interface pâte-granulat et des contraintes de compression dans les plans perpendiculaires à cette interface [Thomas et HSU, 1963]. Ces contraintes peuvent entraîner une microfissuration initiale sans sollicitation extérieure de charge.

Durant la mise en place du béton, notamment lorsque le béton est frais, il se produit le ressuage. Ce phénomène se manifeste par l'apparition d'une fine pellicule d'eau à la surface du béton. Le ressuage est lié à un tassement progressif du squelette sous l'influence de la gravité favorisant la remontée de l'eau en surface (ségrégation). Des fissures sont occasionnées par cette ségrégation lorsque le matériau est restreint soit par de l'armature ou par des coffrages.

### 1.1.2.2 Construction de l'ouvrage

#### *Qualité de la réalisation*

Lors de la construction de l'ouvrage, la qualité de la réalisation joue un rôle dans la qualité à long terme de la structure. Il est courant d'ajouter de l'eau au béton pour améliorer son ouvrabilité. Cette action fait augmenter le rapport E/C (Rapport Eau/Ciment) et remplit les cavités capillaires. La distance entre les granulats augmente et le béton devient, à terme, plus poreux, plus perméable et moins résistant mécaniquement. Il arrive aussi qu'on néglige l'étape de la maturation essentielle dans la réduction de l'action du retrait. Une période de maturation inadéquate entraîne une baisse de la résistance à long terme, mais aussi une réduction notable de la durabilité [Lapointe, 1997].

Les conditions climatiques dans lesquelles va se dérouler la construction influencent également la qualité de l'ouvrage. La température extérieure va jouer un rôle sur la prise et le durcissement du béton. Des variations de température déstabilisent les réactions d'hydratation du ciment. Par des températures faibles, le temps de prise et le durcissement ralentissent. Par des températures élevées, l'évaporation est favorisée et engendre une dessiccation.

#### *Construction de l'ouvrage*

D'un autre point de vue, il existe des discontinuités induites dans la construction comme les joints de béton ou l'interface avec le socle rocheux soutenant l'ouvrage. Les reprises de bétonnage (ou joints) sont des plans marquant la mise en place, à un temps différent, de deux parties en béton de la structure. Au contact du bloc inférieur déjà durci, le béton frais va

## 1.1 LES DISCONTINUITÉS DANS LE BÉTON ET LES MASSIFS ROCHEUX

développer un retrait favorisant sa fissuration. Pour les bétons anciens, les joints représentent des plans de faiblesse de la structure favorisant notamment l'entrée d'agents érosifs. La malfaçon ne peut engendrer qu'une accélération de la dégradation de l'ouvrage. Il est également important de citer le contact roche/béton qui représente tout autant que le joint de béton une zone favorable à l'infiltration d'eau.

De la même manière avant l'étape de la construction, plus particulièrement pendant l'étape de la conception de l'ouvrage, l'étude du substratum rocheux est essentielle dans la durabilité de l'ouvrage. Selon le type de roche, des actions doivent être prises pour assurer la stabilité de l'édifice et éviter des désagréments à long terme. Par exemple, les roches schisteuses ou foliées présentent une forte anisotropie due à sa structure planaire. Soumises à des changements de contraintes ou de climats et à l'érosion, les discontinuités entre chaque unité sont des zones vulnérables de la roche. Pour les schistes, l'espace entre chaque feuillet représente des plans de faiblesses sujets à l'altération et à l'infiltration d'agents érosifs. Pour les structures foliées, de fortes contraintes peuvent amener à une fracturation, le plus souvent dans les lits de minéraux sombres représentés par les micas.

Selon son histoire géologique, la roche peut également être affectée par d'autres types de discontinuités d'ordre mécaniques tels que les failles, les joints ou les diaclases. Il n'est pas rare au Québec que les roches possèdent une forte fracturation. Au Quaternaire, la formation de glaciers de quelques kilomètres d'épaisseur a provoqué l'enfoncement de continents. Avec le processus de fonte, les continents se sont relevés causant une fracturation dite de décompression.

### 1.1.2.3 En cours d'exploitation de l'ouvrage

L'ouvrage, au cours de son exploitation, est soumis à des modifications structurales et climatiques et à des réactions internes dans le béton. Ces changements produisent de la détérioration ou accentuent la fissuration déjà présente.

#### *Fonctionnement mécanique*

Le fonctionnement mécanique regroupe des questions de mouvements de structure et de la prise de charges imprévues. Un mauvais dimensionnement de l'ouvrage provoque un déséquilibre au niveau des contraintes. Il est important de comprendre le comportement de la structure avec son environnement. Une mauvaise analyse du sol porteur et de la répartition des charges peut

## CHAPITRE 1. REVUE DES CONNAISSANCES

entraîner des tassements différentiels qui se traduisent généralement par des fissurations. Des variations ou une prise imprévue de charges fatiguent également l'ouvrage et génèrent des discontinuités [ACI Committee 224, 1984].

### *Conditions climatiques*

Lors de la phase d'exploitation, l'ouvrage est soumis à des variations de température dues aux changements climatiques saisonniers et journaliers (important au Québec). Le cycle gel/dégel est un exemple concret de l'impact important du phénomène sur la structure béton. Il entraîne deux types de détérioration : une fissuration interne et un écaillage de la surface. En ce qui concerne la fissuration interne, elle se manifeste par une microfissuration à l'intérieur de la masse de béton. Sa propagation dépend de la protection dont bénéficie l'ouvrage, de la qualité du béton, du nombre de cycles gel/dégel et de l'intensité du phénomène. L'apparition d'une fissuration interne est liée à la présence d'eau interstitielle saturant les pores du béton.

Sous l'effet d'une température négative, l'eau gèle et augmente son volume de 9%. Ce gonflement en partie provoqué par la formation de glace dans la porosité induit une augmentation de la pression dans les pores. Lors du réchauffement, l'eau dégèle et la pression diminue. La répétabilité du cycle entraîne une fatigue du matériau et favorise l'apparition d'une fissuration [Zhifi, 2004].

### *Réactions chimiques*

L'alcali-réaction regroupe toutes les réactions se produisant avec les granulats réactifs [Fournier et Bérubé, 2000]. Il existe deux types de réaction : (1) la réaction alcali-silice (RAS) et alcali-carbonate. La RAS est une réaction entre les ions  $\text{OH}^-$  de la solution interstitielle du béton et de certaines phases solides siliceuses réactives dans les granulats (fins ou grossiers). Ce processus se réalise en deux étapes : (1) dissolution de la silice et (2) accumulation de gel dans les pores capillaires et les fissures de la pâte de ciment et des granulats. Ce gel a la propriété d'absorber l'eau et de faire augmenter le volume de la matrice. De ce fait, le gonflement entraîne un développement des contraintes internes menant à une microfissuration diffuse dans la matrice et les granulats. En surface, l'absence de confinement des contraintes se traduit par une fissuration de forme polygonale avec des profondeurs de quelques centimètres à plus de 10 cm.

## 1.1 LES DISCONTINUITÉS DANS LE BÉTON ET LES MASSIFS ROCHEUX

La présence de sulfates est un autre problème pour les bétons [Skalny *et al.*, 2002]. Les attaques sulfatiques, qu'elles soient externes ou internes, entraînent la formation d'ettringite. L'ettringite est un produit d'hydratation du C<sub>3</sub>A en présence de sulfates. Son rôle est de régulariser la prise du C<sub>3</sub>A, car au contact avec l'eau et en l'absence de sulfates, le C<sub>3</sub>A forme des cristaux des aluminates de calcium hydratés. Dans un milieu externe agressif, humide et riche en sulfates, le béton est soumis à des attaques par pénétration des ions SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> et provoquent la formation de gypse et d'ettringite (ettringite secondaire). Son expansion entraîne de la fissuration et de l'éclatement superficiel du béton. À l'intérieur de l'ouvrage sous des conditions d'humidité et de température élevées, les ions sulfates dont l'origine est liée à la composition du béton servent à la formation différée de l'ettringite. Il se produit un gonflement au cœur de la structure et une fissuration. Cette dégradation tend à progresser dans le temps jusqu'à une destruction du béton.

D'autres réactions chimiques se produisent en présence d'armature. La corrosion des aciers est causée principalement par la carbonatation [Chaussadent, 1999] et les attaques de chlorures. La carbonatation est identifiée comme la réaction entre le dioxyde de carbone de l'air ou dissout dans l'eau de pluie avec l'élément Ca(OH)<sub>2</sub> dans le béton. Ce phénomène produit du carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) et de l'eau (H<sub>2</sub>O). Le milieu devient plus acide faisant chuter le pH de 13 à 8.5 et entraîne la dépassivation des armatures en acier qui peut induire leur corrosion. En ce qui concerne les attaques par chlorures, elles se produisent par la pénétration des ions Cl<sup>-</sup> dans le béton. L'entrée des ions chlorures entraîne une corrosion électrochimique des armatures [A. Neville, 1995]. Tout comme la carbonatation, des éclatements dans ces zones se manifestent. Ce type de discontinuités rencontré en surface ne fera pas l'objet d'une étude dans le cadre de cette thèse.

### 1.1.3 Exigences des maîtres d'ouvrage

La présence de discontinuités augmente la perméabilité et le transport de fluide dans toute la structure [Torrijos *et al.*, 2010]. L'entrée d'agents agressifs par les pores, les fissures, les joints ou les interfaces contribue d'autant plus à la dégradation. Pour le maître d'ouvrage, il est important de fournir des informations pertinentes sur l'état de la structure. Ceci entre en compte dans une aide à la décision dans le cadre d'une stratégie de surveillance et de maintenance de l'ouvrage [Breysse et Abraham, 2005].

## CHAPITRE 1. REVUE DES CONNAISSANCES

L'approche pratique consiste à reconnaître la présence de ces discontinuités au sein des ouvrages et de déterminer leurs caractéristiques à partir desquelles elles deviennent préjudiciables, autrement dit à partir desquelles des actions de réparation, impliquant un coût, doivent être appliquées.

Des contrôles non-destructifs basés sur les concepts de la géophysique sont utilisés pour mesurer des grandeurs physiques et déduire des informations sur les discontinuités. On peut ainsi : (1) détecter (une discontinuité, une zone d'endommagement...) (2) localiser (position et profondeur) et (3) caractériser (ouverture, activité, extension, pendage et remplissage) [J. F. Lataste *et al.*, 2001]. En termes de caractérisation, l'ouverture est définie par l'espace existant entre les lèvres. Les discontinuités deviennent visibles à l'œil nu à partir de 0,1mm. Selon leur dimension, les discontinuités sont qualifiées de fissures : (1) très fines (<0,5mm); (2) fines (comprises entre 0,5mm et 1mm); (3) moyennes (comprises entre 1mm à 2 mm); et (4) larges (>2mm) [Lapointe, 1997].

En ce qui concerne l'activité d'une fissure, elle se mesure par la variation de son ouverture et sa capacité à contribuer ou non au transfert de fluide [Gérard *et al.*, 1997]. Ainsi, on peut distinguer, les fissures actives (ou évolutives) et passives (ou mortes). Les fissures actives s'ouvrent et se referment selon les mouvements de l'ouvrage. Elles favorisent les processus de transfert affectant les propriétés du béton. Les fissures passives ou mortes ont une ouverture qui ne varie plus dans le temps même quand elles sont soumises aux diverses sollicitations.

Une des caractéristiques les plus recherchées est l'extension de la discontinuité. La fissure peut être de surface, traversante ou aveugle. Les fissures de surface ne traversent pas l'épaisseur de l'ouvrage et présentent des extensions pluricentimétriques. Pour une fissuration liée à l'alcali-réaction, les profondeurs des fissures varient de quelques centimètres à des profondeurs supérieures à 10 cm [ISE, 1992]. Leur ouverture va être maximale en surface et nulle à l'intérieur de l'ouvrage. D'autres discontinuités sont dites traversantes. Elles pénètrent de part et d'autre des faces de l'ouvrage. Certaines sont qualifiées de fissures aveugles, car elles sont non accessibles d'un ou plusieurs côtés de la structure.

Au niveau du pendage de la discontinuité, elle peut être subverticale, subhorizontale, oblique et/ou aléatoire. Le pendage pris par la fissuration dépend de la sollicitation subie par l'ouvrage. Une étude de la fissuration d'un barrage-poids soumis aux charges et à des contraintes

## 1.2 AUSCULTATION PAR LA MÉTHODE DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

thermiques (variation de température), a montré principalement des discontinuités subhorizontales, obliques et plongeantes [Boukhtouta, 1993].

Selon l'état supposé de la structure et le type de discontinuité, l'exigence n'est pas la même. Sur un ouvrage a priori sain, les efforts sont concentrés sur la surveillance et la vérification. Sur un ouvrage endommagé, il va être demandé de détecter l'extension de l'endommagement.

Sur un ouvrage visiblement endommagé, la caractérisation est privilégiée. Dans tous les cas, le but principal est d'apprécier la qualité de la discontinuité pour déterminer de son état préjudiciable ou pas. En ce qui concerne les joints ou les interfaces, les informations recherchées sont axées sur l'ouverture, l'activité et le remplissage de la discontinuité. Pour une fissure ou un réseau de fissures, en ajout aux paramètres d'ouverture, d'activité et de remplissage, le pendage et plus particulièrement l'extension sont des caractéristiques exigées par le maître d'ouvrage.

### 1.2 Auscultation par la méthode de résistivité électrique

L'auscultation est un examen précis de l'ouvrage par l'intermédiaire de mesures spécifiques. Le livrable est un diagnostic faisant état de la qualité de la structure en révélant notamment les zones altérées et leurs activités. De nombreuses techniques sont utilisées en particulier les contrôles non-destructifs (CND) basés sur les principes physiques de l'électromagnétisme, de l'électrique, de l'optique, de l'acoustique ou de la thermique. Dans le cadre de cette thèse, la méthode utilisée est la résistivité électrique. Cette partie aborde les concepts de base de la méthode et identifie la pertinence de cette dernière pour la caractérisation des discontinuités.

#### 1.2.1 Définition de la résistivité électrique

La résistivité électrique est définie comme la capacité d'un milieu à s'opposer au passage du courant c'est-à-dire la résistance d'un matériau de longueur 1 m et de section 1m<sup>2</sup> face à une circulation électrique. La résistivité s'exprime par l'équation Éq. 1.1 :

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad \text{Éq 1-1}$$

Où  $\rho$ ,  $R$ ,  $L$  et  $S$  représentent respectivement la résistivité en Ohm.m, la résistance en Ohm, la longueur en m et la surface de la section en m<sup>2</sup>. Des valeurs de résistivité pour divers matériaux sont montrées en Figure 1- 1.

## CHAPITRE 1. REVUE DES CONNAISSANCES

La mesure de la résistivité s'obtient en créant un champ électrique par l'intermédiaire d'une source ponctuelle de courant A. Dans un milieu homogène et isotrope, les lignes de courant se répartissent de manière uniforme dans toutes les directions. Perpendiculairement à ce champ électrique, se dessinent des équipotentielles demi-sphériques dont le rayon augmente à mesure que l'on s'éloigne de l'électrode d'injection (Figure 1- 2) [Heiland, 1946; Telford *et al.*, 1990].

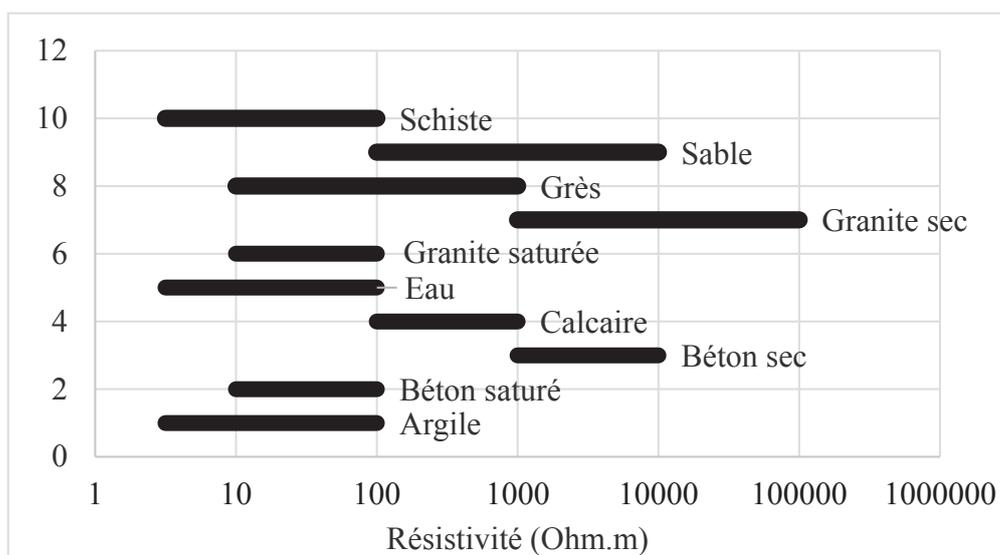


Figure 1-1 : Résistivité électrique de divers matériaux [Whiting et Nagi, 2003]

Les différences de potentiel entre deux équipotentielles successives sont proportionnelles à l'intensité du courant et reflètent les variations de résistivité (Éq. 1.2).

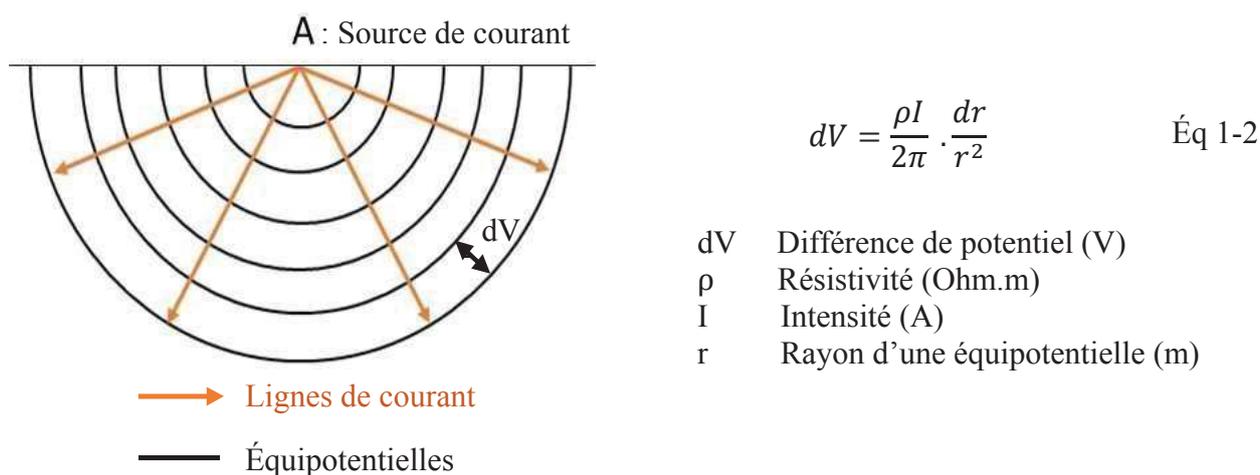


Figure 1-2 : Répartition des lignes de courant et des équipotentielles dans un sol homogène et isotrope

## 1.2 AUSCULTATION PAR LA MÉTHODE DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

Cependant, d'un espacement d'équipotentiels à un autre, le résultat est différent. En 1920, la notion de résistivité apparente fait son apparition et s'exprime par le ratio entre la différence de potentiel et l'intensité du courant émis, multiplié par un facteur géométrique ( $k$  en m) correspondant au dispositif utilisé (Éq. 1.3).

Par définition, la résistivité apparente est une valeur globalisant les résistivités du milieu compris dans un certain volume caractérisé par le dispositif mis en place. D'ailleurs, le volume, lui-même, n'est pas clairement défini, car la densité de courant n'atteint pas la valeur zéro immédiatement, mais diminue graduellement dans toutes les directions.

$$\rho_a = k \cdot \frac{dV}{I} \quad \text{Éq 1-3}$$

### 1.2.2 Les propriétés électriques dans le béton

Dans la roche, la circulation du courant est produite selon trois modes de conduction [Heiland, 1946; Lasfargues, 1957]. La conduction électronique ou métallique, la conduction électrolytique et la conduction diélectrique. La première est représentée par le mouvement macroscopique d'électrons libres sans transport de matière. La conduction électrolytique est, quant à elle, associée aux mouvements des ions contenus dans l'eau d'imbibition i.e. une eau saturant les pores du matériau et/ou une discontinuité. La conduction de courant dans les électrolytes dépend non seulement de la mobilité, mais également du nombre d'ions. Et enfin, la conduction diélectrique est liée aux mouvements d'oscillations microscopiques des électrons autour du noyau des atomes constituant le matériau. Ce phénomène est mis en jeu avec les méthodes hautes fréquences ou les techniques électromagnétiques.

De même qu'une roche, le béton est un matériau hétérogène en raison de sa composition (proportion entre le ciment et le granulat, la nature des constituants...), sa mise en place (joints de coulée) et les conditions environnementales qu'il subit. Le béton est un matériau triphasique composé de granulats de tailles variables, d'une matrice (la pâte de ciment) et d'une porosité remplie par des fluides (air et/ou eau). Dans cette configuration hétérogène, la conduction électrique est décrite comme un courant pouvant emprunter trois chemins différents : un chemin à travers le granulat et la pâte, un autre à travers les granulats au contact les uns des autres et le dernier à travers la pâte seulement [Whittington *et al.*, 1981]. Cependant, la résistivité des

granulats étant considérée très élevée, le courant circule principalement dans la pâte et la porosité.

Selon son degré d'humidité, le béton change de comportement. Un béton humide se comporte comme un électrolyte i.e. le courant circule, essentiellement, dans la phase liquide contenue dans la pâte de ciment [Nikkanen, 1962]. Cette conduction s'établirait au moyen des ions se trouvant dans l'eau évaporable du ciment comme le  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$  et  $\text{SO}_4^-$  [Hammond et Robson, 1975; Monfore, 1968]. La circulation du courant peut-être due à la conduction électronique à travers le gel (produit d'hydratation du ciment), gel-eau et les particules de ciment non réactives. Cependant, elle est considérée par les auteurs cités auparavant comme négligeable face à la conduction électrolytique. A contrario, un béton totalement sec devient un matériau isolant [Neville, 2000]. Le passage du courant se fait à travers les pores de gel par conduction diélectrique.

Dans le cadre de cette thèse, les travaux sont réalisés sur des bétons totalement saturés. Par conséquent, la circulation du courant est liée, principalement, à la conduction électrolytique.

### 1.2.3 Aptitudes de la méthode de résistivité électrique

#### 1.2.3.1 Relation résistivité/porosité

La circulation du courant est régie par la connectivité et la tortuosité de la porosité, mais également par la nature du fluide et le degré de saturation du matériau. Lors d'études sur des roches sédimentaires saturées, Archie (1942) développa une relation empirique entre la résistivité de la roche consolidée et non consolidée saturée,  $\rho_t$  (Ohm.m), la résistivité du fluide de saturation,  $\rho_w$  (Ohm.m), la porosité,  $\emptyset$  et le degré de saturation de la roche,  $S$  [Archie, 1942]. La relation d'Archie est définie par l'équation Éq. 1.4 :

$$\rho_t = a \cdot \emptyset^{-m} \cdot S^{-n} \cdot \rho_w \quad \text{Éq 1-4}$$

Où  $a$ ,  $m$  et  $n$  représentent respectivement le facteur lithologique, le facteur de cimentation et le facteur de saturation. Ce sont des coefficients intrinsèques au matériau. On considère que  $a < 1$  pour les roches à porosité intergranulaires et  $a > 1$  pour des roches ayant en plus une porosité de fracture. Le facteur  $m = 1,3$  représente les sables non consolidés et  $m = 2,2$  les calcaires cimentés. Le facteur de saturation,  $n$ , est influencé par la résistivité du fluide et la perméabilité

## 1.2 AUSCULTATION PAR LA MÉTHODE DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

de la roche. Le facteur de saturation  $n$  est considéré être égal à 2 [Von Gonten et Osoba, 1969; Gomez-Rivero, 1976]. Pour un milieu totalement saturé i.e.  $S^n$  égal à 1, la formule s'écrit le plus souvent en intégrant le facteur de formation,  $F$  (Éq. 1.5).

$$F = \frac{\rho_t}{\rho_w} = a \phi^{-m} \quad \text{Éq 1-5}$$

En ce qui concerne le béton, Whittington et *al.* (1981) donnent une application de la formule au béton en définissant le facteur de formation comme le ratio de la résistivité du béton mesuré par rapport à la résistivité de la pâte de ciment,  $\rho_c$ , tout en remplaçant la porosité du béton  $\phi$  par la fraction volumique de la pâte de ciment dans le béton. Naar (2006) propose comme gamme de valeurs pour ces paramètres sur les bétons : 0.1 à 0.8 pour  $a$  et 2 à 7 pour  $m$ .

Certains chercheurs complètent les études précédentes sur le facteur de formation [Tumidajski *et al.*, 1996]. Ils proposent une extension de la loi d'Archie en introduisant la tortuosité,  $\tau$  et la « constrictivité »,  $\delta$ . Ces deux notions conditionnent les processus de transport dans les milieux poreux. Ainsi, grâce aux multiples expériences, ils présentent une modification de l'équation Éq. 1.5 sous la forme suivante (Éq. 1.6) :

$$F = \left( \frac{\tau^2}{\delta} \right) \phi^{-m} \quad \text{Éq 1-6}$$

Où  $F$ ,  $\tau$ ,  $\delta$ , et  $m$  sont définis précédemment et  $\phi$  représente la porosité du béton.

Tumidajski *et al.* (1996) ont travaillé sur de la pâte de ciment de Portland avec des ratios eau/ciment différents à des phases d'hydratation importantes (29 ans). In situ, ils ont mesuré la résistivité du béton et du fluide de saturation afin d'identifier la valeur de  $F$ , puis ils ont déterminé la porosité du ciment. En rapportant le logarithme népérien de  $F$  en fonction du logarithme népérien de la porosité, il est possible de déterminer  $m$  et  $\frac{\tau^2}{\delta}$ . Il s'avère que la mesure du paramètre  $m$  est du même ordre de grandeur que celle déterminée par Archie c'est-à-dire  $m=2$ . Ainsi, la nouvelle forme de l'équation d'Archie apparaît être applicable pour des systèmes de pâte extrêmement bien hydratés.

### 1.2.3.2 Concept de double porosité

La porosité peut prendre deux formes : la porosité de pores et la porosité de fissuration. La double porosité a été développée pour l'étude des fractures naturelles des réservoirs de pétrole

## CHAPITRE 1. REVUE DES CONNAISSANCES

[Pirson, 1967; Aguilera, 1979] et étendue par la suite pour l'analyse d'un aquifère [Tselentis, 1985b]. Ils avancent, en supposant que la matrice est non-conductrice, que le courant électrique dans le sol va circuler selon deux chemins ; un à travers les fissures et l'autre à travers les pores saturés de la matrice. L'hypothèse est qu'il existe deux systèmes de porosité différents connectés en parallèle.

Tselentis (1985) introduit un nouveau paramètre permettant d'établir une mesure quantitative concernant la répartition de la porosité totale entre la porosité de la matrice et la porosité de la fracture (la double porosité) [Tselentis, 1985c]. Ce paramètre est la fraction du volume de pores contenue dans les fractures. On parle d'indice de fracture de l'aquifère, noté  $f$  (Éq. 1.7).

$$f = \frac{\phi_f}{\phi} = \frac{(\phi - \phi_o)}{(1 - \phi_o)} \quad \text{Éq 1-7}$$

Où  $\phi_f$ ,  $\phi$  et  $\phi_o$  représentent respectivement la porosité de la fissure, la porosité totale et la porosité de la matrice. La porosité totale, par définition, est le rapport du volume des vides et du volume du matériau. La porosité de la fissure est définie comme le rapport entre la section transversale fissurale et la section transversale moyenne. La porosité de la matrice est la porosité de la roche sans prendre en compte la porosité de fissure. Ainsi, la résistivité apparente du milieu peut s'écrire selon l'équation Éq. 1.8.

$$\frac{1}{\rho_a} = f \cdot \phi \cdot \frac{1}{\rho_w} + (1 - f \cdot \phi) \cdot \frac{1}{\rho_t} \quad \text{Éq 1-8}$$

Où  $\rho_a$ ,  $\rho_w$  et  $\rho_t$  représentent respectivement la résistivité apparente (Ohm.m), la résistivité du fluide de saturation (Ohm.m) et la résistivité vraie de la roche saturée.

Cette équation est exploitée [Tselentis, 1985a] pour évaluer la dépendance de la résistivité mesurée par un outil géophysique de forage sur les combinaisons possibles de résistivités de formation et de fracture. Il en conclut que pour de faibles valeurs de résistivité de fracture (ou fissures) la résistivité apparente dépend fortement des degrés de fracturation de la formation et de la résistivité des fractures. De plus, pour les fortes valeurs de résistivité de la matrice, l'effet des fractures sur la résistivité apparente dépend de l'indice de fracture. Plus faible est l'indice de fracture, plus la dépendance entre la résistivité apparente et la résistivité de la matrice sera forte. Ceci est d'autant plus vrai, lorsque la porosité est faible.

## 1.2 AUSCULTATION PAR LA MÉTHODE DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

### 1.2.3.3 Aptitude de la méthode sur le béton : Premiers résultats

De premiers travaux en impédance électrique (courants alternatifs) traitent des mécanismes de propagation des fissures dans des composites à base de ciment. Cette étude entre dans le cadre d'un suivi en cours de développement de la fissuration par une méthode électrique [Gu *et al.*, 1993]. D'autres études plus récentes sur la tomographie électrique de résistance viennent appuyer l'applicabilité des méthodes électriques pour évaluer les propriétés du béton [Karhunen *et al.*, 2010]. Ils démontrent que différents types d'inclusions peuvent être détectées et localisées en utilisant ce procédé notamment en termes d'estimation de la profondeur des fissures et des distributions d'humidité. La méthode électrique de résistivité, celle développée dans cette thèse, a également été testée dans le cadre de la détection des fissures de surface de l'ordre du millimètre dans un matériau de type béton [J. F. Lataste *et al.*, 2002]. Le dispositif utilisé est composé de quatre électrodes disposées en carré avec un espacement de 5 cm. Deux électrodes voisines injectent le courant tandis que les deux autres mesurent la différence de potentiel. Il est ainsi mis en évidence que dans le cas d'une fissure isolante, la résistivité apparente augmente lorsque le courant électrique est perpendiculaire à l'hétérogénéité (Figure 1.3 a.). Cependant, la résistivité apparente diminue pour la configuration inverse c'est-à-dire lors d'une injection de courant parallèle à la fissure (Figure 1.3 b.).

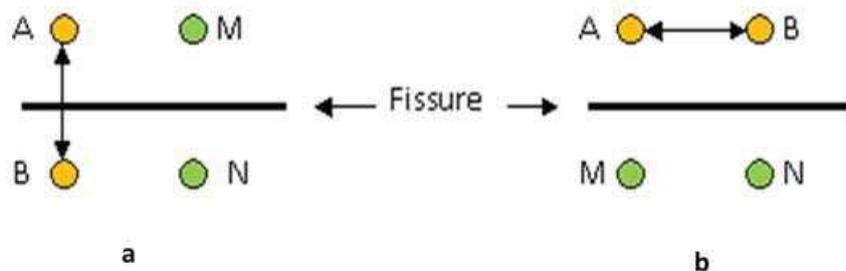


Figure 1-3 : Schéma de configuration entre AB perpendiculaire à la fissure (a) et AB parallèle à la fissure (b)

Dans le cas d'une fissure conductrice, il est impossible de détecter sa présence pour un courant perpendiculaire à la fissure. Ce qui n'est pas le cas pour un courant parallèle. La résistivité diminue davantage que pour une fissure isolante. Ainsi, en plus d'une détection nette de l'endommagement, leur caractéristique est mise en avant. La différence entre les fissurations isolantes et conductrices est déterminée ainsi que leur orientation. Lors de la validation par des travaux expérimentaux, un autre paramètre de quantification est mis en évidence.

Il s'agit de la profondeur de la fissure dans le béton. Plus l'hétérogénéité est profonde dans le béton, plus la perturbation est importante. Dans cette même étude, il est question également de prendre en compte l'impact de l'ouverture de la fissure c'est-à-dire l'influence des contacts qui existent entre les lèvres d'une fissure. De telles caractéristiques déterminent directement la circulation du courant électrique. Cette fissure est schématisée par des résistances électriques en parallèle de valeurs déterminées par leur nature (air, poussières...) ou par de la matière solide comme les granulats. Ainsi, elle peut être assimilée par une résistivité équivalente qui n'est d'autres que la moyenne harmonique pondérée des résistances en parallèle. Grâce à une modélisation par éléments finis prenant en compte une fissure équivalente isolante et conductrice d'une profondeur donnée, Lataste *et al.* (2002) ont pu tirer deux conclusions pertinentes :

- D'une part, l'influence de la fissure est importante lorsque le contraste entre cette dernière et le matériau est conséquent. Pour l'étude, la valeur du contraste (résistivité du béton/résistivité de la fissure équivalente) est supérieure à 300. D'autre part, les auteurs assimilent le problème de densité des contacts des bords de la fissure à celui des variations de l'ouverture de la fissure.
- Le quadripôle présenté dans cette étude utilise un espacement de 5 cm pour des fissures de l'ordre du millimètre avec une certaine profondeur dans le béton. Il est mis en évidence que la perturbation tend vers une valeur asymptotique à partir d'une profondeur égale à la distance entre les sondes. Dans cette étude, on peut donc se rendre compte de l'importance de l'espacement entre électrodes qui conditionne en partie les limites du volume d'investigation et la résolution verticale.

Le dispositif a pu être, une fois de plus, testé sur le béton [Naar, 2006]. Il a permis de révéler les conditions hydriques de l'ouvrage, de contribuer au diagnostic de l'endommagement et de caractériser les fissures et les délaminations. Ainsi, ces études montrent l'efficacité des méthodes électriques de surface dans la recherche des hétérogénéités.

### **1.3 La diaggraphie électrique**

Cette section présente la diaggraphie électrique, moyen utilisé pour atteindre les objectifs de cette thèse. Une définition générale permettra d'apprécier l'étendue des capacités de la diaggraphie. Dans une partie plus technique, les concepts physiques et mathématiques de la diaggraphie

## 1.3 LA DIAGRAPHIE ÉLECTRIQUE

électrique en dispositif normal sont présentés. Cette section s'achève avec un recensement des paramètres enregistrés au cours des investigations géophysiques.

### 1.3.1 Qu'est-ce que la diagraphie?

En grec « diagraphie » se compose de *dia* « à travers » et de *graphein* « dessiner », elles sont des méthodes directement associées au forage. Elles permettent la mesure, en continu, des caractéristiques des formations lithologiques successives. Très utilisées dans l'industrie du pétrole, les diagraphies constituent des techniques efficaces pour l'évaluation des réservoirs.

Il existe la diagraphie instantanée c'est-à-dire des mesures en cours de forage (enregistrement des paramètres de forage) et la diagraphie différée, des mesures réalisées après la phase de forage. Les diagraphies différées consistent à insérer dans le forage une sonde à l'aide d'un câble armé puis à remonter avec une certaine vitesse d'enregistrement [Serra, 1979; Desbrandes, 1982]. La réponse diagraphique ou log est la représentation des mesures effectuées selon un pas d'échantillonnage en distance, fixé par l'opérateur, le long du forage. Les sondes détectent les phénomènes naturels, ou dits passifs, comme la polarisation spontanée, la susceptibilité magnétique, la radioactivité naturelle, la température, etc. Mais, le plus souvent, elles peuvent enregistrer des informations obtenues par une stimulation du milieu notamment par le passage de courants électriques, des bombardements radioactifs ou des vibrations acoustiques. On parle alors de méthodes actives. Le Tableau 1.1 regroupe les principales diagraphies différées, les informations récoltées et les applications rencontrées de nos jours.

La diagraphie électrique de résistivité est celle développée dans cette thèse et plus particulièrement le dispositif normal (cf. Chapitre 1 § 1.3.2). L'utilisation de cette technique est variée. Elle a été utilisée pour l'optimisation de l'hydro fracturation de terrains accidentés [M. Beck *et al.*, 2001; Jamtlid *et al.*, 1984], dans la caractérisation de la dynamique de karst [Angulo *et al.*, 2011] ou dans la détermination de discontinuités dans l'encaissant et de leurs paramètres physiques [Luthi et Souhaité, 1990; Tselentis, 1986].

Types de diagrapie	Mesures	Informations obtenues	Exemples d'application
Électriques	Résistance, Résistivité et Polarisation spontanée	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Géométrie et composition minéralogique des bancs</li> <li>- Faciès</li> <li>- Porosité</li> <li>- Fracturation et Fissuration</li> <li>- Degré de saturation</li> <li>- Nature des fluides</li> <li>- Argilosité (SP)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Investigation et interprétation de sédiments de subsurface non-consolidés et semi-consolidés (Électrique) [Chaterji et Sinha, 1962]</li> <li>- Études préliminaires pour l'implantation de tunnels (Électrique) [Denis <i>et al.</i>, 2002].</li> </ul>
Nucléaires	Gamma Ray naturel, Gamma-Gamma, Neutron	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Géométrie et composition minéralogique des bancs</li> <li>- Argilosité</li> <li>- Porosité secondaire</li> <li>- Nature des fluides</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identification et détermination de la profondeur et de l'épaisseur des couches de charbon (Électrique et Nucléaire) [Kayal, 1979]</li> </ul>
Acoustiques	Temps de trajet et amplitude de l'onde	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Géométrie et composition minéralogique des bancs</li> <li>- Porosité secondaire</li> <li>- Argilosité</li> <li>- Module de Young et de rigidité, Coefficient de Poisson)</li> <li>- Fracturation/Fissuration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interprétation des données géophysiques à partir de séquences de basalte (Nucléaires, Électriques, Thermique) [Helm-Clark <i>et al.</i>, 2004]</li> </ul>
Thermique	température	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faciès</li> <li>- Gradient géothermique</li> <li>- Température des formations</li> <li>- Fracturation/Fissuration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Évaluation des dommages pour une structure en béton (Acoustiques et optiques) [Kabir <i>et al.</i>, 2009]</li> </ul>
Mécanique	Diamètre du trou	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Géométrie et composition minéralogique des bancs</li> <li>- Faciès</li> <li>- Fracturation/Fissuration</li> </ul>	

Tableau 1-1 : Informations et exemples d'application des principales diagrapies différées

### 1.3.2 Dispositif normal

Le dispositif normal possède une électrode de courant, conventionnellement nommée A injectant un courant d'intensité  $I$  dans le forage. Le retour de courant se fait par l'électrode B implantée en surface tout le long de la manipulation. Ces électrodes d'injection sont complétées par des électrodes de mesures M et N mesurant la différence de potentiel (Figure 1- 4). Le dispositif normal s'agence de telle sorte que les électrodes A et M soient proches et les électrodes B et N soient éloignées et placées en surface. En pratique, l'électrode N est fixée à la sonde et est descendue dans le trou du forage pour éviter tout phénomène d'inductance. La distance entre M et N est considérée très grande par rapport à l'espacement AM. Ainsi, les électrodes B et N

### 1.3 LA DIAGRAPHIE ÉLECTRIQUE

sont dites à l'infini. L'ensemble du dispositif est comparable à un dispositif de surface de type pôle-pôle [Hallenburg, 1984].

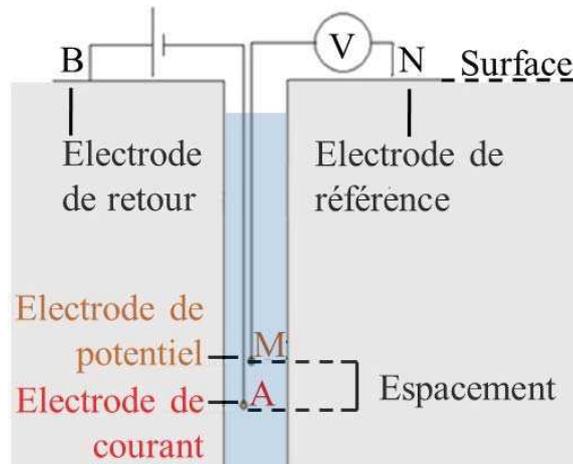


Figure 1-4 : Schéma du dispositif normal

Dans le cas d'une source de courant enterrée, les lignes de courant se répartissent de manière uniforme dans toutes les directions. Les équipotentielles sont sphériques avec un diamètre augmentant au fur et à mesure de l'éloignant du point d'injection. La différence de potentiel ( $dV$ ) s'écrit selon l'équation Éq. 1.9.

$$-dV = \frac{\rho I}{4\pi \cdot r^2} \cdot dr \quad \text{Éq 1-9}$$

Où  $\rho$  est la résistivité (Ohm.m),  $I$  est l'intensité (A) et  $r$  le rayon (m). Pour un dispositif normal, le calcul de la résistivité apparente  $\rho_a$  va dépendre du potentiel mesuré en M, de l'intensité injectée en A et du facteur géométrique de l'outil ( $4\pi AM$ ) (Éq. 1.10). Ce facteur géométrique est en fonction de l'espacement utilisé  $AM$  et du contexte enterré représenté par un coefficient de  $4\pi$ .

$$\rho_a = 4 \cdot \pi \cdot AM \cdot \frac{V}{I} \quad \text{Éq 1-10}$$

Où  $AM$  est l'espacement entre l'électrode de courant A et l'électrode de potentiel M.  $V$  représente la mesure de potentiel faite en M.

L'espacement  $AM$  est fixé, en général, à 16'' (0.4 m) pour la configuration appelée petite normale ou à 64'' (1.6 m) nommée la grande normale. Mais il existe des sondes où l'espacement peut correspondre à 8'' (la très petite normale fixée à 0.2 m) et 32'' (la moyenne normale fixée

à 0.8 m). L'augmentation de l'espacement permet d'investiguer des volumes de matériau plus importants autour du forage (cf. § 1.3.3.1).

Le dispositif normal et plus généralement les diagraphies de résistivité demandent certaines conditions d'application. Le contact électrique entre les électrodes portées par la sonde et le terrain doit être de bonne qualité. Les tubages métalliques et les tubages plastiques tout le long du forage sont exclus. Si le forage est tubé avec un tubage plastique, celui-ci doit être crépiné [Lagabrielle, 1999]. Cependant pour atteindre les objectifs de cette thèse, il sera préférable que le forage ne possède aucun tubage. De plus, le forage doit être rempli d'un fluide conducteur pour assurer le contact électrique [Yang et Ward, 1984].

### **1.3.3 Paramètres enregistrés**

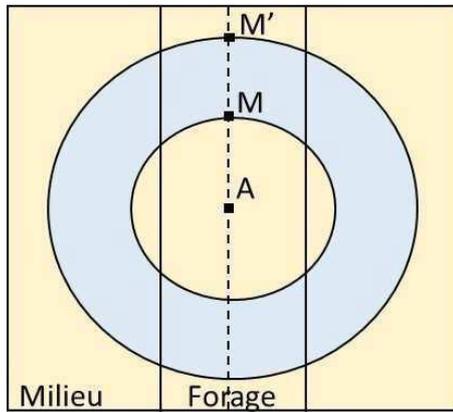
Cette partie traite des paramètres enregistrés par l'outil. La géométrie de la mesure diagraphique est abordée ainsi que les paramètres qui la conditionnent. La réponse diagraphique est explicitée pour pouvoir comprendre l'influence de la géométrie et la physique des terrains traversés. Une discussion termine cette partie afin de cerner les difficultés que l'on rencontre lors de cette thèse.

#### **1.3.3.1 La mesure diagraphique**

La distance entre la source de courant (A) et l'électrode de mesure du potentiel (M) conditionne la mesure de résistivité [Schlumberger, 1950]. La résistivité mesurée dite apparente correspond à la moyenne de chaque élément du matériau compris dans le volume d'investigation défini par un rayon dépendant de l'espacement AM. Le rayon d'investigation peut être assimilé au concept de profondeur d'investigation lors de mesures en surface. Cette profondeur est définie comme la profondeur qui contribue le plus au signal total mesuré en surface [Roy et Apparao, 1971]. La profondeur d'investigation a longtemps été considérée comme la profondeur de pénétration du courant ou induit de la distribution du courant. En réalité, la densité de courant décroît avec l'augmentation de la profondeur. Il est difficile d'estimer quelle profondeur contribue le plus au signal en fonction de la pénétration ou de la distribution du courant. De plus, la profondeur ne dépend pas seulement de la position des électrodes de courant, mais également des positions des électrodes de potentiel.

### 1.3 LA DIAGRAPHIE ÉLECTRIQUE

L'estimation d'un volume d'investigation est aussi difficile dans la configuration de forage. En théorie, le calcul du volume d'investigation s'effectue à l'aide de la différence de potentiel entre deux sphères dans un milieu infini et homogène (Figure 1- 5 et Éq. 1.11).



$$dV = \frac{\rho I}{4\pi} * \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{AM'} \right] \quad \text{Éq 1-11}$$

Figure 1-5 : Représentation du volume d'investigation

La valeur du rayon d'investigation à partir de laquelle se produit 50% de chute de potentiel se traduit par  $V_{AM'} = 0,5 V_{AM}$ . Par conséquent,  $AM'$  est égal à  $2AM$ . Pour une sonde normale, 50% du signal électrique est obtenu à une distance équivalente à deux fois l'espacement  $AM$ .

Conventionnellement, le rayon d'investigation est égal à  $2AM$ . Cependant, le volume d'investigation n'est pas aussi facile à déterminer. Plusieurs limites sont soulignées [Roy et Dhar, 1971] :

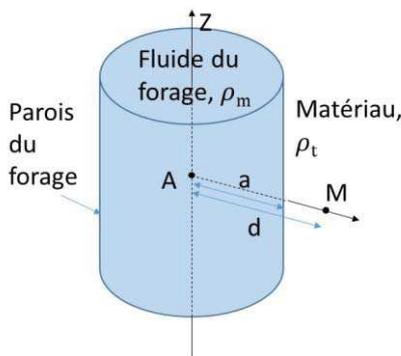
- (1) Le concept établi par Schlumberger stipule que la mesure de résistivité est représentée par les informations apportées par le matériau présent dans la sphère de rayon  $AM'$  excluant la sphère interne de rayon  $AM$ . En outre, le matériau extérieur au rayon  $AM'$  et intérieur au rayon  $AM$  n'influence en aucun cas les mesures, ce qui est inexact. Si on prend en compte la présence du forage et de ses caractéristiques, il est bien évident que les informations en dehors des limites fixées vont jouer grandement sur les mesures de résistivités. Roy et Apparao (1971) soulignent même que le signal enregistré est la somme des contributions de tous les éléments du sol de près ou de loin, interne ou externe au rayon  $AM$ .
- (2) L'autre limite est apportée par la représentation dans l'espace du volume d'investigation. Dans un milieu homogène, le courant circule dans toutes les directions dessinant une sphère centrée en A. Or, la présence du forage rempli d'un fluide conducteur modifie

cette répartition favorisant une meilleure distribution de la densité de courant à l'intérieur du forage. Par conséquent, il paraît plus évident de percevoir ce volume plutôt comme un cylindre centré en A, coaxial avec le trou et dont la section cylindrique plane est perpendiculaire à l'axe du forage.

En réalité, les valeurs trouvées sur le rayon d'investigation ne sont que des ordres de grandeur pour une configuration donnée. Dans les travaux de Roy et Apparao (1971), une analyse complète sur l'estimation du rayon d'investigation est effectuée dans un milieu infini et homogène pour un dispositif normal. Les résultats conduisent à un rayon de 0,60 L (L= AM).

### 1.3.3.2 L'influence du fluide du forage

L'enveloppe du volume d'investigation est modifiée notamment par la présence du forage i.e. la proportion de fluide de forage pris en compte dans le volume d'investigation. En effet, le courant circule préférentiellement dans le milieu le plus conducteur. Une configuration où le diamètre du forage est grand et la résistivité du fluide est faible, entraîne non seulement des modifications du volume d'investigation, mais biaisent d'autant plus les mesures [Serra, 1979; Hallenburg, 1984; B. I. Anderson, 2001]. Serra (1984) rajoute également, qu'il existe pour chaque outil, un diamètre de forage maximal d'utilisation. À partir d'une valeur de diamètre spécifique à la sonde utilisée, le volume d'investigation intègre une part trop importante de fluide de forage qui occulte les informations concernant le matériau. Pour quantifier cet effet, un calcul analytique a été développé [Wait, 1970] (Éq. 1.12 et Éq. 1.13). Ce calcul permet d'obtenir le potentiel résultant pour une électrode localisée sur l'axe du forage.



$$V_M = I * \frac{R_m}{2\pi^2} * \int_0^\infty [K_0(\lambda d) + A(\lambda) * I_0(\lambda d)] * \cos(\lambda z) * dz \quad \text{Éq 1-12}$$

$$\text{Et } A(\lambda) = - \frac{\lambda a(K-1)K_0(\lambda a)K_1(\lambda a)}{1 + \lambda a(K-1)I_0(\lambda a)K_1(\lambda a)}$$

Avec  $K = \frac{R_m}{R_{vraie}}$  et  $K_1$  : Fonction de Bessel de type K modifiée d'ordre 1

### 1.3 LA DIAGRAPHIE ÉLECTRIQUE

Où  $V_M$  est le potentiel au point M,  $I$  est l'intensité du courant (A),  $\rho_m$  est la résistivité du fluide du forage (Ohm.m),  $K_0(\lambda)$  est la fonction de Bessel de type K modifiée d'ordre 0,  $\lambda$  est la variable d'intégration,  $d$  est la distance entre la source de courant A et le point de mesure de potentiel M (m),  $I_0(\lambda)$  la fonction de Bessel de type I modifiée d'ordre 0,  $z$  est la profondeur (ou axe du forage, m) et  $a$  est le rayon (m).

$$V_M = \frac{I * R_m}{4\pi z} + \frac{I * R_m}{2\pi^2} * \int_0^\infty [A(\lambda)] * \cos(\lambda z) * dz \quad \text{Éq 1-13}$$

En diagraphie, la mesure de potentiel s'effectue le long de l'axe, donc  $d=0$ . Par conséquent, d'après les équations Éq. 1.12 et Éq. 1.13, le potentiel au point M s'écrit de la manière suivante (Éq. 1.14) :

$$V_M = \frac{I * R_m}{4\pi z} + \frac{I * R_m}{2\pi^2} * \int_0^\infty [A(\lambda)] * \cos(\lambda z) * dz \quad \text{Éq 1-14}$$

Le potentiel calculé est la somme du potentiel en milieu homogène et d'un potentiel anormal correspondant au contraste de résistivité entre le fluide de forage et le milieu. Dans la formule, il s'exprime par le biais de  $A(\lambda)$ .

Les corrections de diamètre du forage et de résistivité de fluide sont effectuées soit directement sur le terrain par des algorithmes informatiques [Scott, 1978] soit après la mesure diagraphique, par des abaques développés par Schlumberger (Cf. annexe 1).

Dans le calcul analytique précédent, le diamètre de l'outil n'est pas pris en compte. Pourtant, le volume de fluide de forage est théoriquement conditionné par l'espace existant entre les bords de la sonde et les parois du forage. L'information sur le matériau sera d'autant plus pertinente lorsque cet espacement sera réduit. D'autre part, le trou n'est pas toujours parfaitement droit et des aspérités sur les parois peuvent être présentes. La sonde peut tout aussi bien être centrée, en début de mesure puis s'accrocher aux parois du forage, par la suite. Il est défini, ainsi, un coefficient d'excentrement  $\varepsilon$  par la formule suivante Éq. 1.15 [Serra, 1979] :

$$\varepsilon = \frac{2 \delta}{D_f - D_s} \quad \text{Éq 1-15}$$

Où  $\delta$ ,  $D_f$ , et  $D_s$  représentent respectivement l'espace entre la sonde et la paroi du forage, le diamètre du forage et le diamètre de la sonde. Pour avoir toutes les mesures à égale distance

## CHAPITRE 1. REVUE DES CONNAISSANCES

avec la paroi, il est essentiel de pouvoir au mieux centrer l'outil ou le stabiliser. Ce problème peut être réglé à l'aide de centreurs. Les effets de l'excentricité de l'outil sur les mesures seront abordés plus longuement dans le chapitre 3.

La distribution du fluide du forage est un autre paramètre à prendre en compte lorsque l'on réalise des mesures après la phase de forage. Il existe une zonation concentrique autour du forage due au fluide de forage utilisé. Le fluide appelé filtrat envahit la porosité du matériau rencontrée repoussant l'eau d'origine : on parle de phénomène d'invasion. Ce phénomène est négligeable lorsque le forage est ancien. Le fluide du forage est considéré à l'équilibre avec l'eau d'origine saturant les pores du matériau.

### 1.3.3.3 La réponse diagraphique

Après ces corrections liées au forage, ce sont les caractéristiques des terrains traversés qui perturbent la réponse diagraphique et son interprétation. L'épaisseur des couches, leurs propriétés physiques et leur composition influencent directement l'allure des courbes et biaisent les informations qualitatives et quantitatives des formations (Figure 1-6). Pour le dispositif normal, la propriété physique et la géométrie des couches dictent l'analyse des mesures [Serra, 1979] :

- a) Une couche résistante et épaisse est représentée par une courbe symétrique par rapport au plan médian de la couche. Cependant, l'épaisseur, désignée par les points d'inflexion, est sous-estimée par rapport à la réalité. On estime l'erreur égale à l'espacement du dispositif.
- b) Une couche résistante et mince est caractérisée par une courbe présentant un minimum et deux maxima. On assiste, alors, à une inversion de la valeur de résistivité apparente du milieu. Celle-ci est d'autant plus accentuée que la résistivité vraie de la couche est élevée. L'épaisseur de la couche ( $e$ ) s'obtient en soustrayant l'espacement de la distance entre les deux maxima.
- c) Des couches conductrices ont des épaisseurs mesurées surestimées d'une valeur toujours égale à l'espacement AM. D'ailleurs, la puissance trop faible d'une couche conductrice peut être très difficile à localiser d'autant plus que les épontes sont très résistantes.
- d) Des couches conductrices et minces sont représentées par une baisse de la résistivité. Selon Serra (1979), la réponse diagraphique donne une épaisseur apparente supérieure à

### 1.3 LA DIAGRAPHIE ÉLECTRIQUE

l'épaisseur vraie d'une quantité égale à l'espacement  $AM$ . Cependant, une étude a montré que pour  $AM = \frac{1}{2} h$  ( $h$  est l'épaisseur de la couche), il existe une légère inversion au droit de la couche se traduisant par un plateau plus résistif de longueur égale à l'épaisseur. Dans le cas de fissures où  $AM \gg k \cdot h$  ( $k$  est un réel et  $h$  est l'ouverture de la fissure), l'allure des courbes diffère selon la valeur de  $k$  et le contraste entre la fissure et le matériau. Des éléments de réponse et une étude de l'influence de chaque paramètre sont référencés au Chapitre 2.

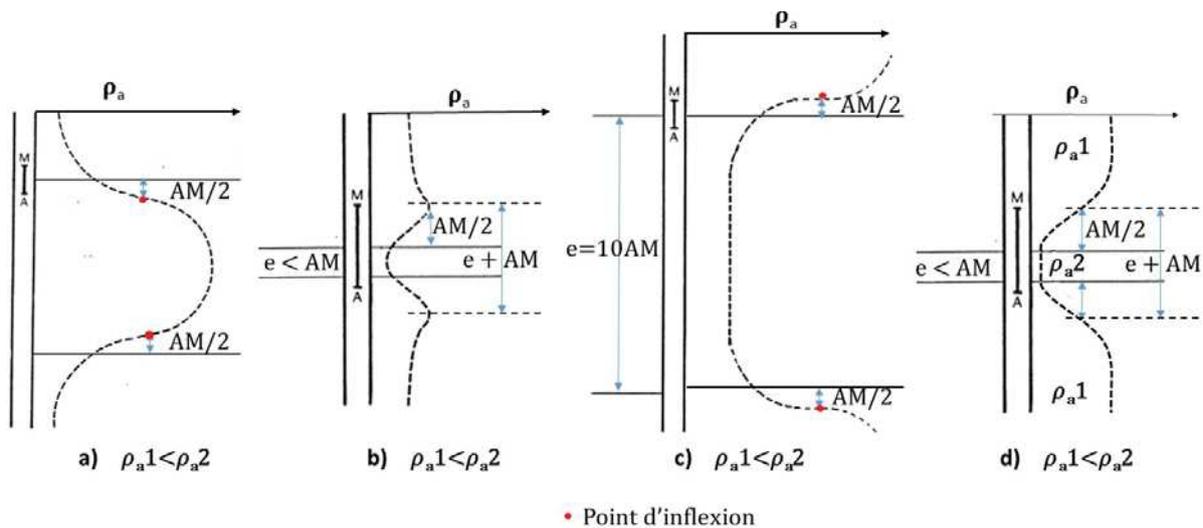


Figure 1-6 : Influence de l'épaisseur des bancs et de la résistivité [Serra, 1979]

La détection de couches minces est une donnée difficile à atteindre. Les épontes résistantes ou conductrices de part et d'autre de cette fine couche masquent les informations de cette dernière. Cette difficulté est attribuée principalement à la résolution verticale de l'outil. La résolution verticale correspond à la plus petite épaisseur que l'outil peut détecter. Si l'augmentation de l'espacement  $AM$  permet de sonder plus loin dans le forage à l'inverse la résolution diminue. La résolution verticale joue un rôle sur la différenciation des unités composant le matériau. La limite entre deux ensembles aux propriétés différentes ne sera pas franche. En réalité, il existe un changement progressif entre les deux milieux. Il existe un écart important entre la résistivité vraie et la résistivité apparente lorsque le modèle fait intervenir des couches fines ou des couches très résistantes. Généralement, pour le cas où l'épaisseur d'une couche résistive est 10 fois plus importante que l'espacement des électrodes, la résistivité apparente sera proche de la résistivité vraie. Si l'épaisseur de la couche résistive est 6 fois moins grande que l'espacement, il y aura un large écart entre la résistivité vraie et apparente.

### 1.3.3.4 Discussion

Le dispositif normal est un outil classique dans la prospection de réservoirs pétroliers ou hydrogéologiques. En raison de son volume d'investigation, il permet d'ausculter sur quelques mètres de profondeur et d'avoir une idée globale de la configuration du terrain. Comme mentionné précédemment, cet atout se transforme en désavantage par la baisse de la résolution verticale et donc dans la détection de fines unités. Lorsque la dimension d'une couche est supérieure à la résolution verticale (2AM), la réponse obtenue est différenciable des autres unités et pourra être analysée. Par contre, si les discontinuités sont inférieures au paramètre cité alors les interprétations qualitatives et quantitatives seront difficiles. La réponse diagraphique d'une hétérogénéité va donc dépendre non seulement de ses caractéristiques physiques (contraste important avec le reste du milieu), mais également du pourcentage volumique occupé dans un volume d'investigation donné. En somme, la détection d'une fissure va dépendre de sa contribution au signal par rapport au milieu environnant.

En assimilant le matériau de type béton à une roche artificielle ayant ses propres caractéristiques, les relations ou hypothèses aidant à la détection d'anomalies peuvent être engagées. Les travaux de Luthi et Souhaité (1990) sur la modélisation 3D par éléments finis ont permis d'étudier la réponse à des fractures. Ces recherches utilisent un outil enregistrant des scans électriques à haute résolution de la paroi du forage en établissant une relation couplant le signal électrique produit par une fissure et ses paramètres tels que l'ouverture, le pendage, la résistivité du fluide du forage, la résistivité du milieu et la distance entre la sonde et les parois du forage. De tels travaux encouragent à caractériser la fissuration notamment en termes d'extension de la fissure grâce au dispositif normal et à développer par la même occasion les connaissances de base et les applications de la technologie existante.

## 1.4 L'interprétation en diagraphie

Cette partie traite des techniques utilisées pour établir une interprétation diagraphique. Elle est découpée en deux axes principaux : une modélisation en problème direct et une inversion. Le but de cette section est de présenter les principes de base et les travaux antérieurs en rapport de près ou de loin avec le sujet de thèse.

## 1.4 L'INTERPRÉTATION EN DIAGRAPHIE

### 1.4.1 Modélisation du problème direct

#### 1.4.1.1 Problème physique et objectif

Le problème physique à modéliser est la distribution du potentiel électrique dans un béton fissuré soumis à un champ électrique provoqué par une sonde diagraphique. La modélisation va permettre d'étudier la réponse électrique de l'outil en termes de résistivités apparentes. Un premier modèle est créé à l'aide d'hypothèses simplificatrices et d'informations essentielles caractérisant le matériau. Par la suite, un modèle mathématique est appliqué (mise en équation) pour permettre de résoudre le problème. Dans notre cas, il s'agit de la réponse de l'outil. Une telle démarche est considérée comme une modélisation directe.

La modélisation peut être traitée par une méthode analytique ou une méthode numérique et souvent par les deux manières à la fois. La résolution analytique fonctionne sur des modèles en 1D ou 2D selon des configurations de terrain relativement simples. En effet, en 2D et 3D, la complexité est telle que le procédé numérique est le seul moyen d'arriver au but recherché [B.I. Anderson, 2001].

La méthode analytique, non seulement contient les concepts fondamentaux régissant la modélisation du problème physique, mais également justifie des corrections essentielles aux données diagraphiques. La méthode numérique permet de complexifier les objectifs en modélisation notamment en intégrant des géométries plus complexes, telles que la présence de la sonde et de ses électrodes dans le forage.

#### 1.4.1.2 Méthode analytique appliquée en diagraphie

##### *Définition et historique*

La méthode analytique utilise des solutions exprimées en équation sous une forme dite fermée pour modéliser la réponse de l'outil (résistivité apparente de la formation traversée). Cette technique est relativement accessible, seulement elle ne convient que pour des problèmes aux géométries simples. Les premières études se sont focalisées sur les solutions théoriques (résistivités apparentes) pour des électrodes enterrées dans un modèle de terrain comportant soit une, deux ou trois couches [Daknov, 1959; Alfano, 1962; Merkel et Alexander, 1971; Snyder et Merkel, 1973]. Ces travaux ont abouti à la détermination d'une solution pour le problème d'un terrain multicouche possédant une source de courant et un récepteur enterrés [Daniels, 1978].

## CHAPITRE 1. REVUE DES CONNAISSANCES

En diagraphie, la présence d'un forage constitue la première famille de frontières radiales. A cela s'ajoute, les discontinuités du milieu apportant une deuxième famille de frontières (horizontales ou inclinées) (Figure 1-7).

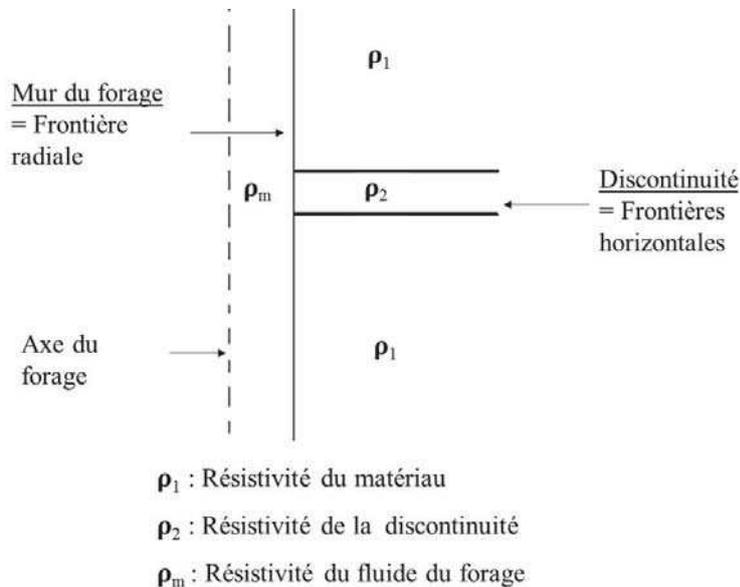


Figure 1-7 : Représentation simple des frontières radiales et horizontales

De nombreuses études intégrant des frontières radiales et horizontales ont été menées par plusieurs géophysiciens [Al'Pen, 1964; Tikhonov et Zakharov, 1977]. Ils se sont basés sur une évaluation numérique d'une solution d'équation d'intégrale de second ordre (équation intégrale de Fredholm du second type). La fonction inconnue est la source de courant de surface équivalente que l'on applique sur les limites qui séparent les milieux de conductivité différente. Une fois cette composante trouvée, le potentiel peut être déterminé en chaque point de l'espace. Plus tard, d'autres scientifiques développèrent des techniques permettant de déterminer la réponse de l'outil dans une configuration à plusieurs frontières [Gianzero et Anderson, 1982; Zhang et Shen, 1984]. La première référence produit une solution par l'intermédiaire des transformées de Fourier et d'équations d'intégrale dans le cas d'une source de courant constante traversant une mince couche envahie. Quant à Zhang *et al.* (1984), ils basent leur recherche sur la résolution du problème des valeurs aux limites dans un milieu hétérogène à l'aide d'une sonde normale. Une équation d'intégrale est formulée, résolue numériquement en utilisant la méthode Aitken et démontrée sur deux exemples bien définis :

- Configuration 1 : Forage ( $\rho_m$ ) et milieu étudié ( $\rho_1$ )  $\rightarrow$  frontière radiale
- Configuration 2 : Forage ( $\rho_m$ ), milieu 1 ( $\rho_1$ ) et 2 ( $\rho_2$ )  $\rightarrow$  frontières radiales et horizontales

## 1.4 L'INTERPRÉTATION EN DIAGRAPHIE

On se rend compte aisément qu'en raison de paramètres complexes, la résolution de problèmes pour certaines géométries amène à une utilisation progressive de méthodes numériques. Remarquons que ceci est en étroite relation avec la poussée technologique notamment en termes d'augmentation de la mémoire informatique dans les années 70.

### *La mise en équation du problème*

Pour un milieu isotrope et homogène, la distribution du potentiel électrique est gouvernée par les équations de Maxwell (Éq. 1.16 et Éq. 1.17).

$$\nabla \cdot \sigma E = -\nabla \cdot J \quad \text{Éq 1-16}$$

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla v) = 0 \quad \text{Éq 1-17}$$

Où  $\sigma$ ,  $E$  et  $J$  représentent la conductivité électrique (S/m), le champ électrique (V) et la densité volumique de courant électrique extérieure (A). On définit les opérateurs  $\nabla \cdot$  comme la divergence et  $\nabla$  le gradient. Le champ électrique dérive du potentiel scalaire ( $-\nabla v$ ). En ce qui concerne les mesures s'effectuant dans un forage, l'équation différentielle se calcule dans un système de coordonnées cylindriques. De plus, si l'on considère que le milieu est isotrope, homogène et infiniment étendu, il est possible de se placer dans une configuration en axisymétrie où l'axe de symétrie est centré sur le forage. Ainsi, le scalaire du potentiel électrique s'exprime en fonction de  $\mathbf{r}$  ( $r = x = y$ ) et  $\mathbf{z}$  (Éq. 1.18).

$$\nabla \cdot (\sigma(r, z) \nabla v(r, z)) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \cdot \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \sigma \frac{\partial v}{\partial r} \right) = 0 \quad \text{Éq 1-18}$$

### *Discussion*

Dans notre cas, la sonde est insérée dans un forage rempli de fluide. Il existe donc un compartimentage évident de notre modèle à savoir l'outil (électrodes et parties isolantes de la sonde), l'espace entre l'outil et la paroi puis le matériau étudié. En fixant les conditions limites, essentielles dans la modélisation, on s'aperçoit très vite de la complexité du problème. En outre les différentes frontières à identifier (radiales et horizontales), il existe également, des conditions de potentiel à appliquer sur la surface des électrodes et du mandrin isolant. Même en milieu homogène, le problème est difficilement réalisable. Ainsi, l'approche la plus commune pour l'obtention d'une solution analytique est de considérer que l'électrode de courant représente un anneau infiniment mince ou une source ponctuelle et d'ignorer la partie isolante de part et

d'autre des électrodes. L'approche est tout à fait justifiable lorsque l'outil présente des longueurs d'électrodes plus petites que le rayon du mandrin [B. I. Anderson, 2001].

Cependant, la représentation d'une électrode de courant par une source ponctuelle et sans une prise en compte des parties isolantes du mandrin ne permet pas de retranscrire un modèle proche de la réalité de terrain. De plus, la résolution analytique est difficilement applicable lorsque s'ajoutent des frontières horizontales telles que des discontinuités. Ainsi, la méthode analytique est préférée dans un problème aux frontières cylindriques pour l'étude de l'effet de forage, d'invasion et d'anisotropie.

### 1.4.1.3 Méthode numérique

#### *Présentation générale*

La méthode numérique va permettre de travailler sur des géométries complexes avec diverses conditions limites. Ainsi, elle réexprime les solutions des équations différentielles partielles en fonction d'un très grand nombre d'équations linéaires c'est-à-dire de la même manière que pour la résolution par des méthodes matricielles. La résolution numérique s'opère soit par la méthode des éléments finis (FEM) ou par la méthode des différences finies (FDM).

- (1) **La méthode d'éléments finis** n'applique pas les équations physiques directement, mais les retranscrit sous la forme d'équations d'intégrale. Le processus de discrétisation du milieu donne, par conséquent, un ensemble de grandes équations matricielles. Cette technique est lente, mais présente l'avantage que le maillage peut se conformer à des surfaces aux formes complexes.
- (2) **La méthode de différences finies** est basée sur une discrétisation du milieu en différents nœuds du maillage auxquels on établit une approximation d'une différence sur l'opérateur différentiel des équations de Maxwell. C'est donc une méthode plus facile et rapide dans la résolution, mais le maillage ne s'applique que pour un domaine cartésien.

Les méthodes numériques sont apparues dans les années 60 développant, ainsi, l'étude 2D axisymétrie en éléments finis et en différences finies. Ceci eut un vif succès. Cependant, la capacité de mémoires des ordinateurs de l'époque étant limitée, la détermination de la réponse de l'outil était difficile, voire impossible pour de grandes investigations diagraphiques. Plus tard, l'avancée technologique a permis de modéliser sur des profondeurs plus importantes avec un temps de traitement qui diminuait au fur et à mesure que les décennies passaient.

## 1.4 L'INTERPRÉTATION EN DIAGRAPHIE

### *Intérêts*

En même temps que la technologie progressait, les objectifs en diagraphie évoluaient. Certains ont vu l'opportunité de complexifier le milieu étudié [Bittar *et al.*, 1995] ou d'explorer la réponse théorique d'autres outils qui se distinguent par une configuration différente des dispositifs conventionnels [Niculescu, 2010]. Bittar *et al.* (1995) ont présenté un modèle théorique de diagraphie de résistivité en trois dimensions par la méthode des éléments finis. La méthode d'éléments finis est utilisée dans une géométrie complexe pour analyser la réponse d'un outil d'un dispositif normal d'espacement 16'' dans des formations azimuthalement hétérogènes. Quant à Niculescu (2010), il s'appuie sur la modélisation en méthode numérique pour établir de nouvelles conclusions sur le comportement d'outils aux configurations différentes. Il s'est intéressé à la réponse théorique d'un dispositif de type normal, mais avec un très large espacement entre les électrodes. Il s'est basé sur les solutions analytiques disponibles pour des modèles géoélectriques simples avec une ou deux interfaces de séparation. D'autres ont employé les méthodes numériques pour étudier les aptitudes des diagraphies électriques et développer des méthodes pour quantifier des couches métriques dans un seul trou de forage [Ulugergerli, 2011] ou des fractures (1m d'épaisseur) dans deux forages [Guo *et al.*, 2011]. Dans ces différentes publications, la géométrie a été complexifiée et permet d'obtenir de nouvelles conclusions.

À ce jour, la détermination de la réponse d'un dispositif normal en considérant la géométrie de la sonde employée dans un milieu affecté par des discontinuités centimétriques à millimétriques n'a pas été réalisée. Ainsi, l'objectif en modélisation numérique est de créer un modèle simple en 2D Axisymétrie représentant la sonde (électrodes et mandrin), le forage et le milieu affecté de fissures afin de comprendre la réponse diagraphique dans les zones endommagées par la présence de fissures.

#### **1.4.1.4 Méthode hybride**

Comme son nom l'indique, cette technique va s'appuyer sur le couplage de deux méthodes : méthode analytique et numérique. Elle est couramment utilisée pour des problèmes axisymétriques d'une sonde dans un forage traversant des couches horizontales. Cette approche scinde le problème principal en deux sous-problèmes d'une dimension. En effet, dans cette géométrie, interviennent des frontières radiales (forage) et des frontières horizontales (couches).

Ainsi, on a : un problème 1D selon  $r$  et un problème 1D selon  $z$ . Par exemple, la distribution radiale du potentiel peut être traitée de manière analytique tandis que la distribution verticale du potentiel peut être analysée par la méthode numérique en éléments finis [Tsang *et al.*, 1984].

## 1.4.2 Traitement par inversion

### 1.4.2.1 Concept de l'inversion

L'inversion est une méthode qui permet de déterminer les paramètres d'un processus modélisé à partir des données de terrain [Marecot, 2004; Loke et Barker, 1996]. Le processus d'inversion peut se clarifier par la Figure 1-8. Un outil géophysique est capable de mesurer des paramètres physiques d'un modèle réel (Problème direct). En résistivité, les données mesurées sont représentées en pseudo-section. Elle donne une image présentant la distribution des résistivités apparentes. La pseudo-section peut être considérée comme un guide dans l'interprétation initiale quantitative. Cependant, l'erreur fréquente consiste à utiliser la pseudo-section comme une image finale de la résistivité vraie du sous-sol. De ce fait, à partir de cette pseudo-section, un modèle est reconstruit par la méthode des éléments finis ou de différences finies (problème inverse). Ce processus permet de passer de l'espace des données mesurées (résistivités apparentes) à l'espace des paramètres physiques du modèle estimé (résistivités vraies). Pour valider cette estimation de la réalité, des données sont calculées comme si un outil géophysique investiguait le modèle estimé (problème direct). On obtient une pseudo-section calculée de résistivités apparentes. Une comparaison entre les données mesurées et les données calculées est effectuée. Dans toutes méthodes d'optimisation, le modèle estimé est modifié de manière itérative pour que l'écart entre les données mesurées et calculées soit minimal.

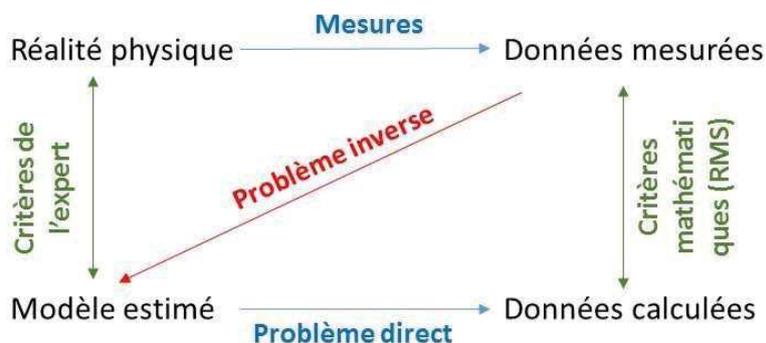


Figure 1-8 : Processus direct et inverse [Marecot, 2004]

## 1.4 L'INTERPRÉTATION EN DIAGRAPHIE

Le problème des méthodes d'inversion concerne la non-unicité des solutions. Un jeu de données mesurées peut correspondre à de nombreux modèles dont les résistivités apparentes calculées sont proches des résistivités apparentes mesurées. À l'issue de l'inversion, l'expert est en mesure de retenir le modèle qui lui paraît le plus pertinent, sur le critère de qualité mathématique de son inversion (RMS : Root Mean Square par exemple), mais aussi sur sa connaissance du contexte et de sa connaissance du site et de la méthode.

### 1.4.2.2 L'inversion en diagrapie

Les premières interrogations se sont focalisées essentiellement sur la détermination exacte de la résistivité vraie de couches et de leurs épaisseurs. Le but était d'établir une estimation précise et optimale de la présence d'hydrocarbures. Sur ce point-là, une interprétation solide pour les logs de résistivité normale est développée notamment en termes de correction sur les effets de l'épaisseur des lits à l'aide d'abaques. Puis d'autres objectifs ont été lancés comme la détection de couches minces de charbon. De grandes erreurs dans les estimations des épaisseurs de couche et des résistivités vraies sont trouvées [Daniels, 1978]. Pour pallier ce problème, des études par inversion des données de résistivité en dispositif normal ont été effectuées dans le cadre d'une étude sur des couches minces de charbon d'épaisseur égale 0.5m [Yang et Ward, 1984]. En problème direct, Yang et Ward (1984) utilisent une solution théorique d'un modèle contenant un nombre arbitraire de couches (effets de forage négligés) et des données de terrain (effets de forage pris en compte). Ils démontrent ainsi que les résultats issus de l'inversion s'ajustent avec les paramètres des modèles initiaux. Ils concluent que la méthode inverse peut être utilisée pour interpréter les données de résistivité en forage notamment pour des couches décimétriques. D'autre part, le succès de l'inversion 2D pour les sondages de surface, tel que décrit dans de nombreux articles, dépend en grande partie sur l'utilisation de différents espacements d'électrodes pour fournir la résolution verticale nécessaire [Candansayar, 2008]. Ainsi, une étude récente rapporte une inversion conjointe des données de résistivité en courant continu obtenue à l'aide d'un outil possédant deux espacements d'électrode (16''/0.40m et 64''/1.60m) [Ulugergerli, 2011]. Les résultats d'un modèle simple montrent que l'inversion peut récupérer l'information structurelle de couches minces (≃1m) seulement lorsque le contraste de résistivité entre les couches adjacentes est important. Il est à noter que l'étude ne prend pas en compte les structures plongeantes qui nécessiteraient une approche de modélisation en trois dimensions.

## CHAPITRE 1. REVUE DES CONNAISSANCES

L'inversion a permis d'augmenter la résolution de l'outil pour identifier avec précision des informations sur de fines structures du sol (épaisseurs étudiées  $\geq 0.5\text{m}$ ) dans le cas où les contrastes entre les couches sont suffisants. Dans notre cas, le problème inverse est la détermination de paramètres du système. En outre, à partir des variations de résistivités du matériau observées, le but est de pouvoir créer un modèle qui donne toutes les informations sur les discontinuités (ouverture, contraste de résistivité, extension et activité) et sur d'autres types d'endommagement tel que la porosité. Si la méthode d'inversion est concluante, elle doit faire face à de nombreux obstacles :

- (1) Les données expérimentales dont on dispose sont en général bruitées. De ce fait, il est difficile de garantir que les données proviennent du modèle préalablement développé.
- (2) Le modèle estimé doit retranscrire au mieux les données mesurées afin de valider les paramètres.
- (3) Il peut exister une infinité (en théorie) de modèles qui pourraient donner les mêmes observations de terrain. Cette propriété est désignée sous le terme de non-unicité du modèle. Pour résoudre ce problème, il est essentiel de fournir des informations supplémentaires pour trancher en faveur de la solution vraie.
- (4) Dans notre cas, le nombre de paramètres à déterminer est important et à ce stade, il est difficile de savoir si la résistivité seule est capable de pouvoir déterminer de telles informations.

### **1.5 Conclusion**

Les discontinuités ont des origines diverses liées en grande partie à l'hétérogénéité du béton, au type d'exploitation, à son environnement et au temps qui passe. Les discontinuités apparaissent et peuvent évoluer jusqu'à, pour certaines, entraîner la ruine de l'ouvrage. Ce sont ces types de discontinuités que cette étude cible. L'objectif est de prévenir le maître d'ouvrage de l'état préjudiciable ou non de la discontinuité avant d'atteindre un point de non-retour. Pour cela, cette étude a pour objectif de fournir des informations pertinentes sur l'endommagement (fissures, joints, contact roc/béton et forte porosité). La méthode de la résistivité électrique, comme on a pu le voir, est sensible aux hétérogénéités en raison de leur propriété et leur géométrie. Cependant, ce moyen est encore peu développé et les résultats, certes encourageants, sont restreints à l'étude de l'endommagement en surface. Le problème dans des ouvrages massifs,

## 1.5 CONCLUSION

comme les barrages-poids ou les écluses, est le manque cruel d'informations sur leur état interne. L'idée directrice est de pouvoir utiliser des forages préexistants dans ces ouvrages massifs pour appliquer la méthode de résistivité électrique sous la forme de diagraphie électrique de résistivité. Cette sonde présente l'avantage d'être déjà développée et utilisée. Certes, elle est limitée dans sa résolution verticale, mais l'utilisation de plusieurs espacements permet de recueillir des informations plus loin dans la structure. Cet aspect est important, car il permettrait de déterminer, ou au moins, de donner un ordre de grandeur de l'étendue de l'endommagement. Il est essentiel de comprendre la physique de l'outil et l'interaction entre l'outil et le matériau. La modélisation du problème direct est suggérée dans des cas simples pour établir la faisabilité de la démarche.



## **CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DIAGRAPHIQUE**

---

La fonction première de la sonde 2PEA-1000 n'est pas d'identifier des discontinuités millimétriques à centimétriques ou de caractériser l'état des interfaces d'un ouvrage. La sonde est classiquement utilisée pour identifier des épontes saturées de fluide (pétrole, eau, gaz). L'outil est donc détourné de son utilité première pour être utilisé en contrôle non-destructif d'ouvrages d'art en génie civil. Nous avons des profondeurs d'investigations moins importantes et des dimensions d'ouvrages finies à contrario de la géologie où les formations sont dites infinies. La diagraphie utilisée en géologie a des objectifs et des contraintes différentes de ceux établis dans ce projet. C'est donc une autre façon de procéder qu'il faut adopter pour l'interprétation des résultats. Il est essentiel de revenir aux concepts de base de la diagraphie pour comprendre la réponse de l'outil dans un ouvrage en béton et répondre aux exigences du maître d'ouvrage. Pour cela, la modélisation par éléments finis est utilisée.

## CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DIAGRAPHIQUE

Les travaux préliminaires de modélisation sont effectués avec le logiciel d'éléments finis Comsol3D© avec le module AC/DC pour simuler la conduction électrique. La modélisation présentée suit un schéma simplifié en 2D-Axisymétrie où de nombreuses hypothèses sont posées.

Ce chapitre établit une étude par éléments finis respectant trois étapes clés :

- (1) La phase préparatoire englobant la définition de la géométrie du domaine d'étude, des caractéristiques et propriétés des matériaux et de la définition des conditions limites.
- (2) La phase de calcul résolvant le problème discret afin de trouver une solution convergente pour tous les nœuds du maillage défini.
- (3) La phase d'analyse des résultats permettant de comparer le modèle théorique au terrain étudié et d'établir des modifications, si nécessaire, pour s'approcher de la réalité.

Ces trois phases sont regroupées et détaillées en première partie de ce chapitre. Dans une seconde partie, le modèle est complexifié avec l'ajout de nouvelles frontières (ajout de la sonde et des interfaces d'une fissure). Cette partie fait état également de l'identification et la quantification de l'influence des paramètres de biais tels que l'effet de surface et l'effet de forage. Une équation corrective des données de terrain est notamment développée. Dans une troisième partie, nous traitons de la sensibilité de la réponse diagraphique face à une fissure idéale et isolée dont les caractéristiques d'ouverture, d'extension et de contraste de résistivité avec le matériau varient. Ces analyses permettent dans une dernière partie de développer une méthodologie sur la caractérisation d'une fissure idéale et isolée dans le but de retrouver les paramètres de fissure étudiés.

## 2.1 PHASE PRÉPARATOIRE

### 2.1 Phase préparatoire

#### 2.1.1 Hypothèses simplificatrices

Dans la première étape de l'étude, le problème doit être simplifié. Le modèle est un bloc de matériau traversé par un forage de diamètre  $D_f$ , rempli d'un fluide homogène de résistivité  $m$ . Dans le forage est insérée une sonde de diamètre  $D_s$  comportant des parties isolantes (le mandrin) et des anneaux conducteurs représentant les électrodes. Le matériau est considéré comme un milieu homogène, isotrope et infini. La configuration présente une symétrie selon l'axe du forage permettant de réduire le modèle 3D en un modèle 2D axisymétrique (Figure 2-1) [Goncalves *et al.*, 2002]. En 2D axisymétrique, les différentes unités sont représentées par des rectangles avec une longueur et une largeur définies.

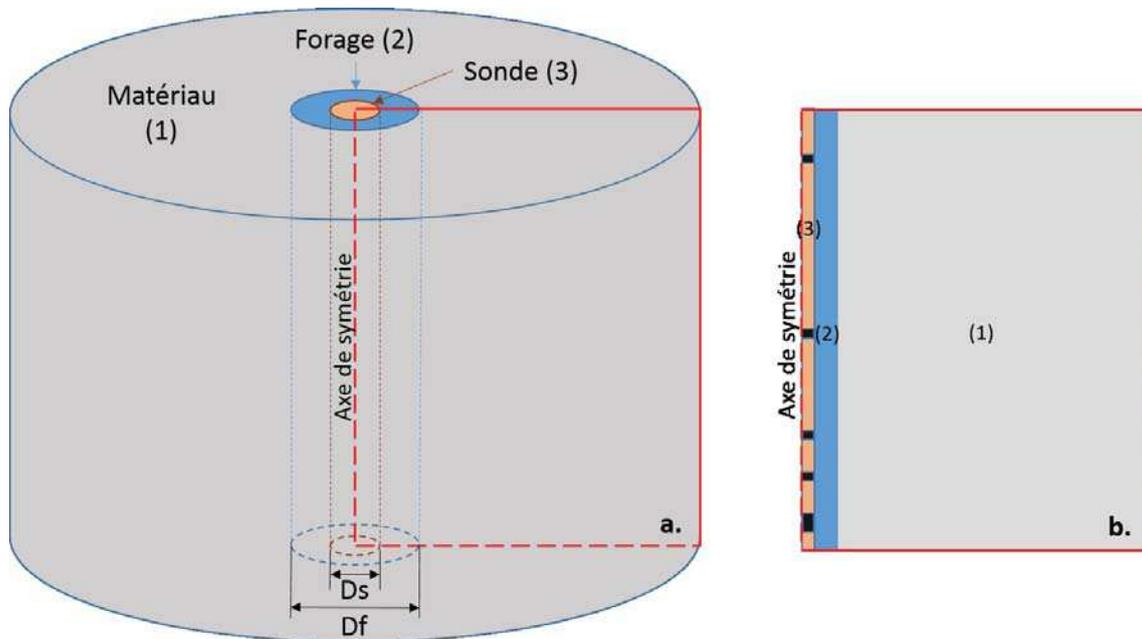


Figure 2-1 : Configuration du modèle 3D (a.) et sa simplification en 2D-axisymétrique (b.)

La modélisation 2D-axisymétrique a l'avantage de réduire le temps de calcul et de conception. Elle donne, également, un premier aperçu sur les résultats et permet de cibler les étapes importantes telles que la correction de l'effet de forage. Il est important de noter que cette simplification de géométrie a pour conséquence la représentation d'une fissure horizontale par un disque lors du passage en 3D. . L'utilisation du schéma 2D-axisymétrique impose donc une configuration simplifiée ne permettant pas l'étude de facteur plus complexe. Par exemple, le cas

d'une fissure inclinée en 2D-axisymétrique se traduit en 3D par un cône, ou dans les cas d'une fissure décentrée par rapport au forage (en 2D-axisymétrique, les fissures sont forcément centrées par rapport au forage).

### 2.1.2 Définition de la géométrie

. Il s'agit, dans un premier temps, d'optimiser le temps de calcul. Il faut déterminer les dimensions du modèle répondant à la fois à une très bonne représentation du milieu et prenant un minimum d'espace mémoire. Il est vrai que des dimensions importantes permettront d'atteindre une meilleure qualité des résultats. Cependant, elles engendreront des problèmes dans les modélisations futures notamment lors de l'insertion d'une ou plusieurs fissures : possibilité d'un espace mémoire insuffisant et d'un temps de calcul trop long. Ainsi la première étape est la conception du modèle c'est-à-dire la détermination des dimensions favorables pour l'étude.

#### 2.1.2.1 Étape 1 : le maillage

L'ensemble du domaine est défini par des éléments triangulaires de côté variant de 0,001 m à 1 m (Figure 2-2). En raison de la présence de la paroi du forage (au minimum à 0.04 m de l'axe de symétrie), le maillage s'ajuste de façon automatique à la géométrie du modèle. Le maillage est très fin de l'axe de symétrie jusqu'à la paroi du forage, une zone correspondant à la zone étudiée. En supplément, un espacement entre nœuds égal à 0,001 m de part et d'autre de la source de courant A est créé afin de garantir de la précision au point d'injection du courant. La dimension minimum de 0.001 m est choisie également pour la prochaine étude avec l'ajout d'une fissure aux dimensions centimétriques à plurimillimétriques. Le maximum de 1 m de côté est une dimension plus grossière qui s'applique dans des zones n'influençant que très peu les résultats. Les dimensions des mailles sont progressives, c'est-à-dire fines sur l'axe de symétrie pour aller à des dimensions plus grossières loin de la paroi du forage.

Le logiciel Comsol3D détermine le potentiel à chaque nœud. Ainsi, les résistivités apparentes sont calculées à partir des potentiels relevés au droit de différentes positions correspondant aux électrodes de la sonde utilisée dans ces travaux. On notera les points de mesure de potentiel situés à 0.2m, 0.4m, 0,8m et 1.6m du point d'injection A, respectivement M<sub>8</sub>, M<sub>16</sub>, M<sub>32</sub> et M<sub>64</sub>.

## 2.1 PHASE PRÉPARATOIRE

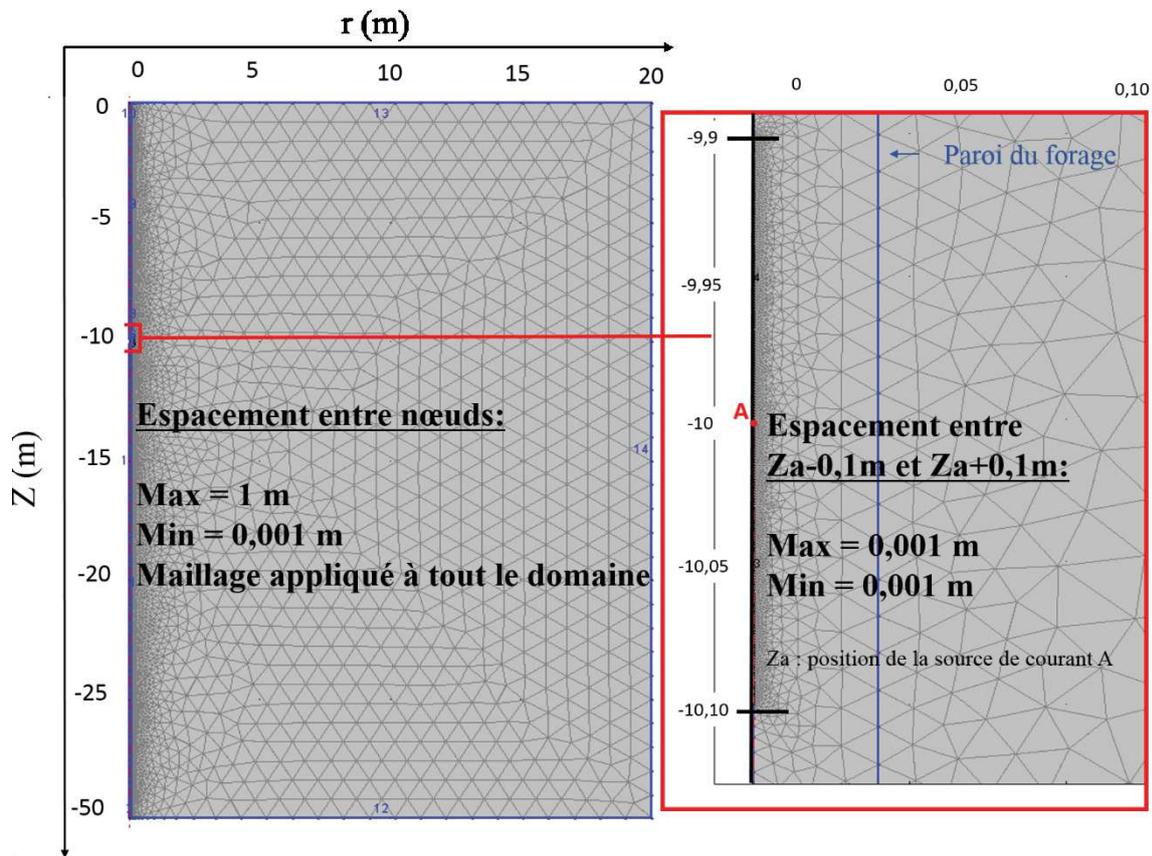


Figure 2-2 : Maillage du modèle initial

On a vu en chapitre 1 que la résistivité apparente dans le cas d'un dispositif normal (dispositif pôle-pôle) s'obtient par le calcul suivant (Éq 2-1) :

$$\rho_a = 4. \pi. AM. \frac{V}{I} \quad \text{Éq 2-1}$$

Le fabricant de la sonde utilisée, la Mount-Sopris, considère N à l'infini et utilise l'équation Éq. 2.1. Cependant, l'électrode N se situe sur la bride à environ 9 m de l'électrode A. N est, donc, plongée à l'intérieur du forage. En toute rigueur nous n'avons plus un dispositif pôle-pôle mais un dispositif pôle-dipôle. Il s'avère que la différence dans les résultats entre les deux configurations, N à l'infini ou à 9m, est négligeable. Nous préférons, cependant, recomposer la configuration réelle du dispositif utilisé. Dans les travaux de modélisation, l'électrode N est prise en compte dans le calcul et se place à 9m du pôle d'injection. Pour la suite, les résistivités apparentes se calculent avec l'équation Éq 2-2.

$$\rho_a = 4 \cdot \pi \cdot \frac{1}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN}} \cdot \frac{dV}{I} \quad \text{Éq 2-2}$$

### 2.1.2.2 Étape 2 : les conditions aux limites

La conservation du courant et de continuité du potentiel sont appliquées sur l'ensemble du domaine d'étude. Ces conditions sont régies par les équations décrites dans le chapitre 1. Le contact air/béton (Figure 2-3 : Segments verts) possède une condition à flux nul et est défini comme suit (Éq 2-3) :

$$-\vec{n} \cdot \vec{j} = 0 \quad \text{Éq 2-3}$$

Où  $\vec{j}$  est la densité de courant et  $\vec{n}$  est le vecteur normal. Cette condition limite signifie qu'aucun courant électrique ne circule à travers la limite. Elle est aussi applicable à l'axe de symétrie dont le potentiel est connu pour être symétrique par rapport à la limite. Des conditions de potentiel nul,  $V = 0$ , sont imposées sur les limites du modèle situées à l'infini (Figure 2-3 : Segments bleus). Une source ponctuelle de courant de 1A est appliquée sur un point de l'axe de symétrie.

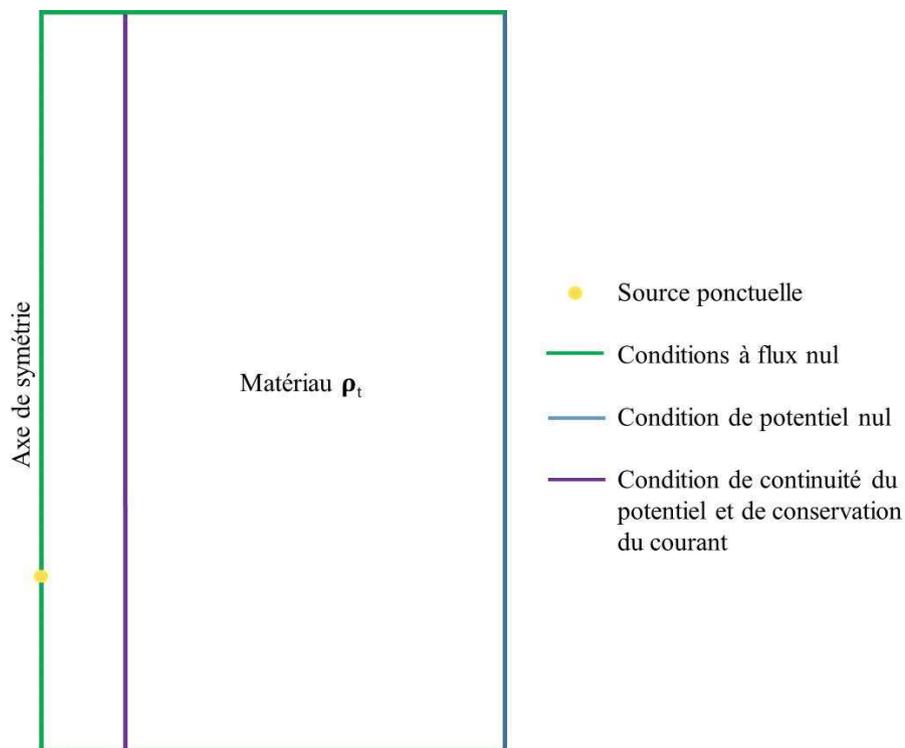


Figure 2-3 : Conditions aux limites d'un domaine homogène

## 2.1 PHASE PRÉPARATOIRE

### 2.1.2.3 Étape 3 : Géométrie du modèle et validation

La détermination des dimensions du modèle se fait selon sept cas qui diffèrent selon Z (longueurs du modèle) et r (largeurs du modèle) (Tableau 2-1).

	Z (m)	r (m)
Cas 1	100	100
Cas 2	50	50
Cas 3	50	40
Cas 4	50	30
Cas 5	50	20
Cas 6	50	10
Cas 7	40	40

Tableau 2-1 : Dimensions des modèles testés

La validation d'un modèle est obtenue en comparant les valeurs de résistivité apparente calculées à la valeur de résistivité du matériau fixée lors de la modélisation. Le forage et le matériau possèdent les mêmes propriétés. Le modèle est, alors, considéré comme homogène et isotrope. De ce fait, la valeur de la résistivité apparente doit être égale à la résistivité vraie du béton. De ce postulat, un calcul d'erreur ou pourcentage d'erreur (E en %) est effectué par l'équation Éq 2-4.

$$E \% = \frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_t} * 100 \quad \text{Éq 2-4}$$

On choisit d'étudier les points situés sur l'axe de symétrie à 0,2 m (M<sub>8</sub>), 0,4 m (M<sub>16</sub>), 0,8 m (M<sub>32</sub>) et 1,6 m (M<sub>64</sub>) m de la source ponctuelle de courant placée au milieu du domaine sur l'axe de symétrie.

Le Tableau 2-2 présente les calculs d'erreur pour chaque dimension de modèle et pour chaque espacement entre le point d'injection A et le point de mesure M. Les niveaux d'erreur sont relativement faibles (<1%) et donc les maillages sont considérés convenables. Le choix des dimensions du domaine va dépendre du compromis entre de faibles pourcentages d'erreur sur chaque espacement, du nombre d'éléments du maillage, du temps de calcul et des critères des futures modélisations à effectuer. Le cas 1 offre de très bons résultats. Cependant, l'ajout d'une discontinuité augmentera le nombre d'éléments du maillage et entraînera une saturation de

## CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DIAGRAPHIQUE

l'espace mémoire. Il est donc, essentiel, de diminuer le domaine avec pour conséquence une légère augmentation de l'erreur. Au vu des pourcentages d'erreur, le cas 5 est le plus favorable. Les modélisations vont donc être effectuées avec un domaine de longueur égale à 50 m (Z) et de largeur égale à 20 m (r). Cette étape permet de déterminer les dimensions du modèle et l'erreur numérique dans le cas d'un milieu homogène et isotrope avec une source de courant ponctuelle.

	Z (m)	r (m)	Nombre minimale* d'éléments	Nombre maximale* d'éléments	Temps de calcul (s)	Erreur (%)			
						M <sub>8</sub>	M <sub>16</sub>	M <sub>32</sub>	M <sub>64</sub>
<b>Cas 1</b>	100	100	41223	45329	28	0,05	0,11	0,22	0,44
<b>Cas 2</b>	50	50	12845	16442	15	0,16	0,33	0,66	1,34
<b>Cas 3</b>	50	40	11398	15156	15	0,14	0,29	0,58	1,19
<b>Cas 4</b>	50	30	10936	14618	14	0,12	0,24	0,47	0,98
<b>Cas 5</b>	<b>50</b>	<b>20</b>	<b>10479</b>	<b>14154</b>	<b>13</b>	<b>0,11</b>	<b>0,22</b>	<b>0,45</b>	<b>0,95</b>
<b>Cas 6</b>	50	10	6730	11686	12	0,41	0,85	1,74	3,71
<b>Cas 7</b>	40	40	9478	13650	13	0,25	0,52	1,03	2,09

\* Nombre minimal\* d'éléments : Nombre d'éléments lorsque le diamètre du forage est le plus grand.

\* Nombre maximal\* d'éléments : Nombre d'éléments lorsque le diamètre du forage est le plus petit.

Tableau 2-2 : Dimensions et calculs d'erreur liés au maillage EF pour les différents espacements AM

### 2.1.3 Complexification du modèle

#### 2.1.3.1 Nouvelle définition de la géométrie et conditions limites

Le modèle est décomposé en plusieurs sous-domaines : le forage, la sonde, le matériau et la fissure (Figure 2-4). Chacun se distingue par une résistivité qui lui est propre. Ainsi, on distingue par  $\rho_t$ ,  $\rho_m$ ,  $\rho_f$ ,  $\rho_s$  et  $\rho_e$  les résistivités respectives du matériau, du fluide du forage, de la fissure, de la sonde et des anneaux conducteurs (électrodes).  $\rho_t$ ,  $\rho_m$  et  $\rho_f$  sont des valeurs de résistivité qui varient pour les futures études de la sensibilité aux paramètres de fissure.  $\rho_s$  et  $\rho_e$  sont des résistivités fixes prenant des valeurs choisies pour représenter des matériaux respectivement isolants (1.10<sup>12</sup> Ohm.m) et conducteurs comme le métal (1.10<sup>-5</sup> Ohm.m). Les dimensions du modèle ont été définies lors de l'étude sur l'optimisation de la géométrie. Le Tableau 2-3 présente les dimensions des nouveaux éléments mis en place dans le domaine d'étude.

## 2.1 PHASE PRÉPARATOIRE

Unités	Longueur (m)	Largeur (m)
<b>Modèle</b>	50	20
<b>Forage</b>	50	Df/2
<b>Fissure</b>	L	h
<b>Sonde</b>	1.88	Ds/2 = 0.025
<b>Électrode de courant</b>	0.045	Ds/2 = 0.025
<b>Électrodes de potentiel</b>	0.025	Ds/2 = 0.025

Tableau 2-3 : Dimensions des unités du modèle 2D

À partir de ce domaine idéalisé, il existe donc des familles de frontières radiales et horizontales sur lesquelles et entre lesquelles vont s'appliquer des conditions. Alors que les frontières radiales correspondent aux limites physiques de sonde et la limite entre le forage et le matériau, les frontières horizontales représentent les discontinuités (Figure 2-4).

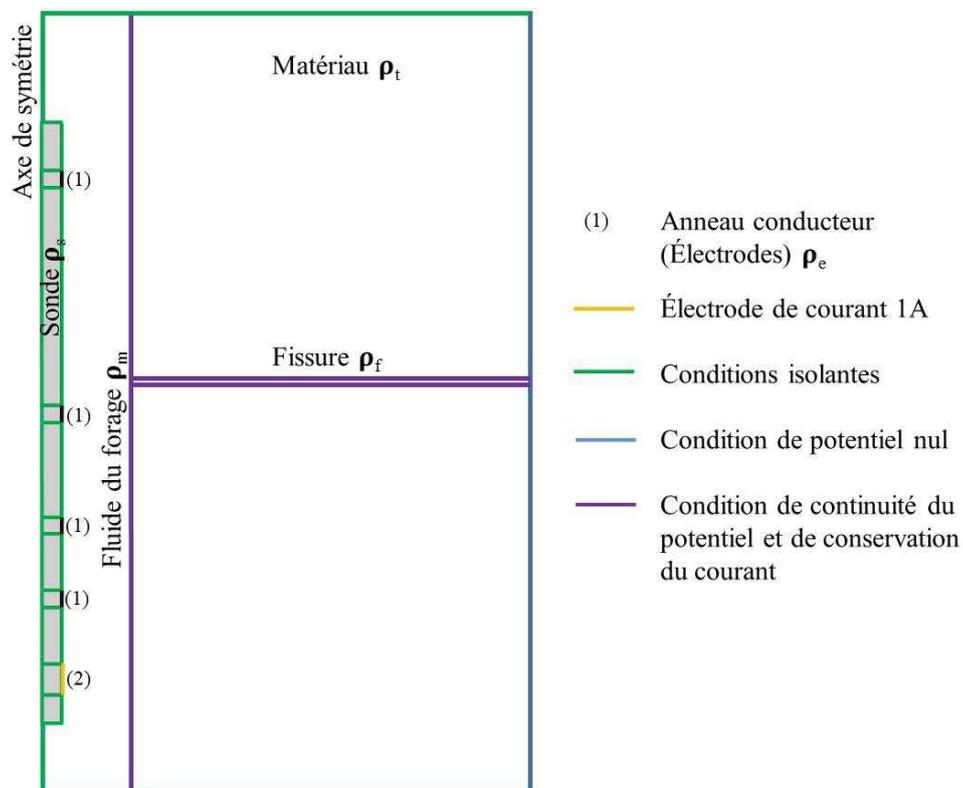


Figure 2-4 : Modèle 2D discrétisé et conditions limites

Tout comme pour un domaine homogène, la conservation du courant s'applique sur l'ensemble du modèle et également sur les surfaces. Sur les limites physiques de la sonde excepté la surface

## CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DIAGRAPHIQUE

des électrodes, du contact air/béton et sur l'axe de symétrie (Figure 2-4 : Segments verts), une condition à flux nul est imposée (Éq 2-3). Des conditions de potentiel nul,  $V = 0$ , sont imposées sur les limites du modèle situées à l'infini (Figure 2-4 : Segments bleus). Une source de courant surfacique est appliquée sur la frontière correspondante à l'électrode de plus grande longueur (Figure 2-4 : Segment jaune). Cette condition se traduit par l'équation (Éq 2-5).

$$\vec{n} \cdot (\vec{J}_1 - \vec{J}_2) = \vec{Q}_J \quad \text{Éq 2-5}$$

Où  $J_1$  est la densité de courant intérieure à la limite,  $J_2$  la densité de courant extérieure à la limite et  $Q_J$  la source de courant surfacique prise à  $142 \text{ A/m}^2$ . Cette valeur rapportée à la surface de l'anneau permet d'avoir une intensité égale à 1 ampère (A). En ce qui concerne les interfaces dessinées par le forage et les discontinuités (Figure 2-4 : Segments violets), en plus de la condition de conservation du courant, s'ajoute la continuité du potentiel.

### 2.1.3.2 Calcul de l'erreur

Dans ce type de calcul, il est important de prendre en compte la géométrie et la physique de la sonde utilisée [B. Anderson *et al.*, 1992]. L'ajout de la sonde influence les données obtenues et sa quantification est nécessaire. De ce fait, les calculs d'erreurs sont réitérés (Éq 2-4). De la même manière que dans le cas d'une source ponctuelle, une comparaison entre la résistivité apparente dans le milieu homogène et la résistivité vraie du matériau est effectuée. Dans cette nouvelle configuration, le courant n'est donc plus ponctuel, mais est injecté par la surface d'un anneau. Les parties isolantes formant le mandrin de la sonde et les surfaces conductrices des électrodes de mesure sont prises en compte. On donne, pour cela, une résistivité aux différents éléments qui composent la sonde. Dans un premier temps, la résistivité du fluide du forage est prise identique à la résistivité du matériau afin d'écarter l'effet de forage dans le calcul d'erreur lié à la modélisation.

Au préalable, l'ensemble du domaine est défini par des éléments triangulaires de côté variant de 0,001 m à 1 m. Un espacement entre nœuds égal à 0,001 m est imposé pour toute la sonde. Le nombre maximum d'éléments se chiffre à 95 888 éléments soit un temps de calcul pour chaque position de A estimé à 30s. Le calcul d'erreur est réalisé lorsque l'électrode de courant est placée sur l'axe de symétrie en milieu de domaine c'est-à-dire dans le cas d'un Z de 50 m, à 25m de la surface. Le permet de visualiser les erreurs liées à une modification du milieu pour chaque espacement.

## 2.1 PHASE PRÉPARATOIRE

	Erreur (%)			
	M <sub>8</sub>	M <sub>16</sub>	M <sub>32</sub>	M <sub>64</sub>
<b>Configuration sans sonde</b>	0,11	0,22	0,45	0,95
<b>Configuration avec sonde</b>	4,60	1,75	0,78	0,87

Tableau 2-4 : Calculs d'erreur pour différentes positions de M<sub>x</sub> et différentes configurations, avec et sans prise en compte du mandrin de la sonde

Les pourcentages d'erreur d'une configuration avec sonde sont relativement élevés par rapport à ceux trouvés pour le cas d'une source ponctuelle notamment pour les petits espacements entre A et M (M<sub>8</sub> = 0.20m). Les parties isolantes de la sonde sont intégrées changeant, ainsi, son influence dans le volume d'investigation. Ces résultats (Tableau 2-4) montrent que les parties résistantes de la sonde influencent fortement les mesures de potentiel proches de la source. En augmentant l'espacement et a fortiori le volume d'investigation, le biais lié à la sonde perturbe moins la valeur de résistivité qui avoisine alors la résistivité vraie du matériau. L'influence de la sonde sera prise en compte lors des modélisations et de l'élaboration d'équations correctives.

### 2.1.3.3 Effet de surface

Les problèmes de la sonde diagraphique rencontrés en contrôle non-destructif d'ouvrage sont différents de ceux rencontrés dans un contexte de caractérisation de réservoir géologique. En Génie civil, les forages ont des dimensions (pluri) métriques à décimétriques tandis qu'en géologie pétrolière par exemple, ce sont des dimensions (pluri) décimétriques à hectométriques. Les forages en génie civil sont donc, investigués avec les mêmes dimensions de sonde qu'en géologie semi-profonde. Ainsi, les faibles profondeurs de forage font que l'outil se trouve à proximité de la surface. Les valeurs de résistivité apparente sont fortement biaisées lorsque l'on se rapproche de cette frontière. Pour prendre en compte cet effet de surface, il faut s'appuyer sur la théorie des images. Selon cette théorie, une seconde source de courant symétrique à A par rapport à la surface est créée [Bertrand, 1967] (Figure 2-5). Ce phénomène ajoute une composante supplémentaire sur les mesures et les calculs effectués. La correction s'effectue en recalculant les valeurs de résistivité apparente à l'aide de l'équation Éq. 2.4:

## CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DIAGRAPHIQUE

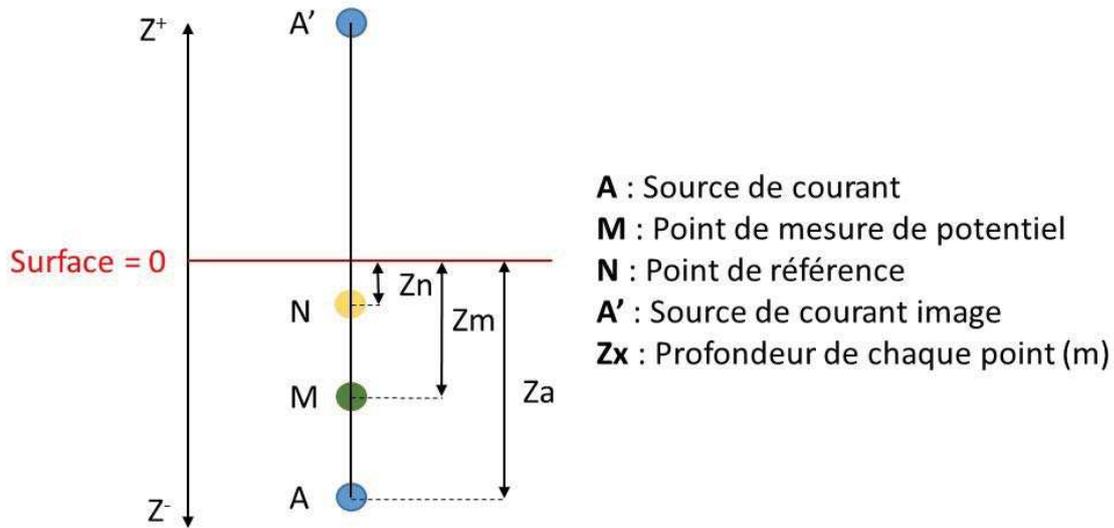


Figure 2-5 : Théorie des images

$$\rho a. corrigée = \frac{\Delta v}{I} * \frac{4\pi}{\frac{1}{|Z_a - Z_m|} - \frac{1}{|Z_a - Z_n|} + \frac{1}{|Z_a + Z_m|} - \frac{1}{|Z_a + Z_n|}} \quad \text{Éq 2-6}$$

Il est donc, important de pouvoir déterminer une correction en fonction de la profondeur. Jusqu'à présent, le calcul d'erreur prend en compte une source d'injection, A, en milieu du domaine à savoir à - 25m de la surface. Regardons ce qui se produit lorsque l'électrode d'injection se déplace vers la surface pour les quatre espacements de sonde M<sub>8</sub>, M<sub>16</sub>, M<sub>32</sub> et M<sub>64</sub> (Figure 2-6). Notons que le diamètre du forage est pris à 0.08m avec une résistivité du fluide de forage toujours égale à la résistivité du matériau.

La Figure 2-6 montre l'erreur (Éq 2-4) liée à l'effet combiné de la surface et de la configuration avec une sonde apportée sur les données de modélisation où l'électrode de référence N, est placée à 9 m de l'électrode d'injection. De ce fait, lorsque l'électrode de courant atteint 9 m de profondeur, N émerge du fluide du forage. Les mesures ne peuvent pas être exploitées d'où une absence d'information entre 0 et 9 m. Les résultats montrent que l'effet de surface va avoir très peu d'influence sur les données des espacements M<sub>8</sub> et M<sub>16</sub> dans le domaine de profondeur supérieur à 9 m. Pour les espacements M<sub>32</sub> et surtout M<sub>64</sub>, l'effet de surface est non-négligeable entre 9m et 12 m de profondeur. Pour des profondeurs supérieures à 12 m, l'effet de surface est négligeable pour tous les espacements. Toutefois, une correction de cet effet sur les données sera apportée pour chaque espacement par l'équation Éq 2-6.

## 2.1 CORRECTION DES DONNÉES DIAGRAPHIQUES

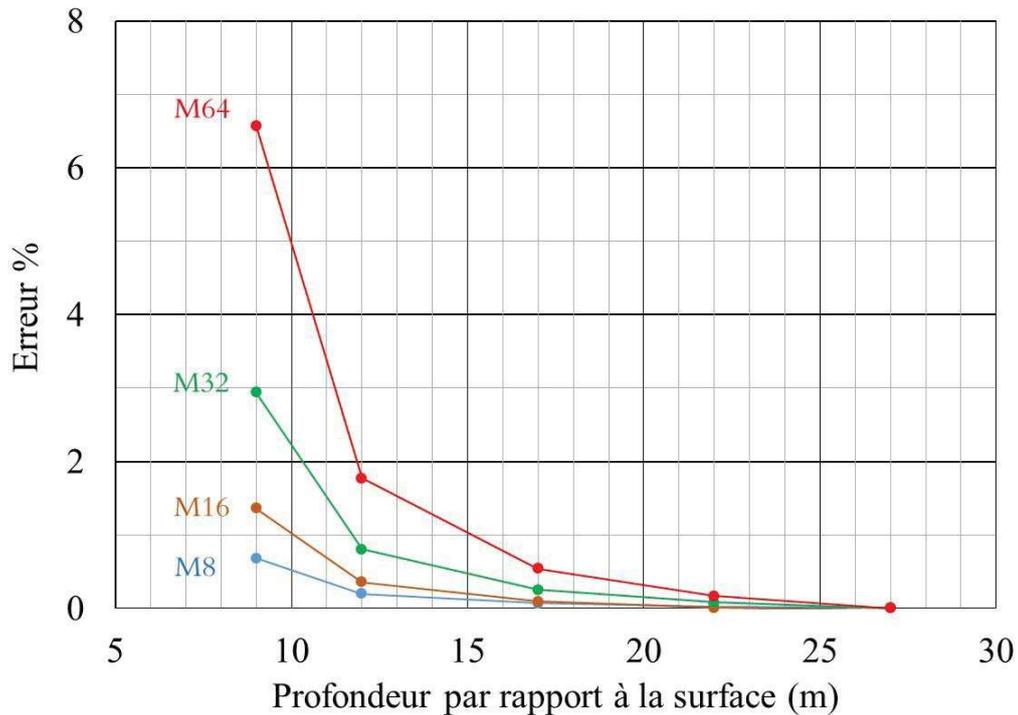


Figure 2-6 : Erreurs liées à l'effet de surface en fonction de l'espacement

## 2.2 Correction des données diagraphiques

### 2.2.1 Modélisation de l'effet de forage

L'effet de forage est modélisé en faisant varier les diamètres du forage et les contrastes de résistivité ( $C_{t/m}$ ) entre le matériau  $\rho_t$  et le fluide du forage  $\rho_m$ . Le paramètre,  $C_{t/m}$ , varie de 1 à 400. Le matériau est considéré comme moins conducteur que le fluide et ainsi, la valeur minimale du contraste est 1. Chaque modèle avec un contraste donné est répété pour trois diamètres de forage c'est-à-dire pour 0,150 m, 0,100 m et 0,080 m. Les graphiques 2- 7 a et b montrent les écarts à la valeur en pourcentage qui existent entre la résistivité calculée et la résistivité vraie du matériau. Il faut rappeler que la résistivité calculée attendue doit être plus ou moins égale à la résistivité vraie du matériau. On présente deux graphiques différents par rapport au paramètre  $C_{t/m}$  utilisé : a.  $C_{t/m} = 4$  et b.  $C_{t/m} = 20$ . Le calcul de cet écart est effectué à différentes distances du point d'injection du courant, A, (0.2, 0.4, 0.8 et 1.6 m) pour chaque diamètre de forage. L'écart à la valeur est une quantification en pourcentage de la différence entre la résistivité vraie du milieu et la résistivité apparente calculée pour différents points distants de A (Éq 2-7):

$$\text{Écart à la valeur (\%)} = \frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_t} * 100 \quad \text{Éq 2-7}$$

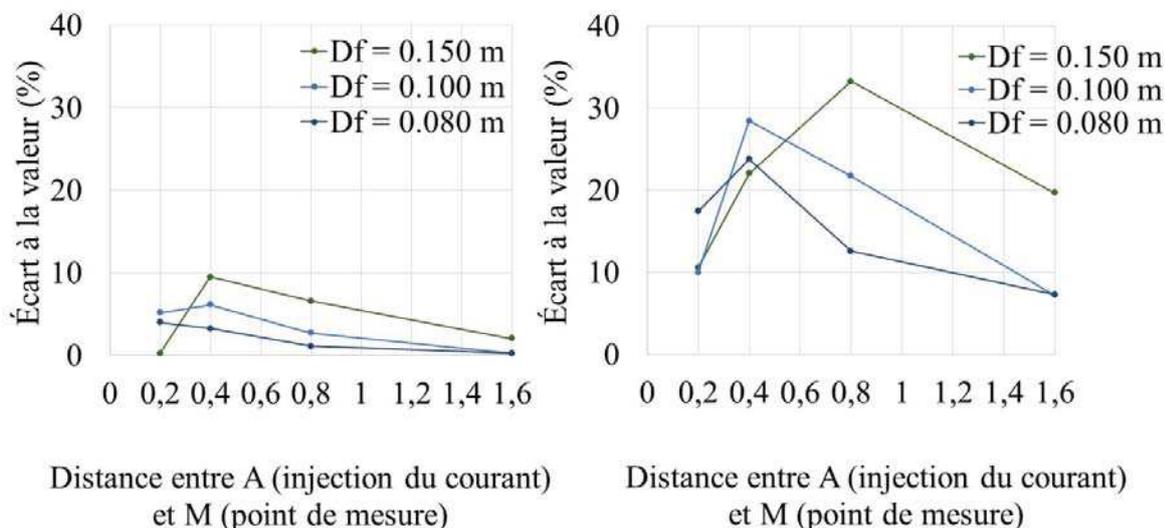


Figure 2-7 : Variations de l'écart à la valeur pour différents diamètres de forage et différents contrastes a.  $C_{t/m} = 4$  et b.  $C_{t/m} = 20$

La Figure 2-7 montre qu'une configuration où le contraste est fort engendre davantage d'écart à la valeur. Les pourcentages d'écart à la valeur pour le graphique de droite oscillent entre 10 et 40% alors que pour le graphique de gauche, les valeurs sont comprises entre 0 et 10 %. Le fluide hautement conducteur par rapport au matériau court-circuite le courant et l'empêche de pénétrer profondément dans le matériau [B. I. Anderson, 2001]. Serra (1979) ajoute que plus le diamètre est grand, plus le volume de fluide entourant l'outil est important et plus la mesure en est affectée. Ce constat se vérifie ici lorsque la distance entre l'électrode d'injection du courant et l'électrode de mesure augmente. Cependant, dans l'hypothèse où les écarts à la valeur ne seraient pas dus au maillage, pour de petites distances entre A et M (pour  $M_8$ ), ce sont les forages de plus petits diamètres qui influencent d'avantage et d'autant plus si le paramètre  $C_{t/m}$  est fort.

### 2.2.2 Équation de correction

Un algorithme est développé à partir des données de modélisation en prenant appui sur l'approche de Scott (1978). Un algorithme Fortran généralisé à tout type de sonde a été avancé pour corriger les logs de l'effet du forage [Scott, 1978] (Éq 2-8). Dans chaque application deux hypothèses simplificatrices sont mises en place : l'épaisseur de la couche étudiée est supposée être infinie (au moins 10 fois plus grand que l'espacement entre électrodes) et l'invasion du

## 2.1 CORRECTION DES DONNÉES DIAGRAPHIQUES

fluide forage dans le matériau est considérée comme négligeable. Deux hypothèses vérifiées dans le modèle utilisé.

$$Y = 0.015270453 x_1^3 - 0.065033900 x_1^2 + 1.2427109 x_1 - 0.0031720250 x_2^4 - 0.022673233 x_2^3 + 0.12836914 x_2^2 - 0.056806217 x_2 - 0.0033741998 x_1^2 x_3 + 0.0020463816 x_2^2 x_3 + 0.059729697 x_2 x_3 - 0.24143625 x_3 - 0.13580321 \quad \text{Éq 2-8}$$

Où Y, X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> et X<sub>3</sub> représentent respectivement Log (C<sub>t/m</sub>), Log (C<sub>a/m</sub>), Log (AM/D<sub>f</sub>) et X<sub>1</sub>X<sub>2</sub>. Log (C<sub>t/m</sub>) est le logarithme du ratio de la résistivité vraie du matériau et la résistivité du fluide du forage. Elle est la variable dépendante c'est-à-dire que ce paramètre varie sous l'influence d'autres paramètres. Log (C<sub>a/m</sub>) est le logarithme du ratio de la résistivité apparente et la résistivité du fluide du forage. Log (AM/D<sub>f</sub>) est le logarithme du ratio de l'espacement AM et du diamètre du forage. Ces deux paramètres et leur produit sont les variables indépendantes, c'est-à-dire non influençables les unes des autres.

La forme de cette équation est reprise pour être appliquée à notre dispositif (sonde isolante avec cinq électrodes conductrices). Pour cela, les données de modélisation obtenues en faisant varier le paramètre C<sub>t/m</sub> et le diamètre du forage sont reprises. Le nombre et le type de variable restent inchangés à l'équation de Scott. La variable dépendante est Ln (C<sub>t/m</sub>) et les variables indépendantes sont Ln (C<sub>a/m</sub>), Ln (AM/D<sub>f</sub>) et leur produit. À l'aide de la méthode de régression non linéaire du logiciel XLStat, une équation entière de type Scott (Éq. 2.9) est créée.

$$Y = -0.00075 * X_1^4 + 0.02299 * X_1^3 - 0.06325 * X_1^2 + 1.11849 * X_1 + 0.01300 * X_2^4 - 0.10401 * X_2^3 + 0.21102 * X_2^2 - 0.07903 * X_2 + 0.00069 * X_1^3 * X_3 - 0.01209 * X_1^2 * X_3 + 0.02144 * X_1 * X_3 - 0.10210 * X_3 - 0.00624 * X_2^3 * X_3 + 0.03798 * X_2^2 * X_3 + 0.01112 * X_2 * X_3 \quad \text{Éq 2-9}$$

Il est décidé d'étudier plusieurs polynômes simples à différents degrés et l'équation entière de type Scott complexe de degrés 4 (Éq 2-9) afin de déterminer la sensibilité des termes. Le coefficient de détermination R<sup>2</sup> et la somme des carrés résiduels SCR sont des indicateurs de la qualité d'un modèle. Une bonne corrélation de l'équation avec les données suggère un R<sup>2</sup> qui tend vers 1 et une minimisation de SCR. Ces paramètres pour chaque équation répondent à ces exigences (Tableau 2-5).

## CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DIAGRAPHIQUE

Équation	Nombre de termes	Coefficient de corrélation $R^2$	SCR
Équation entière de type Scott	15	0,99965	0,156
Équation de degré 4	13	0,99600	1,765
Équation de degré 3	10	0,99587	1,824
Équation de degré 2	7	0,99574	1,882

Tableau 2-5 : Coefficient de détermination et SCR des équations étudiées

Les coefficients de détermination de chaque équation tendent vers 1 et indiquent une bonne corrélation de chacune. Cependant, le SCR montre une meilleure corrélation de l'équation entière de type Scott avec un coefficient de détermination,  $R^2$ , égal à 0,99965 et une somme des carrés résiduels SCR, égale à 0,156. Pour confirmer d'une meilleure précision avec cette l'équation, nous décidons d'étudier les écarts à la valeur pour chaque équation. Les calculs s'effectuent pour différents rapports entre l'espace AM et le diamètre  $D_f$  et pour chaque équation. La Figure 2-8 regroupe un cas où le paramètre  $C_{t/m}$ , est égal 4 et un deuxième cas où il est égal à 20.

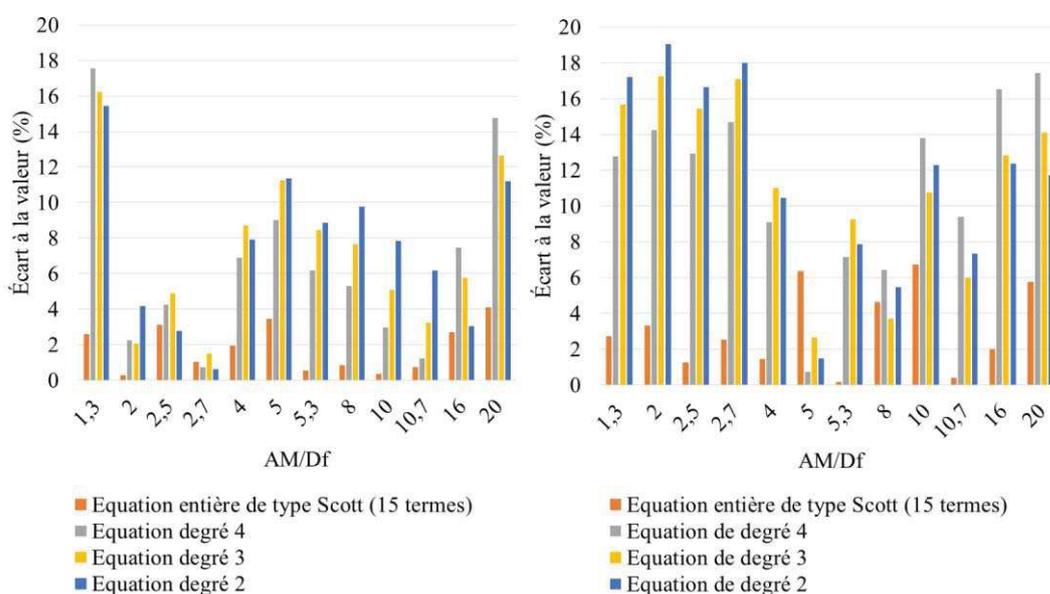


Figure 2-8 : Écart à la valeur en fonction d'AM/Df pour des contrastes différents a.  $C_{t/m} = 4$  et b.  $C_{t/m} = 20$

La Figure 2-8 marque davantage les observations faites en Tableau 2-5. Les équations de degré 2,3 et 4 (respectivement les barres bleues, jaunes et grises) donnent des résistivités calculées différentes de la valeur de résistivité vraie du matériau malgré de très bons coefficients

## 2.1 CORRECTION DES DONNÉES DIAGRAPHIQUES

de détermination. À l'inverse, l'équation entière de type Scott permet de recalculer de façon plus précise les valeurs de résistivité (barres orange). Cette équation comporte 15 termes tous essentiels pour une correction optimale des mesures. Dans la suite de ces travaux, les données seront corrigées par l'équation entière de Scott (Éq 2-9).

### 2.2.3 Validation de l'équation de correction

La Figure 2-9 montre l'écart à la valeur des données non corrigées et corrigées pour différentes configurations. Elle permet de comparer l'efficacité de l'équation de correction (Éq 2-9) pour deux types de contraste ( $C_{t/m} = 4$  et  $C_{t/m} = 20$ ) et de diamètres de forage ( $D_f = 0.080$  m et  $D_f = 0.150$  m).

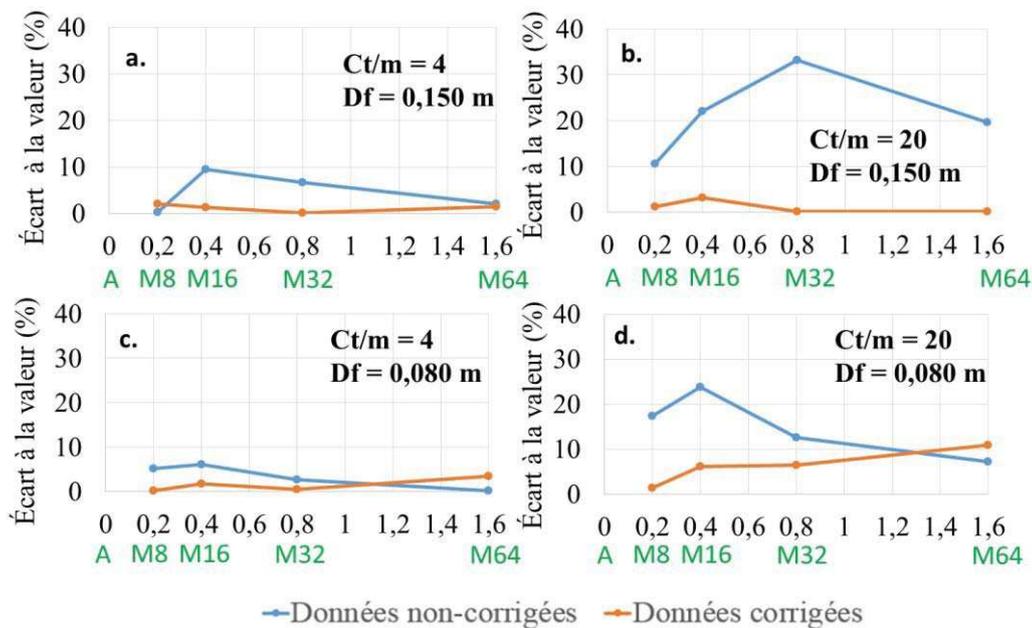


Figure 2-9 : Comparaison entre des données corrigées et non corrigées pour quatre points de mesure et pour différentes configurations – a.  $C_{t/m} = 4$  et  $D_f = 0.150$  m, b.  $C_{t/m} = 20$  et  $D_f = 0.150$  m, c.  $C_{t/m} = 4$  et  $D_f = 0.080$  m et d.  $C_{t/m} = 20$  et  $D_f = 0.080$  m

L'efficacité de l'équation de correction est illustrée notamment pour des contrastes et des diamètres importants (Figure 2- 9 a. et b.). Toutefois, notons que pour de petits diamètres, l'équation s'écarte de la valeur théorique lorsque la distance entre l'électrode d'injection et l'électrode de mesure est grande (Figure 2- 9 c. et d.). 82% des données corrigées sont conformes aux valeurs attendues (avec un seuil d'erreur de 5%). Les 18% restants correspondent aux valeurs corrigées possédant entre 5% et 10% d'écart à la valeur souvent dû à une configuration où le diamètre du forage est le plus petit.

## 2.3 Sensibilité aux paramètres de fissure

### 2.3.1 Signature d'une fissure

#### 2.3.1.1 Programme de modélisation

La première étude a pour but de déterminer la réponse de l'outil en fonction de la nature conductrice ou isolante de la fissure (Figure 2-10). Une fissure conductrice signifie que la résistivité de la fissure  $\rho_f$  est inférieure à la résistivité du matériau,  $\rho_t$  et inversement pour une fissure résistante. Pour cela, le béton est affecté par une fissure d'extension L, ici infinie, située à mi - profondeur avec une résistivité  $\rho_f$ . Pour atteindre les objectifs, il est choisi de fixer le diamètre Df à 0,1m, la résistivité du fluide du forage m à 10 Ohm.m, la résistivité vraie du milieu à 200 Ohm.m et l'ouverture h à 0,02m. Seule la résistivité de la fissure change permettant de jouer sur le contraste  $C_{vf}$ . Ainsi, il est possible de modéliser une fissure résistante avec des  $C_{vf} < 1$  et une fissure conductrice avec des  $C_{vf} > 1$ .

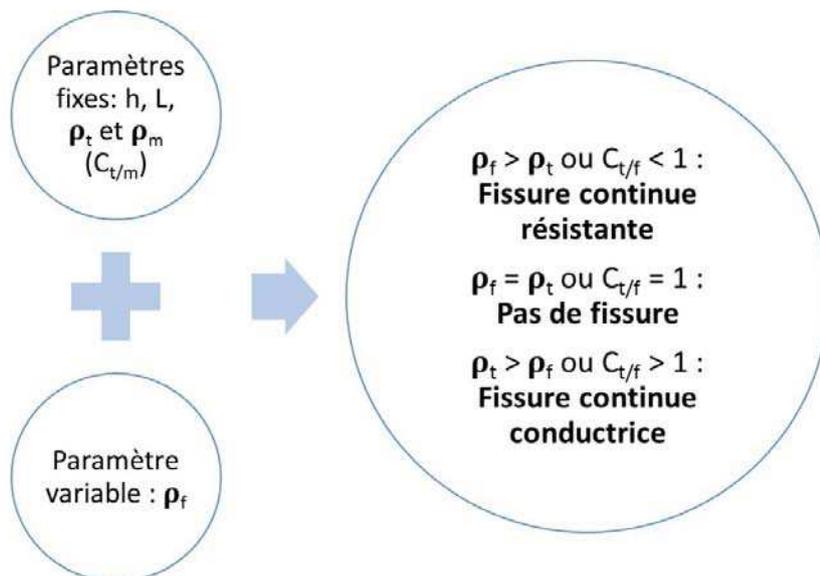


Figure 2-10 : Paramètres de modélisation de l'influence de la résistivité de la discontinuité

#### 2.3.1.2 Fissure résistante

L'analyse de la signature de la fissure passe par une analyse des travaux publiés sur les réponses d'outil obtenues dans le cas de couches minces géologiques. Dans une étude sur l'inversion d'enregistrements en forage obtenus par le dispositif normal, de premiers travaux sur la signature d'une fissure résistante sont réalisés [Yang et Ward, 1984]. La source émettrice et les

### 2.3 SENSIBILITÉ AUX PARAMÈTRES DE FISSURE

mesures de potentiel sont ponctuelles. Ces travaux ne prennent toutefois pas en compte l'effet de forage et le contraste entre l'unité géologique et l'encaissant. Pour des espacements  $AM = n \cdot h$  où  $n \geq 1/2$  (Figure 2-11 a.), la signature d'une couche mince résistante ( $C_{v/f} = 0.1$ ) se traduit par une inversion de la résistivité. Il existe une valeur minimale de résistivité représentant la position de la couche bornée par deux valeurs maximales. Les auteurs avancent l'idée de la formation d'un plateau de plus faible résistivité de longueur correspondant à l'épaisseur de la couche mince pour des espacements  $AM = 2h$ . Pour des espacements  $AM = k \cdot h$  où  $0 \leq k < 1/2$  (Figure 2-11 b.), une augmentation de résistivité se produit. Au droit de la couche, la résistivité apparente tend vers la résistivité vraie de la couche lorsque cette dernière a une épaisseur conséquente par rapport à l'espacement soit  $h \geq 10 AM$ .

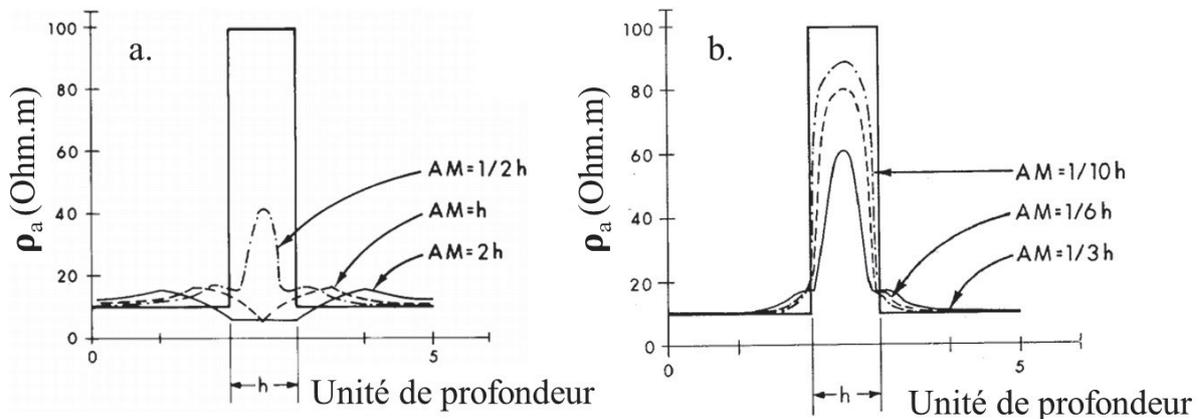


Figure 2-11 : Réponses de couches minces résistantes pour différents ratios entre l'espacement AM et l'épaisseur h [Yang et Ward, 1984]

Dans notre cas, une fissure résistante est modélisée avec une ouverture de 0.020m et une extension infinie. La résistivité du matériau et du fluide de forage restent fixes i.e. respectivement à 200 Ohm.m et 10 Ohm.m ( $C_{v/m} = 20$ ), seule la résistivité de la fissure fluctue. Rappelons que la modélisation prend en compte la géométrie de la sonde et l'effet du diamètre et du fluide du forage.

La Figure 2-12 illustre les réponses de fissures résistantes pour différents contrastes avec le matériau et pour un espacement  $M_8 (= 10 h)$  et  $M_{16} (= 20 h)$ . La réponse d'une fissure résistante se traduit par une inversion de la résistivité. Deux valeurs maximales de résistivité bornent une valeur plus faible se positionnant au droit de la fissure. Pour des  $C_{v/f}$  qui tendent vers 0, la

distance entre les points d'inflexion représente l'espacement. À l'inverse, pour des  $C_{t/f}$  qui tendent vers 1, c'est la distance entre les deux maxima qui identifient l'espacement utilisé.

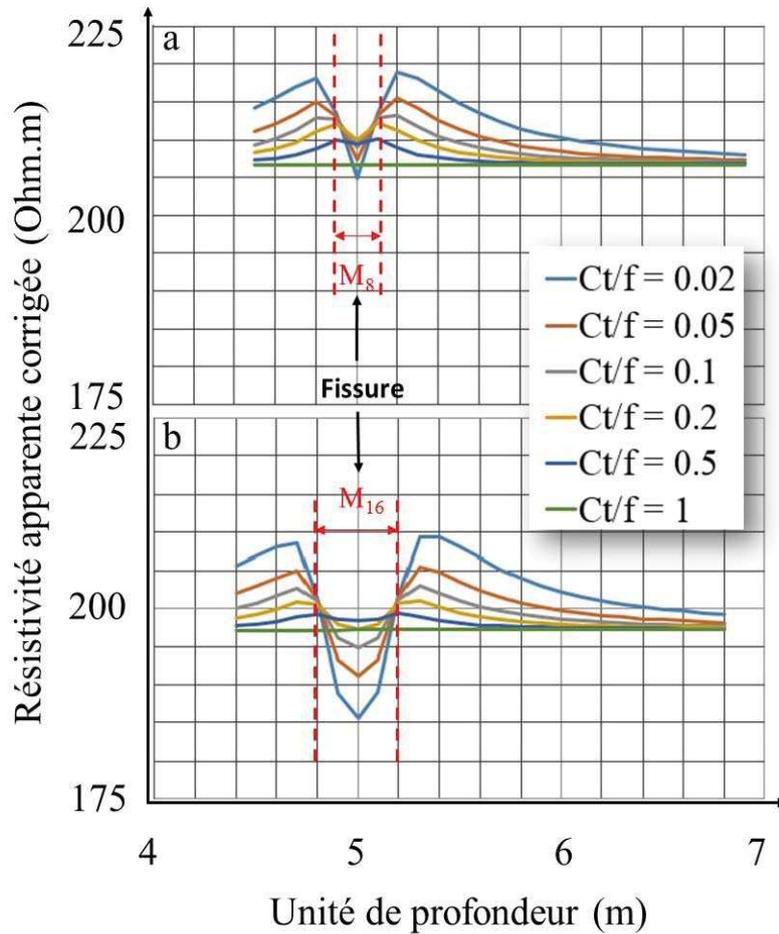


Figure 2-12 : Log de résistivité apparente corrigée d'une fissure résistante pour différents  $C_{t/f}$  :  
**a.** pour  $M_8$  et **b.** pour  $M_{16}$  ( $h=0.02m$  et  $C_{t/m}=20$ )

Lorsque l'espacement entre A et M augmente i.e.  $M_{32}$  (= 40h) et  $M_{64}$  (=80h), la réponse de l'outil est amplifiée (Figure 2- 13). Cette observation est d'autant plus remarquable que le contraste  $C_{t/f}$  est fort. Une fissure très résistante se traduit par une chute de résistivité bornée par deux maximums. La distance entre les points d'inflexion correspond à l'espacement utilisé. La fissure est donc détectée plus tôt.

## 2.3 SENSIBILITÉ AUX PARAMÈTRES DE FISSURE

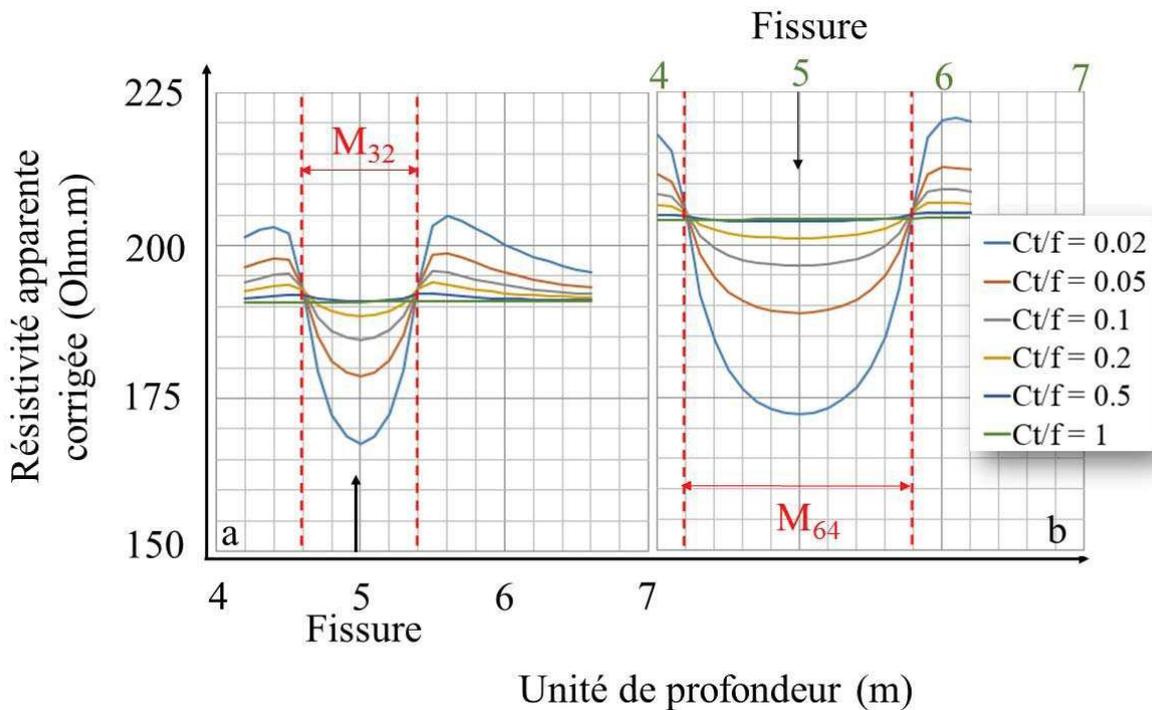


Figure 2-13 : Log de résistivité apparente corrigée d'une fissure résistante pour différents  $C_{t/f}$  :  
**a.** pour  $M_{32}$  et **b.** pour  $M_{64}$  ( $h=0.02\text{m}$  et  $C_{t/m}=20$ )

Dans tous les cas de figure présentés, la fissure résistante se traduit par une inversion de résistivité c'est-à-dire une résistivité faible bornée par deux maximums. Yang et Ward (1984) observent le même phénomène lorsque  $AM = 2h$ . Les auteurs montrent également qu'un plateau se forme au droit de la couche dont la longueur correspond à son ouverture. Dans le cas de fissure i.e.  $AM \gg 2h$ , cette information n'est pas perçue. Cependant, il est important de noter que la réponse de l'outil est grandement influencée par l'espacement utilisé masquant les informations sur l'ouverture. La fissure est bien détectée, mais ne peut être caractérisée en termes d'ouverture.

### 2.3.1.3 Fissure conductrice

Dans le cas d'une couche conductrice  $C_{t/f}=10$ , il se produit l'effet inverse [Yang et Ward, 1984]. Pour des espacements  $AM = n \cdot h$ , où  $n \geq 1/2$  (Figure 2-14 a.), la signature d'une couche mince conductrice se traduit par un maximum de résistivité borné par deux minimums. Pour un  $AM = 2h$ , un plateau de résistivité plus élevée correspondant à l'ouverture de la couche mince. Pour des espacements  $AM = k \cdot h$ , où  $0 \leq k < 1/2$  (Figure 2-14 b.), il existe une chute de la résistivité. Au droit de la couche, elle tend vers la résistivité vraie lorsque la couche est d'épaisseur conséquente par rapport à l'espacement soit  $h \geq 6 AM$ .

## CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DIAGRAPHIQUE

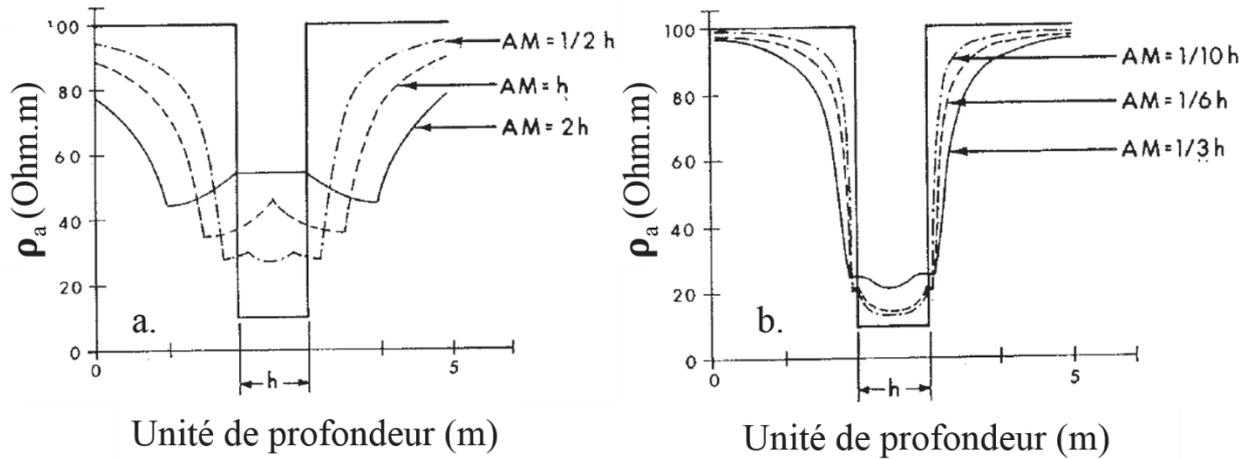


Figure 2-14 : Réponses de couches minces conductrices pour différents ratios entre l'espacement AM et l'épaisseur h [Yang et Ward, 1984]

La résistivité de la fissure varie et permet d'analyser la réponse de l'outil pour différents contrastes  $C_{vf}$  compris entre 2 et 200. La Figure 2-15 présente les réponses diagraphiques pour différents contrastes entre la fissure et le matériau et pour les espacements  $M_8 (= 10 h)$  et  $M_{16} (= 20 h)$ .

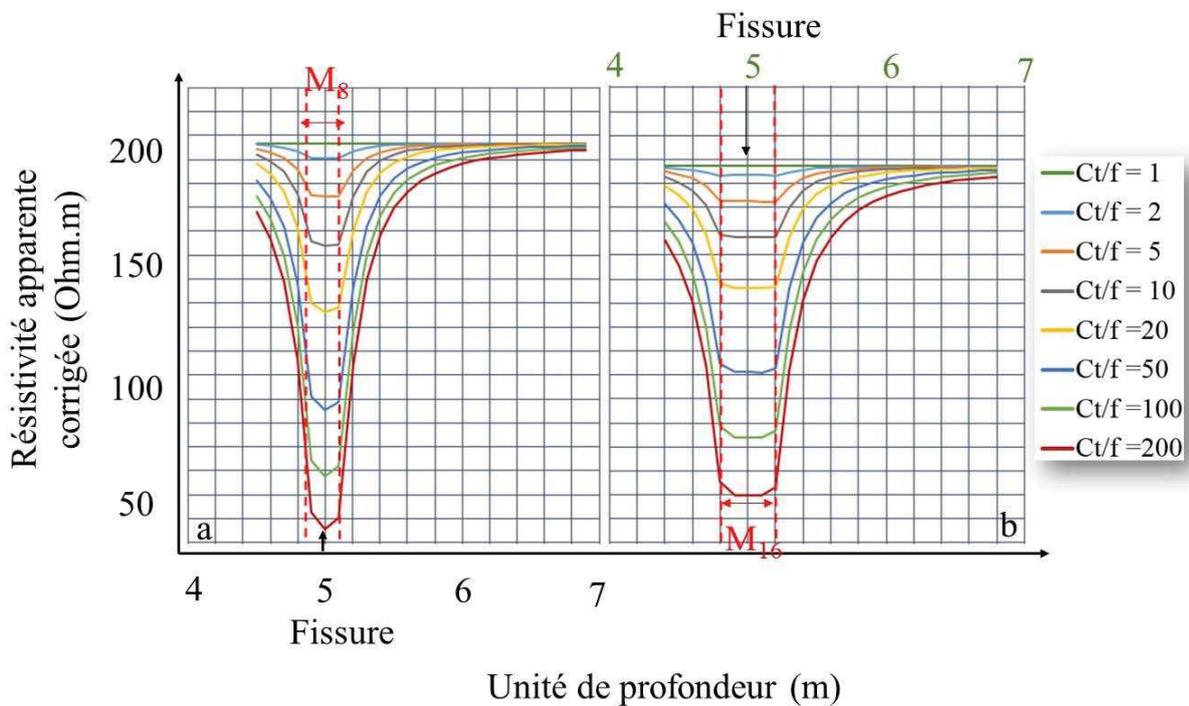


Figure 2-15 : Log de résistivité apparente corrigée d'une fissure conductrice pour différents  $C_{vf}$  : a. pour  $M_8$  et b. pour  $M_{16}$  ( $h=0.02m$  et  $C_{vm}=20$ )

### 2.3 SENSIBILITÉ AUX PARAMÈTRES DE FISSURE

La réponse d'une fissure continue conductrice se traduit par une chute des résistivités apparentes au droit et aux environs de la fissure. Celle-ci est d'autant plus marquée que le contraste  $C_{t/f}$  est important (Figure 2-16). De plus, la diminution de  $C_{t/f}$  entraîne la formation d'un plateau égal à l'espacement utilisé. Toutefois, ce plateau se dessine déjà pour des  $C_{t/f}$  forts lorsque l'espacement augmente.

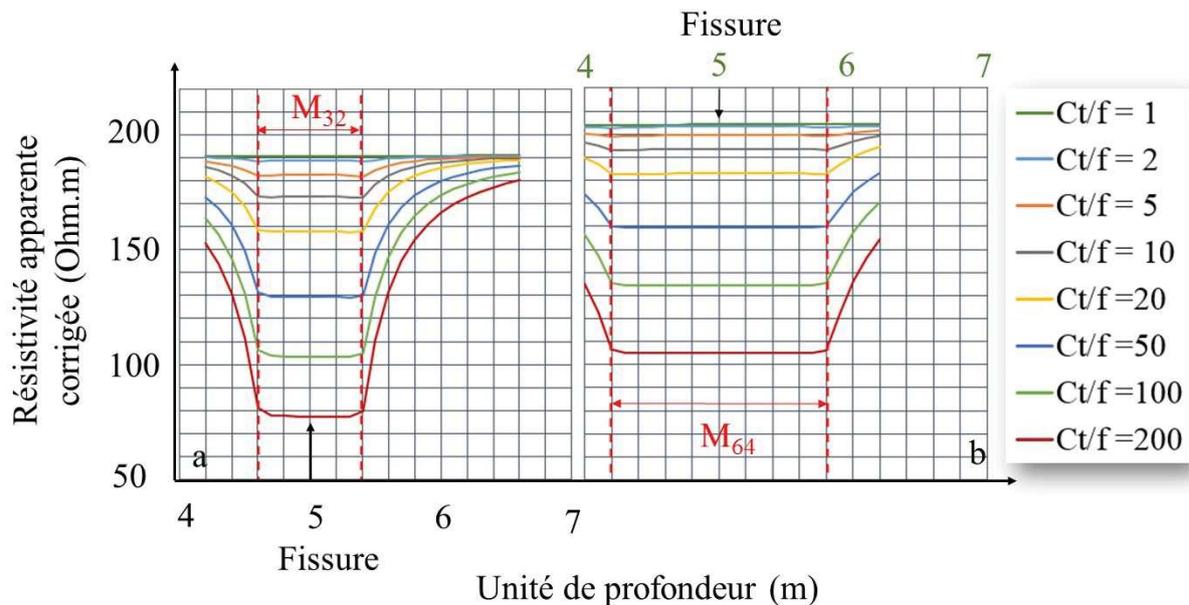


Figure 2-16 : Log de résistivité apparente corrigée d'une fissure conductrice pour différents  $C_{t/f}$  : **a.** pour  $M_{32}$  et **b.** pour  $M_{64}$  ( $h=0.02m$  et  $C_{t/m}=20$ )

Yang et Ward (1984) ont montré qu'une fissure conductrice avec un  $AM = 2h$ , se traduit par une chute de résistivité couplée à la formation d'un plateau plus résistif au droit de la couche de longueur égale à l'ouverture. Dans nos conditions où le forage et la sonde sont considérés, pour  $AM \gg 2h$ , l'outil signe également une chute de la résistivité. Cependant, l'inversion de la résistivité n'est pas représentée, seule la formation d'un plateau égale à l'espacement utilisé apparaît lorsque le contraste  $C_{t/f}$  diminue et l'espacement augmente. Ce parallèle entre les travaux de Yang et Ward et les nôtres, montre une cohérence dans la signature générale de la fissure conductrice i.e. une chute de la résistivité. Cependant, au vu des conditions et des rapports entre l'ouverture et l'espacement différents, la réponse n'est pas la même. Les résultats de nos modélisations montrent que lorsque  $AM \gg 2h$ , l'espacement influence la réponse diagraphique. La détection est présente, mais les informations de la fissure semblent masquées. Dans la suite des travaux de modélisation, il est choisi d'étudier seulement l'influence des

paramètres d'une discontinuité conductrice sur la réponse diagraphique. On considère, en effet, que les discontinuités présentent une conductivité plus élevée que l'ensemble du matériau.

### 2.3.2 Les paramètres d'une discontinuité conductrice

Cette section s'intéresse à l'influence de nombreux paramètres tels que le contraste de résistivité entre le matériau et le fluide du forage,  $C_{t/m}$ , l'ouverture,  $h$ , le contraste de résistivité entre le matériau et la fissure,  $C_{v/f}$  et l'extension,  $L$ . Dans la suite de cette thèse, les résultats seront présentés sous la forme de variation relative,  $V_r$ , i.e. que chaque résistivité apparente corrigée de l'effet de forage,  $\rho_a$ , est rapportée à la résistivité vraie du matériau,  $\rho_t$  (Éq 2-10). Cette variation relative représente l'influence de la présence de la fissure et est exprimée en pourcentage.

$$V_r \% = \frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_t} * 100 \quad \text{Éq 2-10}$$

#### 2.3.2.1 Influence du contraste $C_{t/m}$

L'étude de l'influence du contraste de résistivité entre le matériau et le fluide du forage,  $C_{t/m}$ , prend en compte : (1) un béton de résistivité qui oscille entre 10 et 200 Ohm.m [Whiting et Nagi, 2003; Lataste *et al.*, 2005] et (2) un fluide de forage de résistivité inférieure à 33 Ohm.m. On considère que l'eau du fluide du forage a une résistivité inférieure à la résistivité de l'eau du Saint-Laurent [Snyder *et al.*, 2003].

Ainsi, on choisit de faire varier les contrastes  $C_{t/m}$  dans un intervalle de 1 à 100, en prenant les valeurs de 2, 4, 10, 50 et 100. Pour cette étude, l'ouverture de la fissure et l'extension sont fixes. Dans la suite, on prendra une ouverture de 0.02 m et une extension infinie. Il est décidé d'étudier le paramètre  $C_{t/m}$  en fixant les résistivités du matériau et de la fissure ( $C_{v/f}$  fixe) et en faisant seulement varier la résistivité du fluide de forage ( $C_{t/m}$ ). Le paramètre  $C_{t/m}$  est ensuite testé avec d'autres valeurs de  $C_{v/f}$ .

La Figure 2-17 montre l'influence du contraste entre le fluide du forage et le matériau pour plusieurs  $C_{v/f}$  pour l'espacement M8. En effectuant cette analyse, ce n'est pas tant l'influence de  $C_{t/m}$  que l'on étudie, mais l'interaction des résistivités entre le matériau, le fluide de forage et la fissure. En effet, selon les résistivités choisies, il existe trois configurations : (1)  $\rho_t > \rho_m > \rho_f$ , (2)  $\rho_t > \rho_m = \rho_f$  et (3)  $\rho_t > \rho_f > \rho_m$ . Dans le cas (1), la fissure est plus conductrice que le fluide

### 2.3 SENSIBILITÉ AUX PARAMÈTRES DE FISSURE

du forage et inversement pour le cas (3). Prenons l'exemple d'un  $C_{t/f}$  égal à 20. On fixe  $\rho_t$  à 20 Ohm.m et  $\rho_f$  à 2 Ohm.m.  $\rho_m$  prend les valeurs de 0.2, 0.4, 1, 2, 5 et 10 Ohm.m donnant ainsi des  $C_{t/m} = 100, 50, 20, 10, 4$  et 2. Ainsi, on peut distinguer :

- (1) Pour  $C_{t/m}$  égal à 2, 4 et 10, on a  $\rho_t > \rho_m > \rho_f$
- (2) Pour  $C_{t/m}$  égal 20, on a  $\rho_t > \rho_m = \rho_f$
- (3) Pour  $C_{t/m}$  égal à 50 et 100, on a  $\rho_t > \rho_f > \rho_m$

Dans la configuration (1), les variations relatives calculées pour différentes valeurs de  $\rho_m$  sont du même ordre. La résistivité du fluide du forage,  $\rho_m$ , a donc peu d'influence sur la réponse de l'outil face à une fissure. Ceci s'explique par la conductivité plus importante de la fissure. Pour la configuration (3), lorsque  $C_{t/m}$  augmente c'est-à-dire lorsque le fluide du forage devient de plus en plus conducteur face à la fissure, il existe une perte d'information. Les valeurs de variations relatives diminuent en fonction que  $C_{t/m}$  augmente i.e.  $\rho_f \gg \rho_m$ . La perte d'information sur la fissure provient de la préférence du courant à circuler dans le milieu le plus conducteur, ici le fluide du forage, au détriment du milieu moins conducteur, le matériau fissuré. Cependant, on remarque que les variations relatives sont relativement de mêmes valeurs pour des  $C_{t/m}$  compris entre 0 et 20.

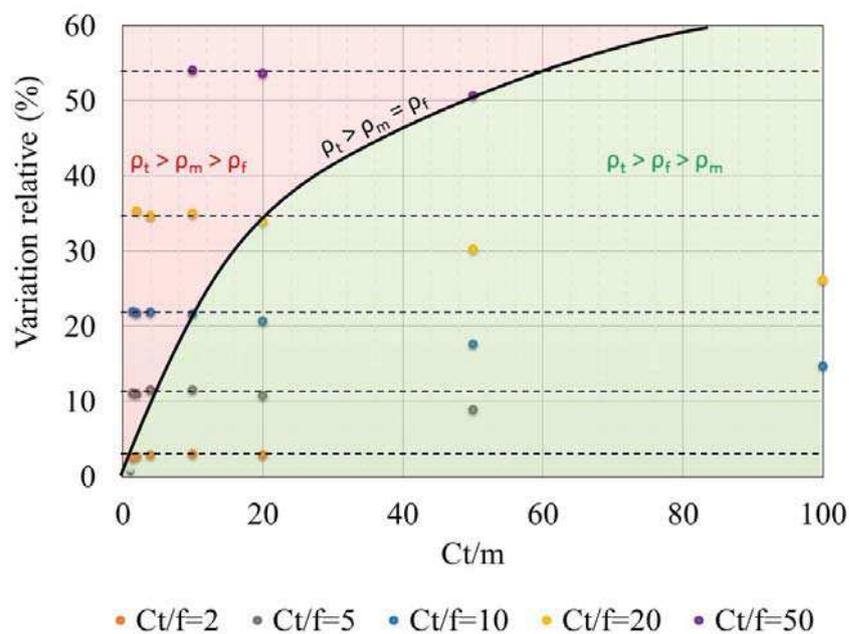


Figure 2-17 : Influence de  $C_{t/m}$  sur la réponse diagraphique pour différents  $C_{t/f}$  et pour l'espacement  $M_8$

## CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DIAGRAPHIQUE

Les observations précédentes sont également appréciables pour les grands espacements, mais d'amplitudes plus faibles par rapport aux résultats en  $M_8$  (Figure 2-18). Un espacement grand est synonyme d'un volume d'investigation plus important. Par conséquent, la fissure est moins visible et les variations relatives au droit de la fissure deviennent plus faibles pour les contrastes proches de 1. On observe que les variations du paramètre  $C_{t/m}$ , dans n'importe quelle configuration, ont peu d'impact notamment pour les espacements  $M_{32}$  et  $M_{64}$ . La réponse de l'outil face à la fissure est considérée comme étant la même pour différents  $C_{t/m}$ .

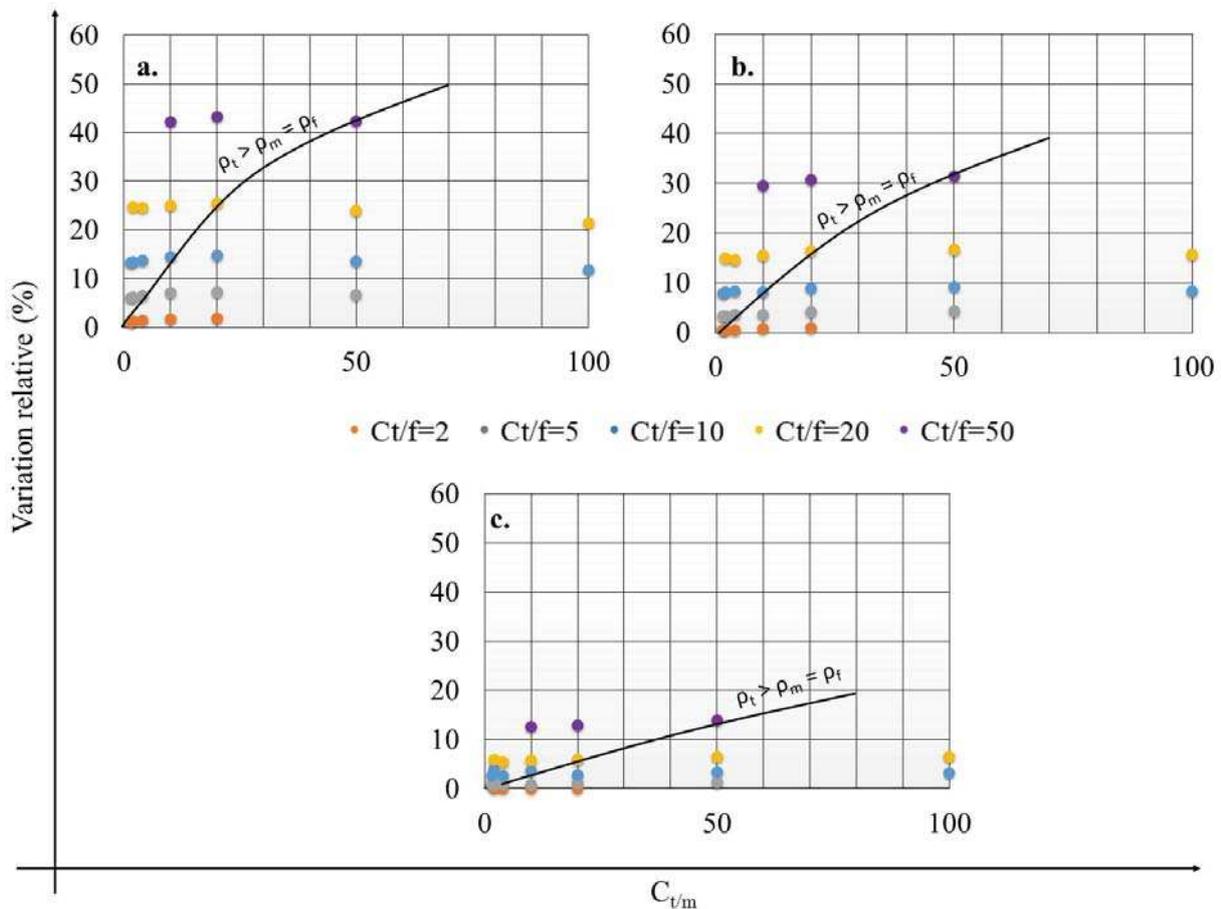


Figure 2-18 : Influence de  $C_{t/m}$  sur la réponse diagraphique pour différents  $C_{t/f}$  : a. pour  $M_{16}$ , b. pour  $M_{32}$  et c. pour  $M_{64}$

Dans la suite de l'étude de l'influence des différents paramètres de fissure, nous décidons d'arrêter la valeur de  $C_{t/m}$  entre 0 et 20 c'est-à-dire dans des cas où la variation relative reste stable pour n'importe quelle valeur de  $C_{t/m}$ . Ce choix permet non seulement d'omettre le paramètre  $C_{t/m}$ , mais également d'étudier la configuration où  $\rho_m > \rho_f$ .

## 2.3 SENSIBILITÉ AUX PARAMÈTRES DE FISSURE

### 2.3.2.2 Influence du contraste $C_{t/f}$

Pour l'étude de l'influence du contraste entre la fissure et le matériau,  $C_{t/f}$ , l'ouverture de la fissure est fixée à 0.02 m,  $C_{t/m}$  est égal à 2 et l'extension est infinie. Il est choisi de garder ces paramètres stables et d'analyser la réponse de l'outil face à une fissure pour des valeurs de  $C_{t/f}$  de 2, 5, 10, 15 et 20.

La Figure 2-19 montre l'influence du paramètre  $C_{t/f}$  pour l'espacement  $M_8$ . La variation du paramètre  $C_{t/f}$  entraîne non seulement un changement d'information sur la fissure, mais également une évolution de la forme de la courbe aux environs et au droit de la fissure. Une discontinuité bien représentée c'est-à-dire une ouverture et un  $C_{t/f}$  importants signe sa présence par un pic de forte variation relative. Cependant, si le  $C_{t/f}$  diminue, alors la discontinuité est de moindre importance et la signature au droit de la fissure se traduit par la formation d'un plateau égal à l'espacement utilisé. Ce dernier se creuse dessinant, ainsi, deux maximums distants de l'espacement pour des  $C_{t/f}$  encore plus faibles.

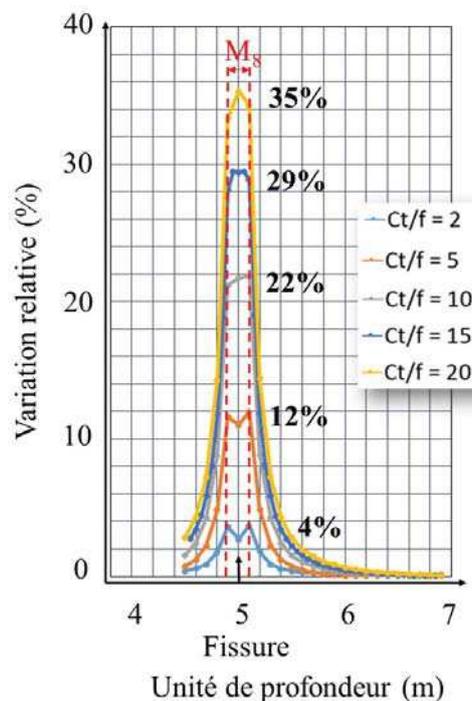


Figure 2-19 : Influence du paramètre  $C_{t/f}$  sur la réponse diagraphique pour  $M_8$  ( $h = 0.02\text{m}$  et  $C_{t/m} = 2$ )

Dans le cas d'une prise de mesure avec des espacements plus grands (Figure 2-20), le volume devient plus grand et la signature de la fissure est moins marquée. Pour un espacement  $M_{16}$ , la

réponse de l'outil face à cette même discontinuité se marque toujours par une baisse de résistivité, mais l'allure de la courbe ne dessine plus de pic, mais directement un plateau égal à l'espacement utilisé. Un creusement se manifeste lorsque l'on diminue le paramètre  $C_{v/f}$  et forme un plateau plus résistif. Selon l'espacement choisi, sa longueur est égale à 0.20 m pour  $M_{16}$ , 0,60 m pour  $M_{32}$  et 1.40 m pour  $M_{64}$ .

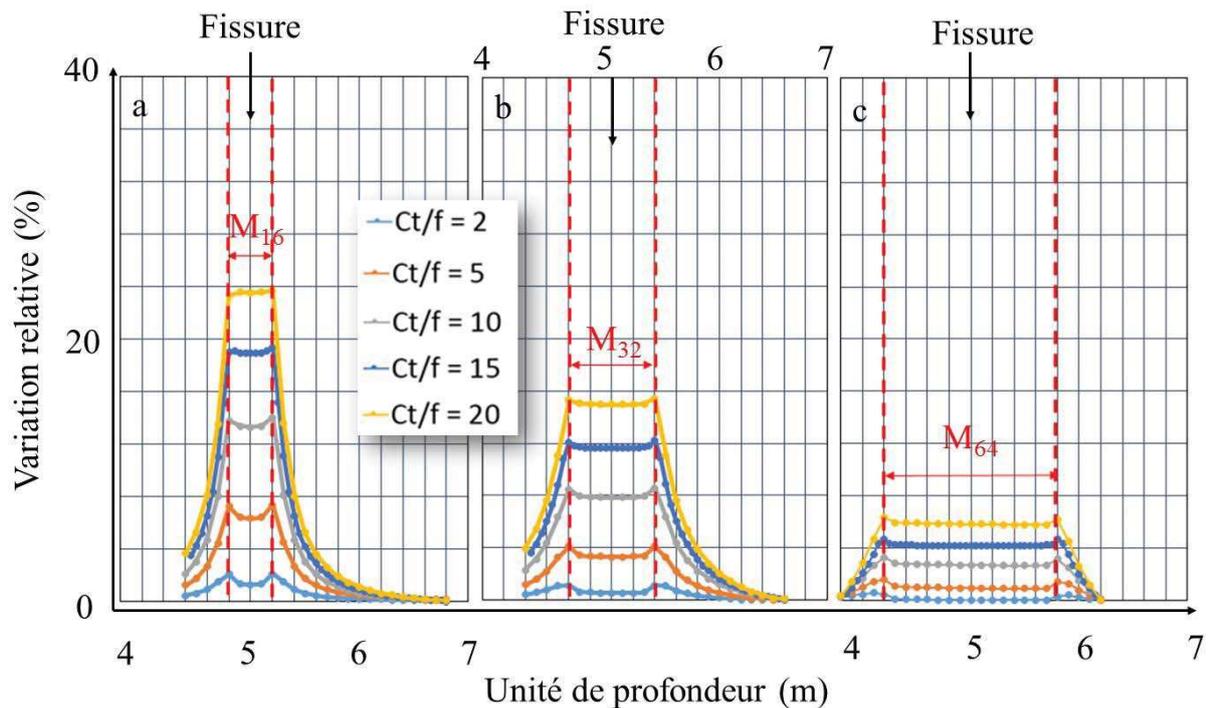


Figure 2-20 : Influence du paramètre  $C_{v/f}$  sur la réponse diagraphique pour : a.  $M_{16}$ , b.  $M_{32}$  et c.  $M_{64}$

### 2.3.2.3 Influence de l'ouverture $h$

Le volume qu'occupe la discontinuité dans le volume d'investigation joue un rôle prépondérant dans sa détermination et sa caractérisation. De ce fait, plus le volume total de la discontinuité dans le volume d'investigation est important plus l'effet sera significatif. La quantification est, donc, possible. L'ouverture et l'extension sont les deux paramètres géométriques essentiels dans la compréhension de l'interprétation qualitative puis quantitative. Il est décidé d'étudier l'influence de l'ouverture sur la réponse diagraphique en fixant  $C_{v/m}$  et  $C_{v/f}$  respectivement à 2 et 10. Les valeurs d'ouverture sont prises à 0.005 m, 0.010 m, 0.015 m et 0.020 m et l'extension est infinie.

### 2.3 SENSIBILITÉ AUX PARAMÈTRES DE FISSURE

La Figure 2-21 montre l'influence de l'ouverture pour différentes valeurs sur la réponse de l'outil pour chaque espacement. La fissure entraîne une chute de résistivité à son droit d'autant plus importante que l'ouverture est grande et que l'espacement est petit. Ce graphique montre bien que la détection des fissures est basée sur sa représentation dans le volume d'investigation.

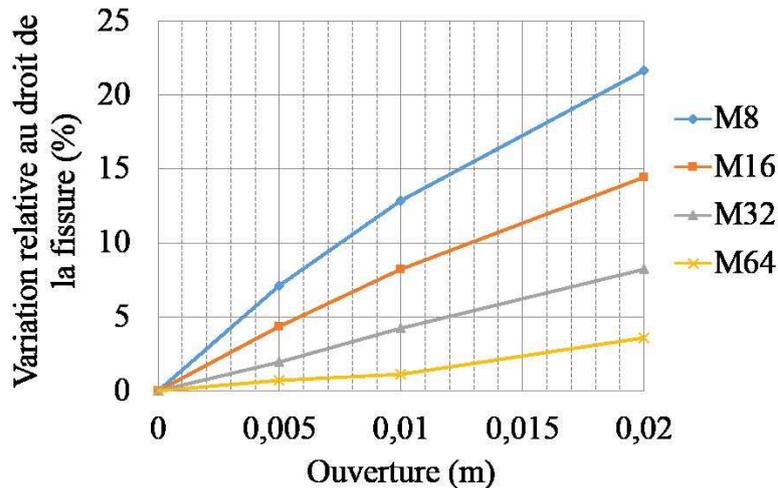


Figure 2-21 : Variation relative au droit de la fissure en fonction de l'ouverture et pour chaque espacement ( $C_{v/m} = 2$  et  $C_{v/f} = 10$ )

La Figure 2-22 montre l'allure des courbes décrivant les variations relatives en fonction de la profondeur pour chaque espacement. Le point d'inflexion est un outil pour positionner l'interface. On s'aperçoit que pour un espacement donné, les quatre courbes donnent la même position. Malgré la variation du paramètre d'ouverture de la discontinuité, les graphiques ne montrent pas un changement de position des interfaces. Cela est, probablement, lié à l'écartement des électrodes. Les courbes sont construites sur un nombre fini de points. Si nous avions une mesure en continu, sans doute que nous aurions des points d'inflexion décalés marquant une différence. Mais en pratique, et tel que c'est le cas ici, le point d'inflexion n'est pas un critère pour l'estimation de faible ouverture de la discontinuité

Lorsque l'on analyse les graphiques pour les espacements  $M_{16}$ ,  $M_{32}$  ou  $M_{64}$  et des ouvertures de 0.015m et 0.020m, un plateau de valeurs de résistivités plus importantes se forme dont la longueur varie selon l'espacement choisi. Pour  $M_{16}$ , ce plateau mesure 0.20 m alors que pour  $M_{64}$ , il est de 1.40 m. Des longueurs similaires à celles observées pour des variations de  $C_{v/f}$ . De plus, la diminution de l'ouverture a pour effet d'éliminer le plateau le plus résistif pour révéler un plateau avec des valeurs constantes et une longueur égale à l'espacement.

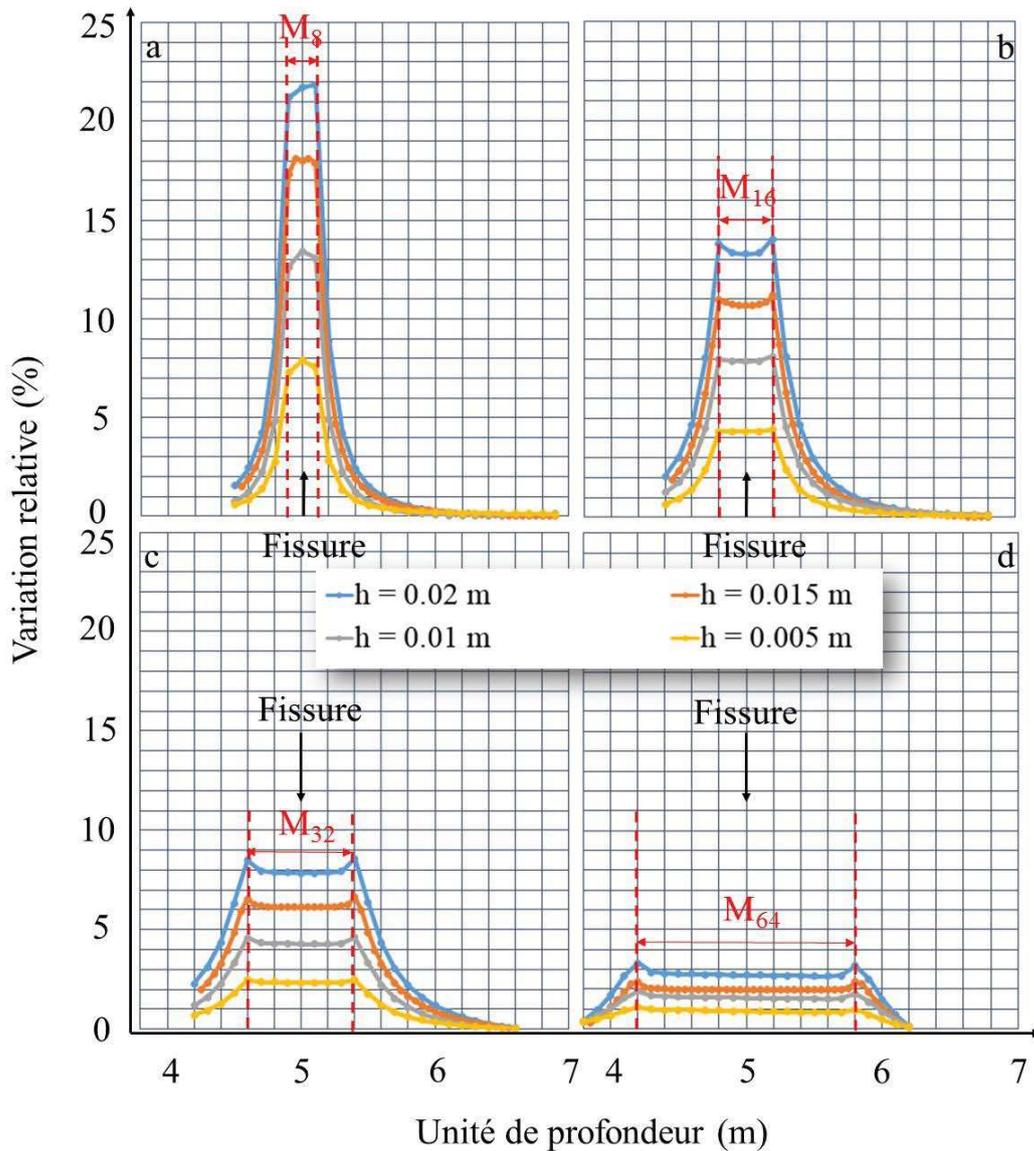


Figure 2-22 : Influence de l'ouverture de la fissure sur la réponse diagraphique pour l'espacement a.  $M_8$ , b.  $M_{16}$ , c.  $M_{32}$  et d.  $M_{64}$  ( $C_{v/m} = 2$  et  $C_{v/f} = 10$ )

### 2.3.2.4 Influence de l'extension L

L'extension est un autre paramètre géométrique intervenant dans le poids que possède la fissure dans le volume d'investigation. Dans les faits, une fissure de grande extension se marquera davantage qu'une fissure d'extension plus petite et de même ouverture. Le but de cette étude est d'analyser quelles sont les influences directes de l'extension sur la courbe en termes de forme et d'intensité. Pour cela, une discontinuité conductrice d'ouverture 0,02m et de contraste  $C_{v/f} =$

### 2.3 SENSIBILITÉ AUX PARAMÈTRES DE FISSURE

10 est modélisée dans un milieu où  $C_{v/m}$  est égal à 2. Le paramètre d'extension varie de l'état d'infinie i.e. la largeur du modèle (20m) jusqu'à 0.05 m.

La Figure 2-23 montre l'influence de l'extension pour l'espacement  $M_8$ . Pour une extension de fissure comprise entre 1.60 m et 20 m, la réponse diagraphique est la même. Les courbes se superposent. Ainsi, pour un espacement  $M_8$ , il existe une longueur limite latérale d'investigation comprise entre 0,8 et 1,6 m. En d'autres termes, au-delà ces valeurs (limite du volume d'investigation atteint), il n'est plus possible d'estimer la longueur réelle de la discontinuité.

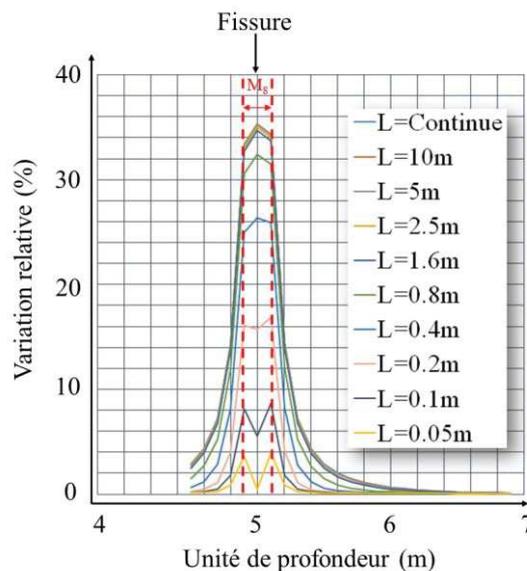


Figure 2-23 : Influence de l'extension L sur la réponse diagraphique pour l'espacement  $M_8$

En regardant les autres espacements, on s'aperçoit que cette limite est repoussée. Pour un espacement  $M_{16}$  (Figure 2-24), elle se trouve entre 1,6 m et 2,5 m, pour un espacement  $M_{32}$  et  $M_{64}$ , il s'agit de l'intervalle 2,5 m à 5 m. Cette observation montre bien que l'augmentation de l'espacement permet d'élargir le rayon d'investigation. Comme pour l'étude du  $C_{v/f}$  et  $h$ , l'allure de la courbe au droit de la fissure change selon l'extension. Pour des extensions importantes, les variations relatives sont similaires au droit de la fissure dessinant ainsi, un plateau de longueur égale à l'espacement. Ce dernier se creuse lorsque l'extension diminue donnant une valeur de variation relative faible bornée par deux valeurs maximales distantes de l'espacement. Si l'allure au droit de la fissure change, il en est de même pour l'amplitude. La diminution de la longueur de la fissure provoque une baisse de l'amplitude. Cette observation est également rencontrée dans la variation du paramètre d'ouverture et du contraste  $C_{v/f}$ .

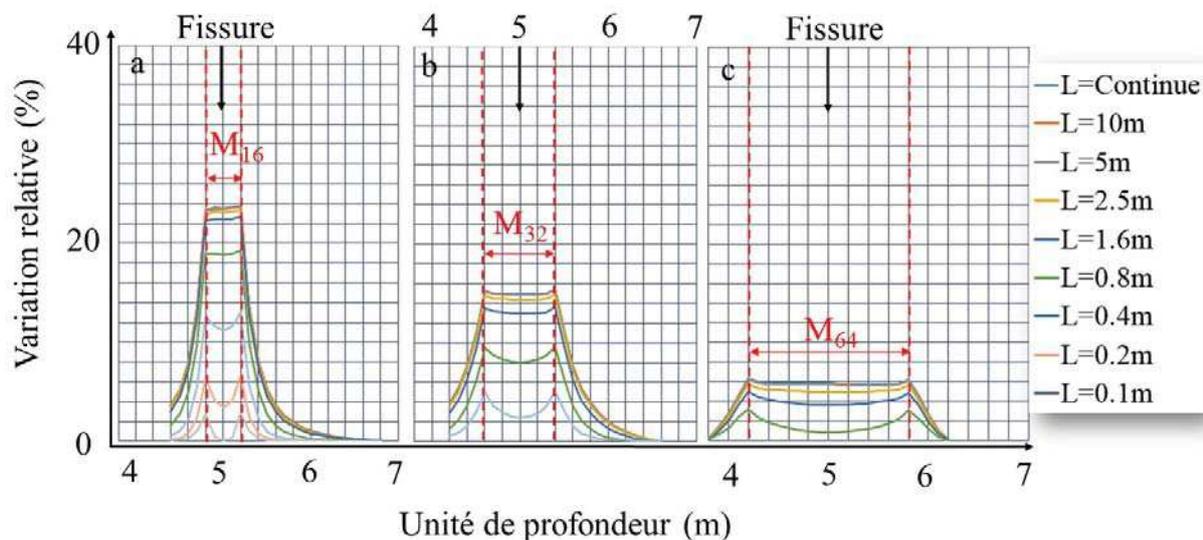


Figure 2-24 : Influence de l'extension L sur la réponse diagraphique pour : a.  $M_{16}$ , b.  $M_{32}$  et c.  $M_{64}$

### 2.3.2.5 Synthèse

Cette analyse de l'influence des paramètres de fissure (ouverture  $h$ , extension  $L$  et contraste de résistivité avec le matériau  $C_{v/f}$ ) sur la réponse diagraphique est une première étude descriptive prenant en compte, lors de la modélisation, la géométrie et la physique de la sonde et les effets de forage. Dans la réalité, une discontinuité est composée d'une alternance de zones de vides remplies d'un fluide interstitiel (zones conductrices) et de zones de contact (zones moins conductrices). Dans cette étude, on se base sur le concept d'une discontinuité idéale, de résistivité moyenne, et présentant des interfaces parallèles. Elle est un cas simplifié qui représente néanmoins les prémices de la signature de la discontinuité conductrice en fonction des paramètres de fissure choisis.

Dans ces modélisations, on s'aperçoit que l'influence des paramètres intervient dans l'amplitude et l'allure de la courbe au droit de la fissure. Lorsque le contraste  $C_{v/f}$ , l'ouverture et l'extension sont importants, la réponse est optimale offrant un pic au droit de la fissure avec une amplitude maximale. À partir de ce cas idéal, l'amplitude de la réponse diminue et l'allure de la courbe change. Au droit de la fissure et selon le poids de chaque paramètre, la réponse peut être en forme de pic, de plateau, ou de deux maximums et 1 minima pour l'espacement  $M_8$ . Pour des espacements qui augmentent, l'allure de la courbe traduira d'abord un plateau puis un creusement. Pour des paramètres trop faibles, la détection n'est pas possible comme c'est le cas

## 2.4 CARACTÉRISATION THÉORIQUE DE LA FISSURATION

pour le graphique montrant un  $C_{t/f}=2$ ,  $h=0,005$  m et une extension variable. En effet, il est considéré, en vue des investigations de terrain (cf. Chapitre 3), qu'en dessous de 2 %, la réponse peut être confondue avec du bruit. Dans cette étude, plusieurs courbes aux paramètres différents sont similaires. On entrevoit un problème récurrent et majeur en géophysique, la non-unicité. Une réponse de l'outil correspond à différentes configurations de paramètres de la discontinuité.

### 2.4 Caractérisation théorique de la fissuration

Le but de cette partie est de pouvoir caractériser théoriquement une fissure idéale et isolée en termes d'ouverture, de contraste électrique avec le matériau et d'extension à l'aide des résultats obtenus en modélisation. En partie 3, nous avons pu constater que le travail est traité en problème direct c'est-à-dire que pour un ensemble de paramètres choisi ( $h$ ,  $C_{t/f}$  et  $L$ ), une réponse diagraphique (variation relative au droit de la fissure) est obtenue grâce à une modélisation par la méthode des éléments finis. Nous proposons, dans cette partie, de caractériser une discontinuité idéale et isolée en problème inverse. Les variations relatives au droit de la discontinuité (valeurs mesurées sur le terrain) pour chaque espacement sont utilisées pour atteindre les paramètres  $h$ ,  $C_{t/f}$  et  $L$  correspondants. Nous présentons, en première étape, une analyse des réponses diagraphiques en fonction de leur extension et leur espacement définissant de premiers domaines d'extension. En étapes 2 et 3, le but est d'affiner la réponse préliminaire en étape 1. L'étape 2 fait une mise en commun des résultats des modélisations et développe une équation pour chaque espacement par régression multiple non linéaire. Chaque équation a pour variable dépendante la variation relative au droit de la fissure et pour variables indépendantes les trois paramètres recherchés : l'ouverture ( $h$ ), le contraste de résistivité entre le matériau et la discontinuité ( $C_{t/f}$ ) et l'extension ( $L$ ). Cette étape 2 est ensuite intégrée dans l'étape 3. Cette dernière fait appel à la méthode de recuit simulé et se veut être complémentaire à la première pour une estimation plus précise des paramètres de fissure recherchés.

#### 2.4.1 Étape 1 : Analyses préliminaires

L'analyse des résultats issus de la modélisation conditionne une première estimation de domaines de solutions de l'extension de la fissure. La Figure 2-25 permet d'introduire notre raisonnement.

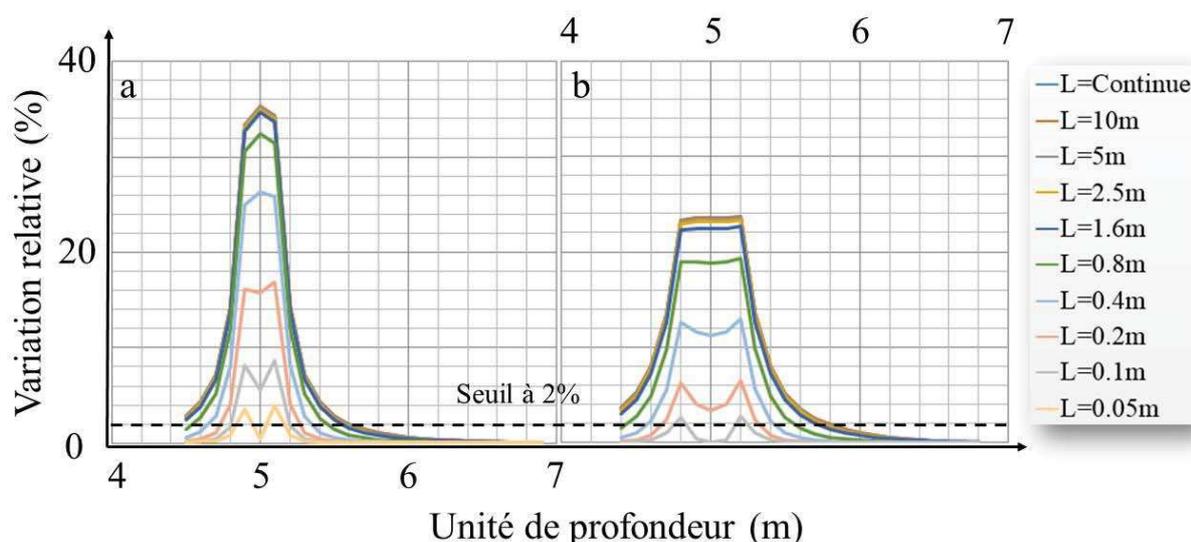


Figure 2-25 : Analyse d'une discontinuité d'ouverture  $h = 0.02\text{m}$ , de  $C_{vf} = 20$  et d'extension variable pour les espacements a.  $M_8$  et b.  $M_{16}$

Le raisonnement s'établit sur l'analyse des extensions en fonction des espacements. Nous prenons à titre d'exemple le cas d'une fissure idéale, isolée aux caractéristiques remarquables c'est-à-dire une ouverture de  $0.02\text{m}$  et un contraste  $C_{vf}$  de  $20$ ; ceci dans un souci d'intégrer toutes les gammes d'extension  $[0.10;20]$  dans notre raisonnement. Ainsi, dans cette représentation, les variations relatives supérieures à  $2\%$  en  $M_8$  sont visibles à partir d'une extension de fissure égale à  $0.10\text{m}$  alors qu'en  $M_{16}$ , elles le sont qu'à partir de  $0.20\text{m}$ . Ces deux observations, lorsqu'il existe une variation relative de  $2\%$  seulement sur  $M_8$ , déterminent une extension de la fissure comprise en  $0.10\text{m}$  et  $0.20\text{m}$  non inclus. L'idée est de raisonner sur l'ensemble d'informations apporté ou non par les différents espacements. Le seuil fixe de  $2\%$  est une valeur déterminée in situ, lors de la répétabilité des mesures dans un même forage avec les mêmes conditions. Ce seuil n'est pas une valeur de référence. Il peut varier selon le type d'ouvrage étudié et pourrait être plus important dans le cas de mauvaises conditions de mesure. De nombreuses modélisations sont effectuées faisant varier l'ouverture  $h$   $[0.005;0.02]$ ,  $Ct/f$   $[2;20]$  et  $L$   $[0.10;20]$  d'une discontinuité idéale et isolée. Sur la base des réponses diagraphiques et du raisonnement présenté, une première caractérisation de la discontinuité est établie (Figure 2-26).

## 2.4 CARACTÉRISATION THÉORIQUE DE LA FISSURATION

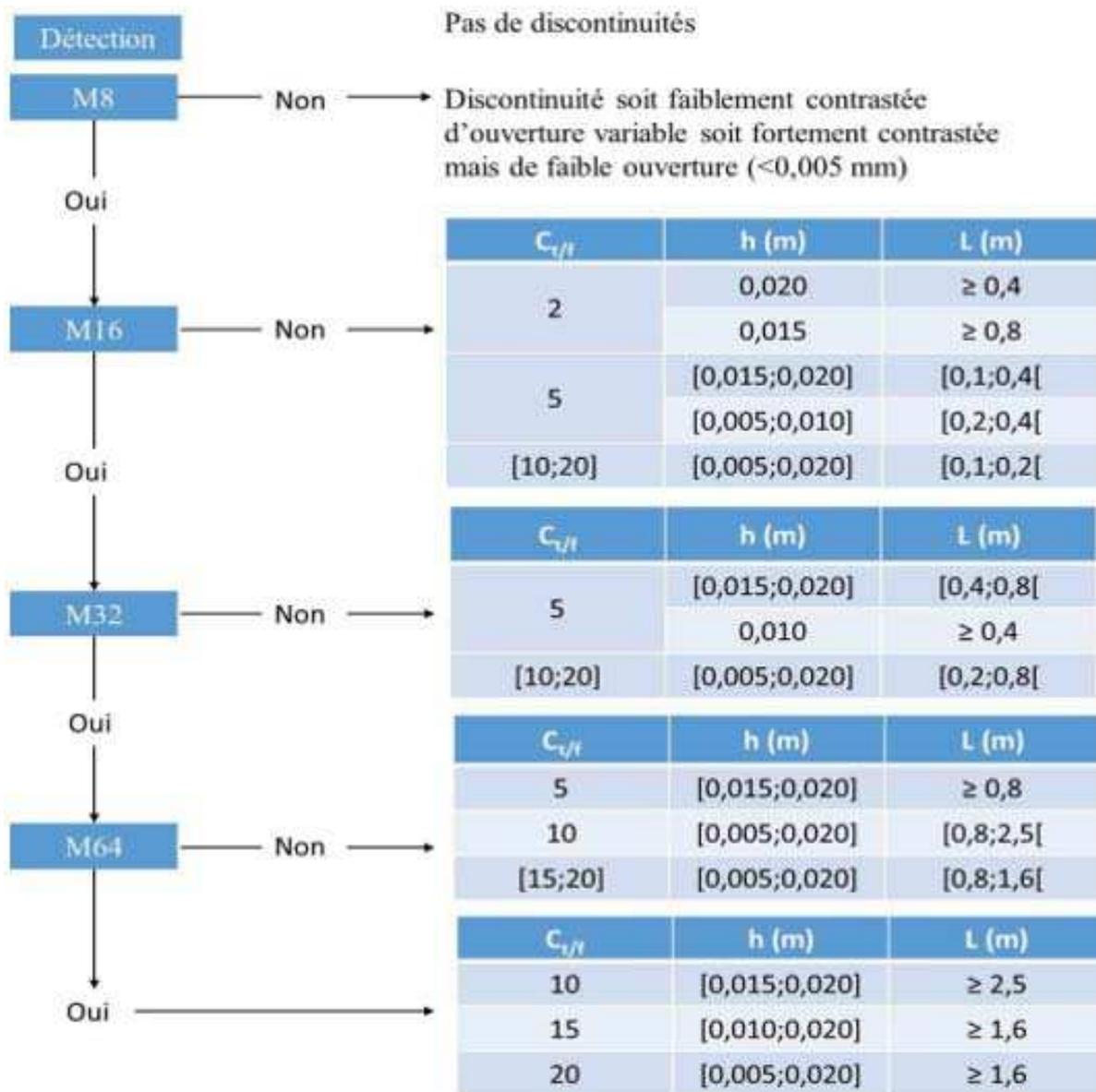


Figure 2-26 : Analyse incrémentale des paramètres de discontinuité en fonction de la détection par espacement sur la base des cas modélisés

Dans le cas où l'observation porte sur un seul espacement, le nombre de solutions est important et plusieurs conclusions peuvent être tirées. Pour des contrastes de 2, seules des fissures d'ouvertures comprises entre 0.015m et 0.020m peuvent être détectées par l'outil avec des extensions respectivement supérieures à 0.8m et 0.4m. Pour des contrastes supérieurs à 5, l'extension d'une fissure isolée ne dépasse pas 0.4m. Pour des contrastes plus forts (>10), l'extension maximale est de 0.20m.

## CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DIAGRAPHIQUE

Lorsque la détection s'effectue sur  $M_8$  et  $M_{16}$ , des contrastes de discontinuité supérieurs à 5, donne une extension maximale de 0.80m. Selon le contraste, l'extension minimale varie entre 0.20m et 0.40m. Les fissures dont le contraste est inférieur à 5 ne peuvent pas être détectées.

Les variations relatives supérieures à 2 se manifestant sur trois espacements  $M_8$ ,  $M_{16}$  et  $M_{32}$  sont associées à des discontinuités d'extension plus importantes. Pour des contrastes supérieurs à 5, l'extension minimale est de 0.8m. Les fissures dont les contrastes sont de 5 possèdent une ouverture comprise entre 0.015m et 0.020m. Tout comme les fissures de contraste de 2, les fissures d'ouverture inférieures à 0.015m et de contraste de 5 ne sont pas détectées. Des fissures dont le contraste varie entre 10 et 20, ont une extension maximale qui oscille entre 1.6m et 2.5m.

Lorsque les variations relatives sont observables sur les quatre espacements, la fissure est considérée comme conséquente en termes de contraste et d'extension. L'extension minimale est portée à 2.5m pour des contrastes égaux à 10 et à 1.6m pour des contrastes strictement supérieurs à 10.

L'observation approfondie réalisée sur les données de modélisation montre que pour un couple de  $C_{vf}$  et  $h$ , une gamme d'extensions  $y$  est associée. Des variations relatives observées sur quatre espacements conditionnent une fissure bien représentée dans différents volumes d'investigation.

Lors de l'observation des données, on a pu se rendre compte qu'à partir d'une certaine valeur d'extension de fissure pour une ouverture, un contraste et un espacement donnés, les fissures possèdent la même réponse. Cette observation est directement reliée au volume d'investigation de la sonde. Une fissure avec un  $C_{vf}$  de 20, une ouverture égale à 0.02m possède une extension supérieure à 1.6m (Figure 2-26). Puisqu'il n'existe pas d'espacement supplémentaire plus important, il n'est pas possible d'obtenir une gamme d'extensions. Ainsi, pour cet exemple, à partir d'une extension de 2m, la fissure apporte la même information qu'une fissure dont l'extension est de 20m. Les limites du volume d'investigation correspondent à l'extension minimale de la fissure que l'on peut caractériser. Ces limites sont difficiles à fixer, car elles dépendent de l'espacement choisi, du matériau testé et du volume d'eau de forage pris en compte.

La détermination de l'extension par palier apporte une large estimation des paramètres de la discontinuité. Cependant, ces conclusions permettent de distinguer des discontinuités d'extension :

## 2.4 CARACTÉRISATION THÉORIQUE DE LA FISSURATION

- (1) centimétriques à pluricentimétriques pouvant être liées à la réalisation du forage
- (2) décimétrique à pluridécimétrique représentant une anomalie très locale
- (3) métrique à plurimétriques impactant probablement l'ouvrage entier

### 2.4.2 Étape 2 : Régression multiple non linéaire

L'outil de régression multiple non linéaire est fourni par le logiciel de statistique de Microsoft Excel, XLStat. Cette méthode est utilisée pour établir des relations entre la réponse de l'outil face à une discontinuité idéale et isolée (variation relative) et les paramètres de la discontinuité ( $h$ ,  $Ct/f$  et  $L$ ). Il nous faut pour cela, choisir la forme du polynôme définissant au mieux les données de modélisation et nous appuyer sur une analyse des coefficients d'ajustement. Ensuite, une étude de la contribution des variables est apportée pour comprendre le modèle sélectionné. Cette section présente l'étude détaillée du modèle pour l'espacement  $M_8$  et un résumé des résultats des autres espacements. En annexe 2.A, on pourra trouver le détail des études des modèles pour les espacements  $M_{16}$ ,  $M_{32}$  et  $M_{64}$ .

#### 2.4.2.1 Notions générales

La régression multiple est une procédure d'ajustement générale qui permet de déterminer une relation entre une variable dépendante (ou variable modélisée,  $Y$ ) et une ou plusieurs variables indépendantes ( $X_i$ ). Ces régressions peuvent être linéaires ou pas. XLStat estime les paramètres du modèle (algorithme de Levenberg - Marquardt) selon des critères optimaux par la méthode des moindres carrés. Ainsi, une équation de régression est calculée afin de s'ajuster aux données issues des modélisations de sorte que les écarts au carré entre les points modélisés ( $Y$ ) et la moyenne des valeurs de la variable dépendante ( $\bar{Y}$ ) soient minimisés (Éq 2-11).

$$\text{Écart total} = (Y - \bar{Y}) \quad \text{Éq 2-11}$$

Pour déterminer la pertinence de l'équation de régression sur les données de modélisations, il est important d'effectuer une analyse des résidus. Les résidus sont les écarts entre les points modélisés ( $Y$ ) et les points estimés ( $\hat{Y}$ ) (Éq 2-12).

$$\text{Résidu} = (Y - \hat{Y}) \quad \text{Éq 2-12}$$

Ainsi, l'écart total équivaut (Éq 2-13) :

$$(Y - \bar{Y}) = (\hat{Y} - \bar{Y}) + (Y - \hat{Y}) \quad \text{Éq 2-13}$$

## CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DIAGRAPHIQUE

$$\text{Écart total} = \text{Écart expliqué} + \text{Écart inexpliqué (Résidu)}$$

Aussi simpliste qu'il puisse paraître, le diagnostic graphique est un outil puissant pour valider une régression. Il convient également de considérer des coefficients d'ajustement comme la somme des carrés des résidus SCR (ou variation inexpliquée ou variation résiduelle, Éq 2-14), la somme des carrés des écarts des valeurs estimées du modèle (ou variation expliquée, Éq 2-15, la somme totale des carrés des écarts des valeurs observées (ou variation totale, Éq 2-16) et le coefficient de détermination  $R^2$  (Éq 2-17).

$$\text{Variation résiduelle} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad \text{Éq 2-14}$$

Cette quantité indique la variation résiduelle des valeurs observées par rapport aux valeurs estimées du modèle, soit, la variation des valeurs observées qui n'est pas expliquée par le modèle.

$$\text{Variation expliquée} = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2 \quad \text{Éq 2-15}$$

Cette quantité indique la variation des valeurs estimées de la variable réponse du modèle par rapport à sa moyenne, soit, la variation des valeurs estimées de la variable réponse expliquée par le modèle.

$$\text{Variation totale} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2 \quad \text{Éq 2-16}$$

Cette quantité indique la variation totale des valeurs observées par rapport à la moyenne.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad \text{Éq 2-17}$$

Le coefficient de détermination est défini par le rapport entre la variation des données modélisées et la variation des données obtenues par l'équation de régression.  $R^2$  est compris entre 0 et 1. Si le coefficient de détermination est proche de 1, le modèle estimé s'ajuste très bien aux données modélisées. À l'inverse, si  $R^2$  est proche de 0, les variables indépendantes choisies ne contiennent pas d'information utile pour expliquer la variable dépendante.

## 2.4 CARACTÉRISATION THÉORIQUE DE LA FISSURATION

### 2.4.2.2 Choix du modèle

La variation relative au droit de la fissure ( $V_r$ ) est prise comme la variable dépendante ( $Y$ ). Comme son nom l'indique, elle dépend de plusieurs variables indépendantes que l'on nomme variables quantitatives explicatives. Ici, elles sont représentées par les paramètres de fissure : l'ouverture  $h$ , le contraste de résistivité entre la fissure et le matériau  $C_{vf}$  et l'extension  $L$ . Alors que le choix d'une régression multiple s'impose, la question de la linéarité ou non se pose. Le choix de la linéarité ou de la non-linéarité s'explique par un examen du comportement de la variable dépendante en fonction d'une des variables indépendantes (les deux autres restent fixes). Si pour toutes les variables testées, le nuage se concentre autour d'une droite alors la linéarité est avérée et le choix de la régression multiple linéaire est justifié. Dans notre cas, le système est bien trop complexe pour choisir un modèle linéaire. La régression entre paramètres 2 à 2 n'est déjà pas linéaire (Figure 2-27). Nous préférons ainsi, choisir la méthode de régression multiple non linéaire.

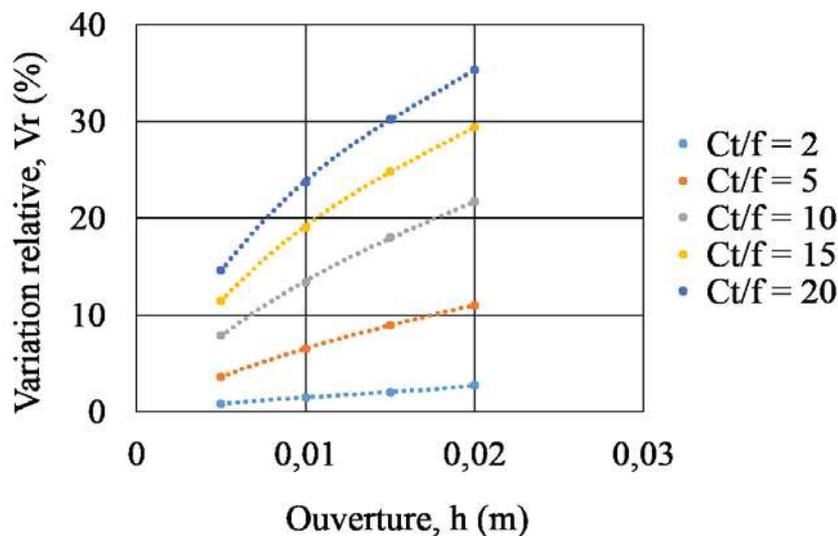


Figure 2-27 : Variation relative en fonction de l'ouverture pour différents  $C_{vf}$  pour  $M_8$

La méthode étant choisie, il faut sélectionner la fonction mathématique pertinente traduisant au mieux les données de modélisation. La fonction régissant le modèle n'est pas connue. Ainsi, une fonction préprogrammée de forme polynomiale du logiciel est choisie et s'écrit de la manière suivante :

$$Y = pr1 + pr2 * X_1 + pr3 * X_2 + pr4 * X_3 + pr5 * X_1^2 + pr6 * X_2^2 + pr7 * X_3^2 + pr8 * X_1^3 + pr9 * X_2^3 + pr10 * X_3^3 + pr11 * X_1^4 + pr12 * X_2^4 + pr13 * X_3^4$$

## CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DIAGRAPHIQUE

Y représente la variation relative et  $X_1$ ,  $X_2$  et  $X_3$  sont les paramètres de la fissure. La définition précise de chaque variable sera indiquée plus loin dans cette section.

La variable dépendante  $V_r$  ou  $\log(V_r)$  est en fonction des variables indépendantes  $C_{t/f}$  ou  $\log(C_{t/f})$ ,  $L$  ou  $\log(L)$  et  $h$  ou  $\log(h)$ . Le Tableau 2-6 permet d'apprécier les coefficients de détermination de plusieurs modèles dont la configuration des variables indépendantes change.

Variable dépendante	Modèles	Configurations des variables indépendantes	Coefficients de détermination
$V_r$	1	$C_{t/f}; L; h$	0,8377
	2	$\log C_{t/f}; L; h$	0,8377
	3	$C_{t/f}; \log L; h$	0,8984
	4	$C_{t/f}; L; \log h$	0,8377
	5	$\log C_{t/f}; \log L; h$	0,8984
	6	$\log C_{t/f}; L; \log h$	0,8377
	7	$C_{t/f}; \log L; \log h$	0,8984
	8	$\log C_{t/f}; \log L; \log h$	0,8984
$\log V_r$	9	$C_{t/f}; L; h$	0,8792
	10	$\log C_{t/f}; L; h$	0,8792
	11	$C_{t/f}; \log L; h$	0,9920
	12	$C_{t/f}; L; \log h$	0,8792
	13	$\log C_{t/f}; \log L; h$	0,9920
	14	$\log C_{t/f}; L; \log h$	0,8792
	15	$C_{t/f}; \log L; \log h$	0,9920
	16	$\log C_{t/f}; \log L; \log h$	0,9920

Tableau 2-6 : Coefficients de détermination pour 16 modèles

On remarque qu'il existe 4 familles de modèles ayant le même coefficient de détermination :

- Modèle 1, 2, 4 et 6 avec un coefficient de détermination de 0.8377
- Modèle 3, 5, 7 et 8 avec un coefficient de détermination de 0.8984
- Modèle 9, 10, 12 et 14 avec un coefficient de détermination de 0.8792
- **Modèle 11, 13, 15 et 16 avec un coefficient de détermination de 0.9920**

La dernière famille semble être le type de modèle qui s'ajuste à la plage de données obtenues par modélisation. On s'aperçoit que les coefficients de détermination sont les plus faibles lorsque l'extension  $L$  est portée en  $\log$ . Ceci est d'autant plus vrai lorsque  $V_r$  est lui-même porté en  $\log$ .

## 2.4 CARACTÉRISATION THÉORIQUE DE LA FISSURATION

La Figure 2-28 est une représentation plus explicite du Tableau 2-6 en portant les variations relatives issues des modélisations en fonction des variations relatives calculées par les différents modèles.

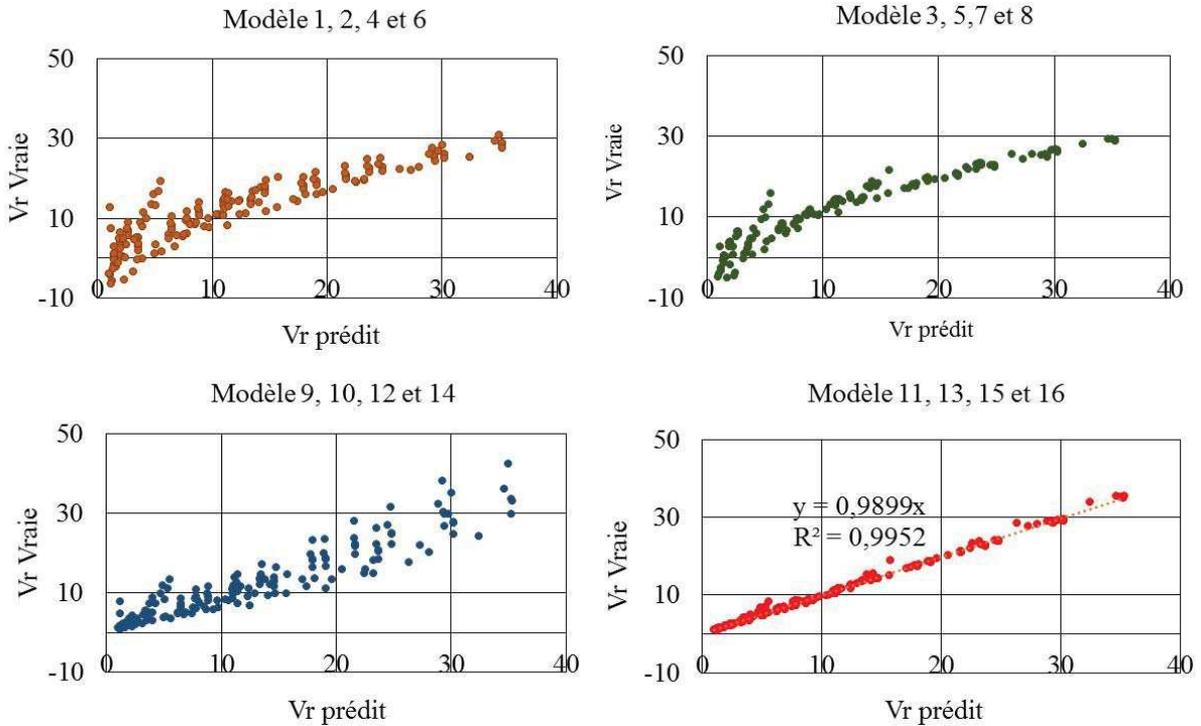


Figure 2-28 : Variations relatives observées en fonction des variations relatives prédites par les différents modèles pour l'espacement  $M_8$

Malgré de bons coefficients de détermination, graphiquement, les modèles de 1 à 10, 12 et 14 ne s'ajustent pas correctement à l'équation de régression. Par contre, les modèles 11, 13, 15 et 16, possédant le plus fort coefficient de détermination, donnent des variations relatives semblables à celles issues de la modélisation. Le choix du modèle se portera sur un des quatre présentés. Dans un but pratique, le modèle 11, où seul  $V_r$  et  $L$  sont en log, est choisi avec un coefficient de détermination égal à 0.9920 et une SCR égale à 0.240. Par conséquent, pour  $M_8$ , nous choisissons l'équation de régression suivante (Éq 2-18) :

$$\begin{aligned}
 \text{Log}(V_r) = & -1,1558 + 7,7506\text{E-}02 * \text{Log}(L) + 0,5000 * C_{vf} + 91,1550 * h \\
 & - 0,23034 * \text{Log}(L)^2 - 5,6422\text{E-}02 * C_{vf}^2 - 4378,2866 * h^2 + 0,2343 * \\
 & \text{Log}(L)^3 + 2,9174\text{E-}03 * C_{vf}^3 + 84594,6442 * h^3 - 7,6190\text{E-}02 * \text{Log}(L)^4 \\
 & - 5,5140\text{E-}05 * C_{vf}^4
 \end{aligned}
 \tag{Éq 2-18}$$

## CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DIAGRAPHIQUE

Pour les autres espacements, la même étude est appliquée et les résultats sont référés en annexe 2.A. Dans le Tableau 2-7 sont représentées les équations de régression traduisant les données de modélisation de chaque espacement avec leur coefficient de détermination.

Espacements	Équations de régression	Coefficient de détermination
M16	$\text{Log}(Vr) = -1,6644 + 0,2217 * \text{Log}(L) + 0,5236 * C_{vf} + 110,2567 * h - 0,5398 * \text{Log}(L)^2 - 5,7700E-02 * C_{vf}^2 - 5387,9968 * h^2 + 0,5751 * \text{Log}(L)^3 + 2,9474E-03 * C_{vf}^3 + 102561,0224 * h^3 - 0,2099 * \text{Log}(L)^4 - 5,5326E-05 * C_{vf}^4$	0,9926
M32	$\text{Log}(Vr) = -1,2573 + 0,6798 * \text{Log}(L) + 0,1896 * C_{vf} + 110,7923 * h - 1,3629 * \text{Log}(L)^2 - 1,0032E-02 * C_{vf}^2 - 5331,5353 * h^2 + 1,2164 * \text{Log}(L)^3 + 2,0050E-04 * C_{vf}^3 + 102849,0025 * h^3 - 0,3920 * \text{Log}(L)^4$	0,9925
M64	$\text{Log}(Vr) = -1,1171 + 0,8410 * \text{Log}(L) + 5,1452E-02 * C_{vf} + 86,1658 * h - 0,5233 * \text{Log}(L)^2 - 6,8136E-04 * C_{vf}^2 - 3917,9037 * h^2 - 0,1001 * \text{Log}(L)^3 + 79482,9918 * h^3 + 0,1113 * \text{Log}(L)^4$	0,9404

Tableau 2-7 : Équation de régression et coefficient de détermination pour chaque espacement

### 2.4.2.3 Calcul d'erreur

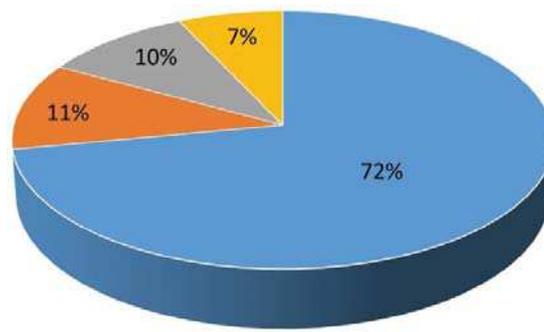
On effectue un calcul d'erreur permettant de cibler les différentes configurations de la discontinuité (h, L et  $C_{vf}$ ) dont l'équation de régression s'éloigne des données de modélisation. Cette erreur se calcule de la manière suivante (Éq 2-19) :

$$E (\%) = \frac{Vr \text{ vraie} - Vr \text{ prédit}}{Vr \text{ vraie}} * 100 \quad \text{Éq 2-19}$$

Où  $Vr_{\text{vraie}}$  est la variation relative issue des modélisations et  $Vr_{\text{prédit}}$  est la variation relative calculée par les équations développées. Cette erreur est calculée pour chaque configuration de la discontinuité. Pour les résultats liés à l'équation développée sur M8 (Éq 2-18), on remarque que sur l'ensemble des configurations (Figure 2-29):

- 72% des données estimées ont une erreur entre 0% et 5% sur les données vraies
- 11 % ont une erreur entre 5% et 10%.
- 10 % ont une erreur entre 10% et 20%.
- 7% ont une erreur de plus de 20%

## 2.4 CARACTÉRISATION THÉORIQUE DE LA FISSURATION



Pourcentage d'erreur entre les données modélisées et les données estimées

■ 0% et 5%   ■ 5% et 10%  
■ 10% et 20%   ■ 20% et plus

Figure 2-29 : Distribution de l'ensemble des configurations pour l'espace M8

Si cette représentation graphique donne une idée de la pertinence de l'équation de régression à retrouver les données de modélisation, elle ne permet pas d'identifier quelles configurations de fissure ne suivent pas la courbe de régression. En effectuant une observation détaillée, on s'aperçoit que :

- 20% et plus (7% des configurations) représentent les configurations où les discontinuités ont l'extension la plus petite. Généralement, l'extension oscille entre 0.05m et 0.1m. Par exemple pour une configuration où  $C/f = 15$ ,  $h=0.02m$  et l'extension est la plus petite i.e. 0.1m, l'erreur est portée à 21%. On remarque également que pour de très faibles contrastes et d'ouvertures ( $Ct/f=2$  et  $h=0.005m/0.01m$ ), le pourcentage d'erreur se révèle être supérieur à 20% pour des extensions comprises 0.8m et 1.6m.
- 10% et 20% est un écart entre lesquels on retrouve principalement deux familles de configuration : (1)  $C_{vf} = 2$ ,  $h = 0.01m$ , L variable et (2)  $C_{vf} = 5$ ,  $h = 0.005m$ , L variable. D'autres configurations retrouvées ont des  $C_{vf}$  entre 10 et 20, l'ouverture est variable, mais l'extension est toujours petite,  $L=0.1m$ .
- 5% et 10% sont des configurations où le  $C_{vf}$  est faible, l'ouverture est comprise entre 0.015m et 0.020m et des extensions variables allant jusqu'à un état infini de la fissure. Pour les contrastes compris entre 10 et 20, l'erreur est comprise entre 5% et 10% lorsque l'extension est comprise entre 0.1m et 0.2m et l'ouverture est variable.

## CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DIAGRAPHIQUE

- 0% et 10% représentent pour les faibles contrastes (2 et 5), les configurations où  $h$  et  $L$  sont les plus importants. Pour les forts contrastes, l'équation s'ajuste parfaitement pour tous types d'ouvertures du moment que l'extension soit supérieure à 0.1m.

Grâce à cette analyse détaillée, on s'aperçoit que le pourcentage d'erreur est tributaire de la représentation de la fissure dans le volume d'investigation. En outre, pour des fissures de faibles contrastes (2 et 5), l'équation s'ajuste difficilement sauf pour les cas où ces deux paramètres compensent ce faible contraste.

Dans le cas des autres espacements, la Figure 2-30 est un résumé des résultats obtenus. Elle montre, tout comme l'espacement M8, la distribution de l'ensemble des configurations de fissure en fonction du pourcentage d'erreur entre les données de modélisation et les données estimées.

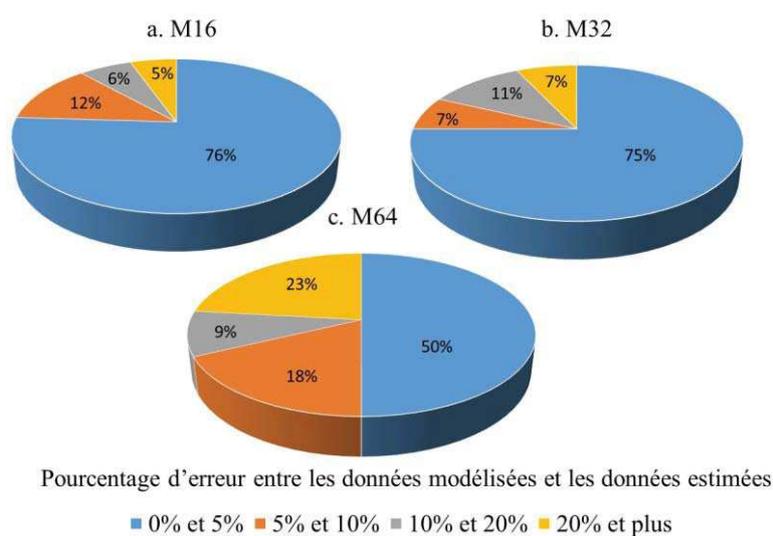


Figure 2-30 : Distribution de l'ensemble des configurations pour a. M<sub>16</sub>, b. M<sub>32</sub> et c. M<sub>64</sub>

Les résultats pour M<sub>16</sub> et M<sub>32</sub> sont similaires à ceux trouvés en M<sub>8</sub>. Cependant, cette représentation révèle que l'équation développée pour M<sub>64</sub> fournit seulement 50% de données calculées par l'équation avec une erreur de 0-5% sur les données vraies. De plus, 23% des données estimées possèdent plus de 20% d'erreur. Dans tous les cas, les configurations où les discontinuités ont des ouvertures de 0.005m sont représentatives de l'erreur. On peut également citer, des configurations où les discontinuités ont une ouverture moyenne, mais des contrastes et des extensions faibles par rapport au volume d'investigation engagé.

## 2.4 CARACTÉRISATION THÉORIQUE DE LA FISSURATION

Ainsi, les équations développées traduisent difficilement les discontinuités faiblement représentées dans les volumes d'investigation. C'est notamment le cas pour l'espacement  $M_{64}$ . Pour les espacements  $M_8$ ,  $M_{16}$  et  $M_{32}$ , on notera également que pour des ouvertures et des contrastes compris dans les gammes modélisées, ce sont les discontinuités d'extension pluri centimétriques comprises entre 0.1 et 0.2m qui présentent des variations relatives éloignées de valeurs estimées par les équations développées.

### 2.4.2.4 Contribution des variables de l'équation

Cette partie s'intéresse à quantifier la sensibilité de la variable Y en fonction de la variation des variables explicatives. La contribution d'une variable  $X_i$  ( $C_{X_i}$ , %) est définie comme suit : (Éq 2-20).

$$C_{X_i} = 100 * \frac{\left( \frac{\partial Y^2}{\partial X_i} \cdot Var(X_i) \right)}{Var(Y)} \quad \text{Éq 2-20}$$

$$\text{Où : } Var(Y) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial Y^2}{\partial X_i} \cdot Var(X_i) \text{ et } \frac{Var(X_i)}{Var(Y)} = \text{constant}$$

Les résultats des données sont résumés dans le Tableau 2-8. Ils montrent la contribution des variables pour chaque configuration de la discontinuité (Log(L), h et  $C_{t/f}$ ).

Ct/f	h	L	Contribution des variables
≤ 5	[0,005;0,02]	[0,1;0,2] ]0,2;20]	99% : Log (L) 99% : $C_{t/f}$
>5	[0,005;0,02]	[0,1;0,4]	70-99% : Log (L)
[10;15]	<0,01	]0,4;20]	55-80% : $C_{t/f}$ 20%-45% : h
	≥ 0,01		30% : $C_{t/f}$ 70% : h
20	<0,015	]0,4;20]	65% : $C_{t/f}$ 35% : h
	≥ 0,015		20-40% : $C_{t/f}$ 60-80% : h

Tableau 2-8 : Contribution des variables en fonction des configurations de la discontinuité pour l'espacement  $M_8$

## CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DIAGRAPHIQUE

Dans ce résumé, certaines variables explicatives possèdent des contributions élevées atteignant 99%. Ces valeurs signifient que les variations relatives sont très sensibles à ces variables. Ceci montre d'ores et déjà que pour une valeur de variation relative donnée, le schéma inverse sera difficile. Plus une variable est contributive plus il sera difficile de déterminer les autres lors de l'inversion. La variable  $\log(L)$  contribue entre 70% et 99% à la variation relative pour toutes discontinuités dont l'extension est pluricentimétrique. Dans ce cas-ci, le contraste et l'ouverture seront difficiles à déterminer. Ceci sera d'autant plus vrai pour des extensions de 0.1m où la contribution de  $\log(L)$  atteint 99%. Lorsque les discontinuités ont une extension pluridécimétrique, la variable  $C_{vf}$  et/ou la variable  $h$  sont les plus contributives. Dans le cas où, par exemple  $C_{vf}$  atteint entre 80-99%, l'extension et l'ouverture seront difficilement perceptibles. Lorsque  $C_{vf}$  partage la contribution avec  $h$  alors seule l'estimation de l'extension sera délicate. Ainsi, les variables  $h$ ,  $\log(L)$  et  $C_{vf}$  semblent contribuer chacune leur tour à la sensibilité de  $V_r$ , en fonction de la configuration de la discontinuité freinant la détermination d'un ou des deux autres paramètres.

### 2.4.3 Étape 3 : Recuit simulé

Cette section développe un raisonnement autour d'une méthode appelée le recuit simulé. Elle se veut apporter plus de précision sur l'estimation des paramètres recherchés c'est-à-dire une étape complémentaire au travail d'observation faite lors de l'étape 1. Cette partie décrit essentiellement l'application du processus de recuit simulé sur les données issues de la modélisation. Les résultats et une discussion de cette méthode sont réalisés en fin de partie.

#### 2.4.3.1 Généralités

Le recuit simulé est une méthode empirique inspirée d'un processus utilisée en métallurgie et découle d'expériences thermodynamiques réalisées par Metropolis dans les années 50. Elle consiste à refroidir le métal en fusion par paliers de température successifs de façon telle à lui assurer une structure sans défaut. En effet, une baisse brutale de la température produit une structure amorphe (verre). On a alors un minimum local d'énergie. Par contre, une baisse progressive de la température permet d'atteindre le minimum global d'énergie et d'obtenir une structure cristalline. Cette méthode est transposée en optimisation en imitant le processus de refroidissement du métal [Kirkpatrick *et al.*, 1983; Cerny, 1985]. Il s'agit de déterminer le minimum global de la fonction pouvant posséder plusieurs minimums locaux ().

## 2.4 CARACTÉRISATION THÉORIQUE DE LA FISSURATION

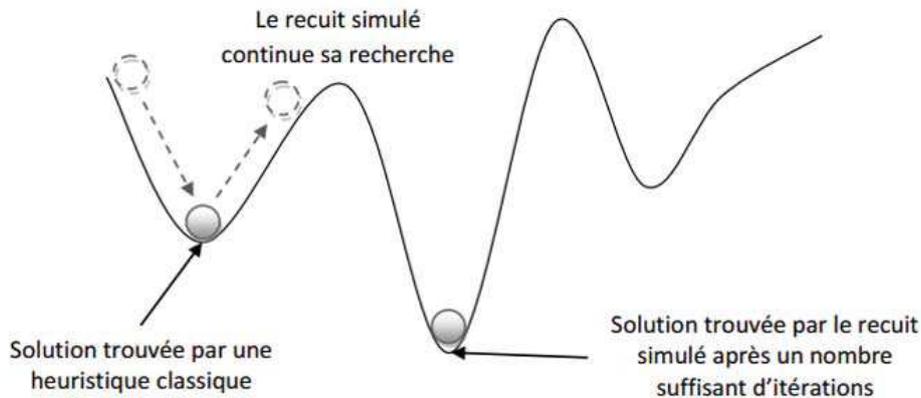


Figure 2-31 : Comparaison entre un minimum local et un minimum global

Dans notre situation, nous intégrons dans un programme sous Visual basic Excel, les équations développées en étape 2. Nous générons un certain nombre de modèles avec deux paramètres de fissures fixes et un autre variant de façon aléatoire afin de pouvoir couvrir l'ensemble des possibilités. On essaie de trouver la meilleure solution en minimisant l'écart entre les données observées (correspondant aux données obtenues en modélisation) et les prédictions obtenues par les équations développées en étape 2. Les fonctions n'étant pas monotones, le processus vise à trouver un minimum global de la fonction et de s'affranchir des minimums locaux. Pour comprendre l'application directe à notre problématique les étapes clés sont présentées dans la suite et des captures d'écran associées sont référées en annexe 2.B.

- (1) Définir les domaines de variation des paramètres de discontinuité et une échelle de "température" tendant vers 0. Selon le nombre de niveaux d'observation pris en compte, le domaine de variation va être conditionné suite aux observations faites précédemment (cf. § 2.2.4.1). Par exemple, pour des variations relatives observées sur trois espacements, le Figure 2-26 montre que  $Ct/f = [5;20]$ ,  $h = [0.005;0.02]$  et  $L = [0.8;2.5]$  ou  $\text{Log } L \sim [-0.097;0.40]$ . Ces valeurs sont les domaines de variations des paramètres lorsque le niveau d'observation est porté à 3. On note **bmax (i)/bmin (i)** les valeurs des frontières du domaine de variation des paramètres de fissure et **dm (i)** le degré de liberté de chaque paramètre (cf. Annexe 2.B : Capture d'écran du paramétrage initial du programme).

## CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DIAGRAPHIQUE

- (2) Générer un modèle aléatoire (**md**) (h, C<sub>t/f</sub> et Log L) compris dans les domaines de variations et calculer l'erreur (**Calerreur (0)**). Le calcul du modèle choisi est une étape qui permet de déterminer aléatoirement un ensemble de paramètres (C<sub>t/f</sub>, h et Log L) qui sera intégré dans la suite du programme. On note **md (i)** le paramètre (i) choisi (cf. Annexe 2.B : Capture d'écran du modèle initial choisi). Ensuite, on calcule les variations relatives en fonction du modèle aléatoirement choisi (**md**) et l'erreur par rapport aux valeurs mesurées (**Calerreur (0)**). Ainsi, on introduit les équations obtenues par la régression multiple non linéaire selon le niveau d'observation. Par exemple lorsque l'on observe des variations relatives sur les trois premiers espacements, on introduit trois équations. Le calcul de chaque équation donne une variation relative que l'on nomme obscal(1) pour M<sub>8</sub>, obscal(2) pour M<sub>16</sub> et obscal(3) pour M<sub>32</sub>. Les variations relatives calculées (obsal (i)) sont comparées avec les variations relatives obtenues avec la modélisation (obs (i)). Un calcul d'erreur est effectué par l'équation Éq 2-21 :

$$Calerreur = \sqrt{\sum_{i=3}^n (obsal(i) - obs(i))^2} \quad \text{Éq 2-21}$$

- (3) Générer un nouveau modèle (**mdnew**) créé à partir du modèle initial et calculer l'erreur (**Calerreur (1)**). Parmi l'ensemble des paramètres de fissure, une seule est aléatoirement modifiée de + ou – dm pour créer un nouveau modèle de paramètres (Cf. Annexe 2.B : Capture d'écran du sous-programme engendrant un nouveau modèle). On recalcule ensuite les valeurs en fonction du nouveau modèle (**mdnew**) et l'erreur par rapport aux valeurs mesurées (**Calerreur (1)**). De l'ensemble du processus, un delta erreur est calculé (Éq 2-22) et représente la différence entre l'erreur trouvée avec le nouveau modèle et l'erreur trouvée avec le modèle initial.

$$\Delta \text{ erreur} = \text{Calerreur (1)} - \text{Calerreur (0)} \quad \text{Éq 2-22}$$

- (4) Comparer les deux solutions selon le critère de Metropolis. Si  $\Delta \leq 0$  alors le nouveau modèle est accepté. Si  $\Delta > 0$  avec une probabilité  $e^{-\frac{\Delta \text{ erreur}}{T}}$  alors le nouveau modèle est accepté sinon il est renvoyé faux.

## 2.4 CARACTÉRISATION THÉORIQUE DE LA FISSURATION

(5) Répéter le processus un nombre de mouvements définis (**nbmove**).

(6) Décroître la ‘température’ selon le nombre défini (**nbtemp**) en 1.

### 2.4.3.2 Résultats et discussion

#### *Réglages préalables*

Avant exploitation de la méthode, le programme doit être initialisé. Il faut définir les domaines de variations et les pas qui conviennent afin d’optimiser la recherche du minimum global correspondant au jeu de solution attendu ( $h$ ,  $Ct/f$  et  $L$ ). Pour cela, les données obtenues en modélisation (ou données observées), sont remplacées par les données calculées par les équations (dont les paramètres de fissure sont connus). Le résultat, après lancement du programme, doit coïncider avec les paramètres préalablement choisis dans les équations développées par la régression multiple non linéaire pour les différents espacements. Cette étape est effectuée pour tous les cas de figure c’est-à-dire lorsque la réponse est portée seulement sur  $M_8$  jusqu’à une information observable sur les quatre espacements. Les données de paramétrage sont également plusieurs fois modifiées afin de balayer tous les domaines. Si pour l’utilisation seule de l’équation développée pour  $M_8$ , la recherche des vrais paramètres est infructueuse, la méthode donne un ensemble de solutions ( $h$ ,  $Ct/f$  et  $L$ ) avec des erreurs très faibles. Le jeu de solutions recherché correspond à celui dont l’erreur est minimale. Lorsque cette étape est effectuée, les vrais tests avec les données de modélisation peuvent être engagés.

#### *Cas 1 : Informations seulement sur $M_8$*

Si lors de l’étape précédente, la solution n’est pas trouvée, il est bien évident qu’avec les données de modélisation la recherche sera également infructueuse. Dans le cas d’une information portée seulement sur l’espacement  $M_8$ , le recuit simulé ne peut pas être utilisé. Seules les observations préliminaires de modélisation nous permettent de définir les caractéristiques d’une fissure. L’apport d’une information sur un des paramètres avec une autre technique permet d’affiner les recherches et donne des précisions sur les caractéristiques.

## CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DIAGRAPHIQUE

### Cas 2 : Informations sur $M_8$ et $M_{16}$

Lorsque des variations relatives sont observées sur deux espacements ( $M_8$  et  $M_{16}$ ), la fissure a un contraste  $C_{vf}$  compris entre 5 et 20, une ouverture  $h$  comprise entre 0.005 et 0.020 m et une extension supposée être comprise entre 0.20 et 0.80 m (Figure 2-26).

Pour établir l'efficacité de la méthode, nous testons dix configurations dont on connaît les paramètres de fissure (Tableau 2.9). Le but étant de pouvoir retrouver ces paramètres avec une meilleure précision qu'une simple observation des données de modélisation.

Tests	$C_{vf}$			$h$			$L$		
	modélisés	estimés	incertitudes	modélisées	estimées	incertitudes	modélisées	estimées	incertitudes
1	5	5	0	0,015	0,018	0,003	0,4	0,4	0
2	5	5	0	0,010	0,010	0	0,8	0,7	0,1
3	5	5	0	0,010	0,010	0	0,4	0,4	0
4	10	10	0	0,005	0,005	0	0,2	0,2	0
5	10	17,5	7,5	0,010	0,005	0,005	0,4	0,4	0
6	10	10	0	0,020	0,018	0,002	0,2	0,2	0
7	15	12,5	2,5	0,015	0,018	0,003	0,2	0,2	0
8	15	15	0	0,005	0,005	0	0,4	0,4	0
9	20	15	5	0,005	0,008	0,003	0,2	0,2	0
10	20	17,5	2,5	0,020	0,020	0	0,4	0,4	0

Tableau 2-9 : Comparaison entre les paramètres modélisés et les paramètres estimés (Recuit simulé avec  $M_8$  et  $M_{16}$ )

Sur l'ensemble des dix configurations testées, seule la configuration 5 n'est pas celle attendue en termes d'ouverture et de contraste (Tableau 2-9). Cependant, l'extension semble correspondre à celle paramétrée préalablement. Pour le reste du test, la majeure partie des configurations estimées sont celles modélisées. Pour certaines, les configurations estimées comportent une incertitude. Pour le contraste, l'incertitude se chiffre à +/- 2.5, l'ouverture à +/- 0.003m et pour l'extension, l'incertitude est considérée comme nulle. Au vu de ces faibles incertitudes, le recuit simulé a permis de déterminer les paramètres d'une discontinuité idéale et isolée.

### Cas 3 : Informations sur $M_8$ , $M_{16}$ et $M_{32}$

Lorsque des variations relatives sont observées sur trois espacements, les domaines de variations sont pour le contraste  $C_{vf}$  entre 5 et 20, l'ouverture  $h$  entre 0.005 et 0.020 et l'extension comprise entre 0.8m et 2.5m (Figure 2- 26). Les réglages préalables d'initialisation sont les mêmes que

## 2.4 CARACTÉRISATION THÉORIQUE DE LA FISSURATION

pour le cas à deux espacements à l'exception des bornes du paramètre Log L (-0.097 à 0.4). La série de tests s'effectue sur une dizaine de configurations (Tableau 2-10).

Tests	$C_{if}$			h			L		
	modélisés	estimés	incertitudes	modélisées	estimées	incertitudes	modélisées	estimées	incertitudes
1	5	10	5	0,020	0,008	0,012	1,6	1,3	0,3
2	5	10	5	0,020	0,008	0,012	0,8	0,8	0
3	10	10	0	0,015	0,015	0	1,6	1,7	0,1
4	10	10	0	0,010	0,010	0	1,6	1,4	0,2
5	10	10	0	0,005	0,005	0	0,8	0,8	0
6	15	17,5	2,5	0,010	0,008	0,002	0,8	0,9	0,1
7	15	17,5	2,5	0,020	0,015	0,005	0,8	0,8	0
8	20	7,5	12,5	0,005	0,015	0,010	0,8	1,1	0,3
9	20	15	5	0,015	0,020	0,005	0,8	0,8	0
10	20	17,5	2,5	0,020	0,020	0	0,8	0,8	0

Tableau 2-10 : Comparaison entre les paramètres modélisés et les paramètres estimés (Recuit simulé avec  $M_8$ ,  $M_{16}$  et  $M_{32}$ )

Dans le cas où l'information est portée sur trois espacements, le recuit simulé fournit des résultats avec une précision moins évidente par rapport au cas à deux espacements (Tableau 2-9). On s'aperçoit que la méthode n'arrive pas à trouver la bonne solution pour un contraste de 5 malgré une bonne estimation de l'extension. Notons également que la configuration 8 n'est pas celle recherchée. En ce qui concerne la suite des tests, le recuit simulé fournit une bonne approximation des caractéristiques de la fissure.

Si la méthode semble faible pour l'estimation du contraste de la fissure avec le matériau, elle paraît pertinente sur l'estimation des extensions et des ouvertures.

### *Cas 4 : Informations sur $M_8$ , $M_{16}$ , $M_{32}$ et $M_{64}$*

Pour le cas où l'information est portée sur les quatre espacements, la fissure possède des caractéristiques importantes qui ont pu être bornées par une observation préliminaire (Figure 2-26). La fissure présente, donc, un contraste compris entre 10 et 20, une ouverture entre 0.005m et 0.020m et une extension supérieure à 1.6m.

Le Tableau 2-11 montre les différentes configurations testées pour établir de la pertinence du recuit simulé avec quatre espacements.

## CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DIAGRAPHIQUE

Tests	$C_{vf}$			h			L		
	modélisés	estimés	incertitudes	modélisées	estimées	incertitudes	modélisées	estimées	incertitudes
1	10	10	0	0,015	0,015	0	2,5	2,4	0,1
2	10	15	5	0,02	0,015	0,005	5	4,8	0,2
3	10	15	5	0,02	0,013	0,007	10	3,8	6,2
4	15	15	0	0,005	0,005	0	2,5	2	0,5
5	15	10	5	0,01	0,018	0,008	5	3,3	1,7
6	15	20	5	0,02	0,015	0,005	10	3,7	6,3
7	20	20	0	0,005	0,005	0	5	2,7	2,3
8	20	15	5	0,01	0,015	0,005	10	5,9	4,1
9	20	17,5	2,5	0,02	0,02	0	1,6	2	0,4
10	20	20	0	0,02	0,02	0	2,5	2,8	0,3

Tableau 2-11 : Comparaison entre les paramètres modélisés et les paramètres estimés (Recuit simulé avec  $M_8$ ,  $M_{16}$ ,  $M_{32}$  et  $M_{64}$ )

Si pour quelques tests (1, 4, 7 et 10), la méthode marche, pour le reste, l'estimation par recuit simulé n'apporte pas plus d'informations par rapport à une analyse préliminaire en termes de contraste. L'estimation de l'ouverture et particulièrement de l'extension est attachée à de fortes incertitudes. Pour, l'extension, ces résultats sont probablement dus au problème de volume d'investigation. À partir d'une extension de fissure (h et  $C_{vf}$  sont fixes), la réponse de l'outil est la même pour des extensions différentes. Il n'est pas possible d'apporter une précision sur l'ensemble des paramètres de fissure.

### *Discussion*

La méthode d'optimisation tend à donner de très bons résultats lorsque les informations sont portées soit par  $M_8/M_{16}$  soit par  $M_8/M_{16}$  et  $M_{32}$ . Dans les configurations où la discontinuité se traduit sur deux ou trois espacements, la précision sur les paramètres est apportée.

Avec une seule information (variation relative en  $M_8$ ), il est difficile de déterminer les trois paramètres réels de la discontinuité. Le problème de non-unicité se pose. Dans ce cas-là, il faut s'appuyer sur l'analyse préalable fixant de premières limites.

Lorsque l'information est portée sur les quatre espacements, on a une imprécision des estimations liées indirectement au «trop» d'informations. Il est important de noter qu'entre les données obtenues par la modélisation et les données calculées par les modèles pour certaines configurations, l'écart est non négligeable notamment pour l'espacement  $M_{64}$ . Ainsi, lorsque l'on croise les informations des quatre espacements, l'erreur se répercute et donne une autre estimation des paramètres. Ainsi, dans le cas de quatre informations, l'analyse préliminaire sera

## 2.5 CONCLUSION

privilégiée. Elle représente, cependant, une réponse pour le maître d'ouvrage de l'état interne de son ouvrage.

### **2.5 Conclusion**

Le but est de caractériser une fissure idéale et isolée selon ses paramètres d'ouverture, d'extension et de contraste avec le matériau (la résistivité de la discontinuité). Les analyses préliminaires sont une première estimation des paramètres basée sur le couplage des informations apportées par chaque espacement. Avec ce travail, on constate que cette analyse, selon que la réponse soit visible (supérieure au bruit de mesure de 2%) sur un ou plusieurs espacements, permet de fixer de premiers domaines de solution. Même si ces gammes peuvent être jugées comme larges et idéalisées, elles distinguent, néanmoins, par le paramètre d'extension, des discontinuités pouvant être dommageables ou non pour la structure. Ces travaux de modélisation montrent que l'ensemble des informations fournies par les électrodes de mesures permet d'aller caractériser les défauts à l'intérieur de l'ouvrage à l'aide d'un forage. L'analyse préliminaire montre le potentiel de la méthode à pouvoir distinguer des discontinuités certainement liées au forage (pluricentimétriques) et des discontinuités de plus grande envergure nécessitant probablement une intervention (plurimétriques).

Pour apporter de la précision aux résultats donnés par les analyses préliminaires, nous avons décidé de développer un modèle pour chaque espacement, traduisant la réponse de l'outil en fonction des paramètres de discontinuité. Ces modèles sont utilisés dans une méthode d'optimisation, le recuit simulé, aidant à trancher dans l'estimation des paramètres. Si cette méthode apporte de bons résultats lorsque la discontinuité est visible sur deux ou trois espacements, le trop (4 espacements) ou le peu (un seul espacement,  $M_8$ ) d'information handicapent cette technique dans l'estimation des paramètres de fissure.



## **CHAPITRE 3 APPLICATION IN SITU**

---

Les mesures de terrain sont réalisées sur l'écluse de St-Lambert à Montréal. Les premiers essais en 2011 ont été réalisés à des fins de faisabilité de la méthode et de réglages. Les premières interrogations ont concerné la position de B, l'électrode de retour, c'est-à-dire dans le sol en surface (remblai de l'écluse), dans le fluide du forage voisin, ou dans le canal. En 2012, l'investigation visait à répondre à certaines questions concernant les facteurs influençant la mesure: l'excentricité de l'outil, le pas de mesure et le bruit. L'analyse de ces mesures a permis de définir un protocole de mesure de l'outil. Il a pour but d'indiquer à l'utilisateur les conditions générales de faisabilité des mesures, de prendre connaissance du matériel utilisé, son fonctionnement et les différentes étapes à suivre pour réussir les investigations en forage. Chaque section est suivie de préconisations établies grâce à des études sur le terrain présentées dans cette partie. Dans ce chapitre, il est également question d'établir une analyse des résultats obtenus par la sonde électrique normale. Une caractérisation des discontinuités détectées est réalisée grâce à une inversion et une analyse dictée par la modélisation.

## 3.1 Présentation du site et du matériel

### 3.1.1 Contexte

Les ouvrages en béton étudiés sont des écluses situées sur la Voie Maritime du Saint-Laurent (VMSL). La VMSL est un enjeu économique majeur pour le Québec, le Canada et les États-Unis. L'ensemble des infrastructures notamment les six écluses qui se dispersent sur le fleuve Saint-Laurent, ont été inaugurées, le 26 juin 1959 c'est-à-dire il y a un peu plus de cinquante ans (Figure 3-1) [B. Beck *et al.*, 2008].

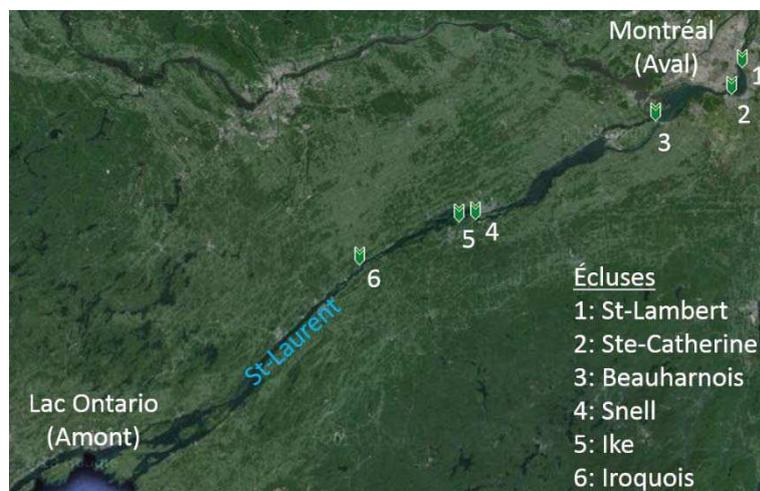


Figure 3-1 : Vue satellite des écluses du fleuve Saint-Laurent (Google, 2013)

Même si le déclin des activités maritimes est incontestable, le pays veut maintenir la circulation, car elle offre une « solution de rechange écologique et sans congestion aux autres modes de transport » [B. Beck *et al.*, 2008]. Pour de telles ambitions, de nombreux problèmes se posent notamment concernant le vieillissement des infrastructures. Richard Corfe, président de la Corporation de gestion de la Voie maritime du Saint-Laurent affirme que “270 millions de dollars répondront aux besoins, mais il nous faut être conscient qu’ils vont certainement augmenter dans l’avenir. [...] Il faudra aussi consacrer quelque 350 millions de dollars d’ici 10 à 15 ans aux trois écluses de la région de Montréal à Saint- Lambert, Côte-Sainte-Catherine et Beauharnois” [B. Beck *et al.*, 2008].

En effet, ces installations, situées dans la région de Montréal, sont sujettes à des problèmes engendrés particulièrement par la réaction alcalis-granulats (RAG) [Gaudreault, 2000]. Les premières manifestations se sont fait ressentir dans les années 70, soit environ 20 ans après leur

### 3.1 PRÉSENTATION DU SITE ET DU MATÉRIEL

construction. Ces structures sont affectées à différents niveaux par la RAG. Ce phénomène engendre un gonflement entraînant un développement des contraintes internes. Une microfissuration diffuse se développe dans toute la matrice et les granulats [Rivard, 2002]. Un vaste programme d'analyse, de surveillance et de réhabilitation a été mis en place dans les années 2000. Des forages ont été réalisés sur les écluses notamment sur Saint-Lambert. Des essais non-destructifs (électriques et acoustiques) et des essais destructifs (compression uniaxiale et traction) ont été effectués sur les échantillons prélevés [VMSL, 2005].

#### 3.1.2 Caractéristiques des écluses

Les écluses sont construites selon de larges monolithes de béton, disposés les uns à côté des autres de façon à offrir un mur continu retenant les eaux grâce à leur poids (Figure 3-2).

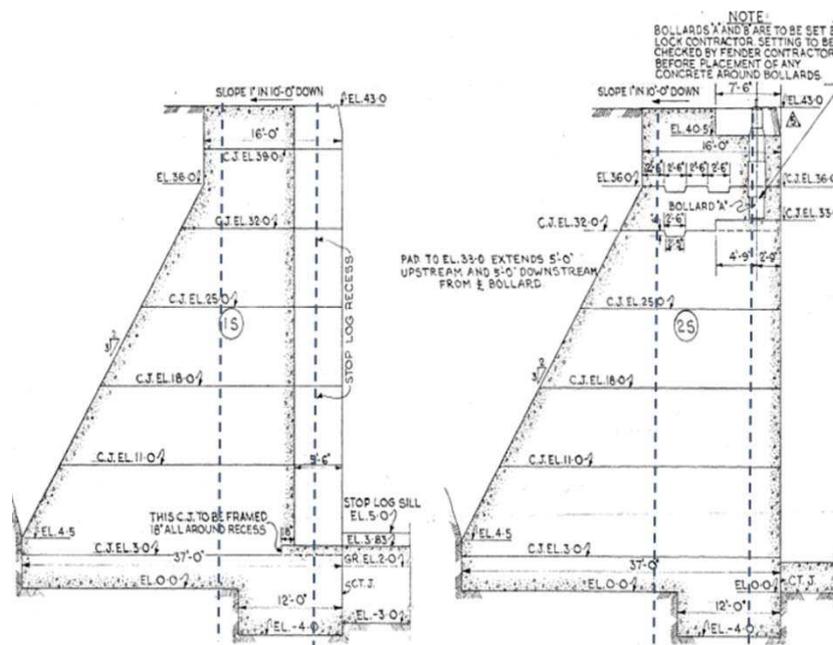


Figure 3-2 : Vue transversale des monolithes de l'écluse Saint-Lambert (plans de la Voie Maritime)

Le sas mesure 233,5 m de longueur, 24,4 m de largeur et 9,1 m de profondeur [B. Beck *et al.*, 2008]. Cependant selon les plans fournis par le réseau de la Voie Maritime, les dimensions de l'écluse de Saint-Lambert ne suivent pas une telle configuration. La profondeur réelle du canal serait de 40 pieds soit environ 12.20m. Ces monolithes (ou plots) ont été coulés en plusieurs étapes, créant ainsi des joints de coulées qui constituent des plans de faiblesse potentiels, donc à surveiller.

Les caractéristiques des bétons de masse sont variables et dépendent de la nature des granulats. En général, la taille des granulats peut atteindre 150 mm, mais selon la littérature [Giroux, 2001], leur dimension est bien souvent inférieure avec un pourcentage d'environ 30% de granulats supérieurs à 75mm. La nature des granulats n'est pas mentionnée, mais en établissant une liste des carrières aux alentours, on peut faire une hypothèse sur la nature de la roche dont sont issus les granulats de ces bétons. Le calcaire gris généralement désigné sous le nom de "pierre grise de Montréal" est la roche la plus fréquemment utilisée (Figure 3-3).



Figure 3-3 : Béton de masse de l'écluse de Saint-Lambert (juillet 2013)

Les écluses sont des structures en contact permanent avec l'eau du canal. Le béton est, donc, toujours saturé. Ainsi, on observe une piézométrie des forages correspondant, en moyenne, au niveau d'eau présente dans le sas. Les eaux du Saint-Laurent comportent cinq masses d'eau principales. En amont et aval de Montréal, la masse d'eau considérée est celle des Grands Lacs. Ces eaux sont fortement minéralisées par les ions majeurs avec une conductivité moyenne de  $300\mu\text{S}/\text{cm}$  soit une résistivité d'environ  $33\text{ Ohm}\cdot\text{m}$  [Centre Saint-Laurent, 1996]. Dans le béton, le fluide est plus minéralisé du fait d'échanges entre le matériau et l'eau. De ce fait, on peut avancer l'hypothèse d'une eau interstitielle de résistivité inférieure à  $33\text{ Ohm}\cdot\text{m}$  [Snyder *et al.*, 2003].

### 3.1.3 Ouvrage d'essai : l'écluse de Saint-Lambert

Située sur la Rive-Sud de Montréal, l'écluse de Saint-Lambert est la première étape du nivellement marin en direction des Grands Lacs (Figure 3-1). Les monolithes reposent sur une fondation constituée d'un schiste argileux d'Utica. Le substratum, fortement lité, présente de

### 3.1 PRÉSENTATION DU SITE ET DU MATÉRIEL

nombreuses fractures naturelles dans le plan de schistosité de la roche. Lors de précédents travaux, six forages ont été réalisés sur le plot (S1) de la Rive-Sud. Les forages dans lesquels les investigations ont été réalisées sont au nombre de quatre (N° 2, 3, 5 et 6). Les deux autres forages (N° 1 et 4) n'ont pas été exploités : l'un a été rebouché par du bitume (N° 4) tandis que l'autre a été réalisé dans le remblai (N° 1), et ne servira pas au développement de la technique de mesure sur l'ouvrage en béton (Figure 3- 4).

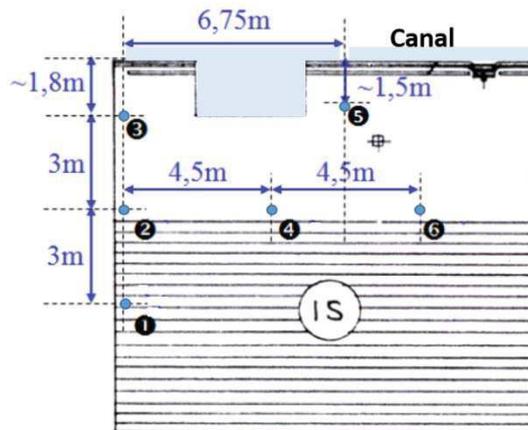


Figure 3-4 : Plan des forages de l'écluse de Saint-Lambert [Thivierge, 2011]

Lors des forages effectués fin 2003, des carottes, de différents diamètres, ont été prélevées sur toute la longueur du forage dans le béton et dans le rocher (Tableau 3-1).

Forages	Longueur forée dans le béton (m)	Diamètre (mm)	Longueur forée dans le rocher (m)	Diamètre (mm)
2	14,1	75	1,6	75
3	15,0	152	1,6	152
5	15,0	152	0,3	152
6	4, 7 ; 8,9	152 ; 95	3,0	95

Tableau 3-1 : Longueurs et diamètres des forages exploités

Dans le cadre de la Chaire CRSNG-Industrie sur l'auscultation des structures de béton, le Groupe de recherche sur l'auscultation et l'instrumentation (GRAI) de l'Université de Sherbrooke a effectué de nombreux essais in situ et en laboratoire depuis 2003 [VMSL, 2005; Thivierge, 2011]. In situ, des essais de perméabilité de Lugeon, des tomographies et de l'imagerie en trou de forage ont été réalisés. En laboratoire, sur des carottes, ce sont des essais

non-destructifs (mesure du temps de propagation des ondes de compression et de cisaillement, mesure des fréquences de résonance et mesure de résistivité électrique) et destructifs (résistance à la compression et à la traction et analyse pétrographique) qui ont été pratiqués. Les premiers résultats en laboratoire sont portés en annexe 3.A et signent un béton de qualité moyenne à bonne. Quant aux essais de Lugeon (voir annexe 3.B), ils montrent une perte d'eau plus importante lors de la décharge synonyme d'un massif rocheux passablement fissuré. Ce résultat est d'autant plus notable sur le forage 6.

### 3.1.4 Déroulement de l'essai

Les mesures de résistivité électrique par une sonde normale nécessitent l'utilisation d'un certain nombre de composants. La Figure 3-5 illustre les éléments essentiels pour une acquisition des données.

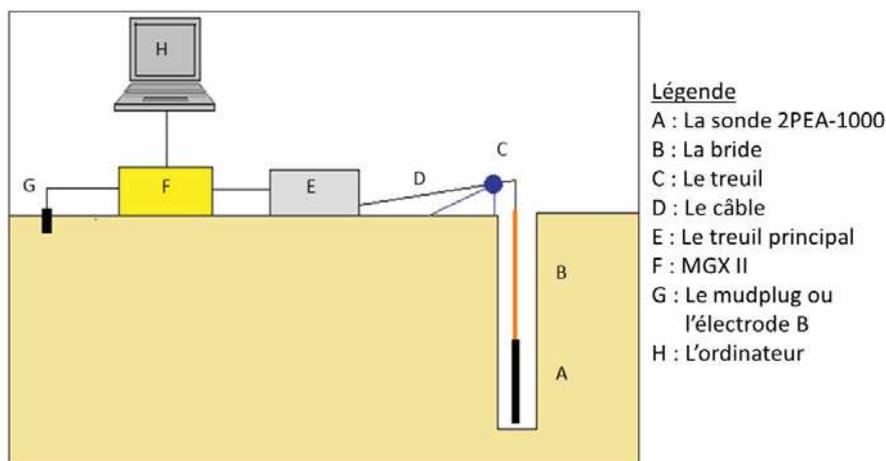


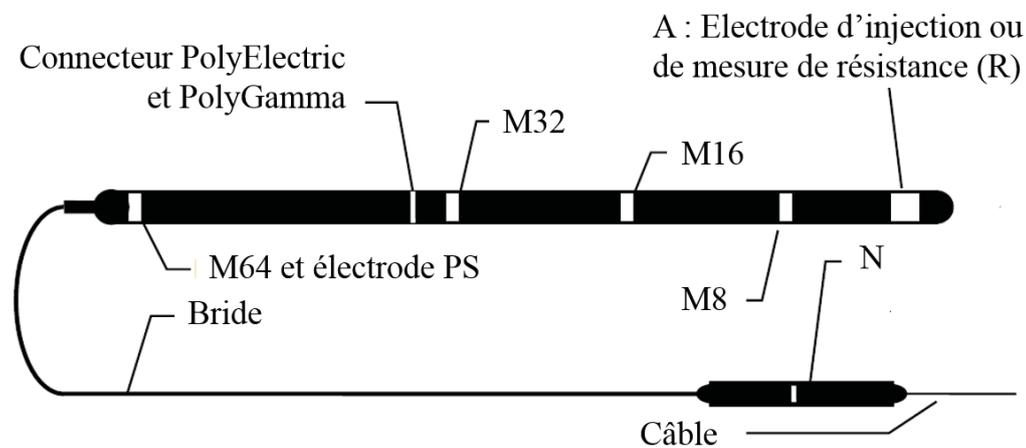
Figure 3-5 : Dispositif installé sur le terrain

La sonde 2PEA-1000 est une sonde multifonctionnelle (Figure 3-6) mesurant 1.88m pour un diamètre de 0.05m. Elle permet lors d'une seule manipulation d'obtenir des mesures de résistance électrique (dispositif monoélectrode), de résistivité électrique (dispositif normal), de potentiel spontané (PS) et de rayonnement gamma naturel. En mode PolyElectric, la sonde possède une électrode d'injection (A) de 0.045 m de longueur et quatre électrodes de mesure de 0.025m de longueur.

La sonde est reliée au système de treuil secondaire (C) par une bride (B) de 7.5m de longueur constituée de matière isolante pour éviter toutes interactions avec la mesure électrique. Le treuil secondaire permet, ainsi, de conduire directement le câble, la bride et la sonde dans le forage.

### 3.1 PRÉSENTATION DU SITE ET DU MATÉRIEL

Notons que la bride est porteuse de l'électrode N. Le câble (D) assure la descente et la remontée de l'outil tout en effectuant une liaison électrique entre la sonde et le système d'acquisition. Le treuil principal (E) peut dérouler plusieurs dizaines de mètres de câble. Les mesures sont ensuite enregistrées par le système d'acquisition MGX II © [Mount Sopris Instrument, 1998] (F) permettant de transformer des informations analogiques en informations numériques. Les mesures sont ainsi recueillies et visualisées par le logiciel MS log © installé sur un ordinateur de terrain (H). Le mudplug représente l'électrode B (G) et est directement relié au système d'acquisition. Afin d'obtenir un bon couplage électrique, cette électrode de surface est plantée dans un sol végétal loin des forages (infini) i.e. à une distance entre 8m et 25m (cf. § 3.2.1).



- A** Électrode émettrice (Dispositif normal) ou 'R' monoélectrode (Single point)
- B** Électrode retour du courant positionnée en surface = Mudplug (non représentée sur la sonde)
- N** Électrode de référence
- M8** Électrode réceptrice séparée de l'électrode A d'une distance de 8" soit environ 20cm
- M16** Électrode réceptrice séparée de l'électrode A d'une distance de 16" soit environ 40cm
- M32** Électrode réceptrice séparée de l'électrode A d'une distance de 32" soit environ 80cm
- M64** Électrode réceptrice séparée de l'électrode A d'une distance de 64" soit environ 160cm

Figure 3-6 : Schéma PolyElectric/Poly Gamma 2PEA-1000 [Mount Sopris Instrument Co., 2002]

Il est important de noter qu'il existe deux limites matérielles majeures dans l'exploitation de la sonde électrique de type normal. La première concerne la taille du dispositif. L'assemblage des différents éléments porte à 9,38m la longueur totale du matériel inséré dans le forage. La seconde limite est liée à la position de l'électrode N se trouvant en partie supérieure de la bride.

Dès que le haut de la bride sort du forage, le fluide n'est plus présent pour permettre le couplage avec l'électrode N. Les mesures ne sont plus exploitables. Ainsi, la profondeur minimale d'un forage saturé doit être de l'ordre de 10m.

Lors de chaque investigation, la sonde est descendue au fond du forage pour une exécution des mesures lors de la remontée de l'outil, comme classiquement en diagraphie. Un zéro de référence, en surface de l'écluse, est pris et coïncide, dans notre cas, au bout supérieur de la bride. Ce repère permet, par la suite, d'effectuer les corrections nécessaires sur les valeurs de profondeurs des mesures lues sur le moniteur. Il est important également de préciser que pour un dispositif normal, le point de mesure de résistivité est assigné à égale distance entre l'électrode d'injection A et l'électrode de potentiel M.

### **3.2 Étude du protocole de mesure**

Dans cette partie sont présentées quatre études préliminaires de terrain réalisées le 11 mai 2012 avec pour objectif d'évaluer des paramètres influençant les mesures. Pour atteindre une bonne répétabilité et de meilleures interprétations, notre attention s'est posée sur la position de B c'est-à-dire la position de l'infini, sur l'excentricité de la sonde par rapport à l'axe du forage, sur le pas de mesure et sur le bruit de terrain. Ces investigations sont effectuées à l'écluse de Saint-Lambert sur un même forage, le n° 6.

#### **3.2.1 Position de B**

Selon la notice 2PEA-1000 [Mount Sopris Instrument Co., 2002], le « mudplug » doit être localisé à partir de 8 mètres du forage dans un sol humide pour établir un bon couplage. Si l'emplacement dans le sol n'est pas possible, l'électrode peut être introduite dans un forage rempli d'eau.

L'électrode de courant B en surface est donc mise en place à différentes positions afin d'étudier l'influence de ce paramètre sur la mesure. Quatre positions sont considérées : dans le forage n° 2 voisin (mesure 1), puis en surface à 11, 23,5 et 49m (mesures 2, 3 et 4) dans un remblai terreux. Chaque mesure est réalisée avec des paramètres d'enregistrement identiques à savoir une sonde centrée, une vitesse d'enregistrement constante, un calibre de mesure à 0-2500 Ohm.m et un pas de mesure de 0,05m sur les 4 positions étudiées, le dernier cas (mesure 4 i.e. en surface à 49m du forage) ne permet pas d'obtenir une mesure exploitable. L'électrode étant trop éloignée les

### 3.2 ÉTUDE DU PROTOCOLE DE MESURE

mesures ne sont pas fiables. Les cas 1, 2 et 3 sont étudiés comparativement (Figure 3-7 et Figure 3-8), et en fonction de l'espacement considéré pour la sonde. On note que pour tous les espacements, le signal obtenu avec B dans le forage voisin conduit à des résistivités apparentes plus faibles. En revanche pour les deux positions de l'électrode en surface et « proche » du forage (cas des mesures 2 et 3) les résistivités apparentes sont similaires. On peut donc penser que pour l'électrode B placée dans le forage voisin, un biais de mesure vient perturber l'interprétation des mesures. On observe que si ce décalage est notable en valeur absolue, les variations de résistivités mesurées semblent toutefois représentatives de celles observées dans les autres configurations.

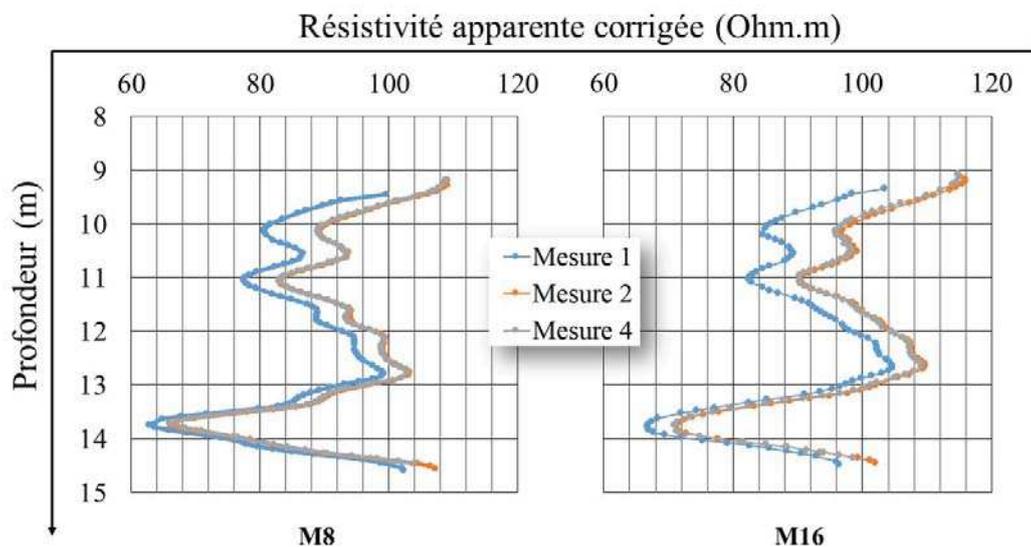


Figure 3-7 : Comparaison des mesures 1, 2 et 3 pour l'espacement M<sub>8</sub> et l'espacement M<sub>16</sub>

Concernant les cas 2 et 3. Les similitudes entre les mesures sont plus faibles si on augmente la dimension de la sonde (écart plus élevé avec M<sub>64</sub>, et inexistant avec M<sub>8</sub>) (Figure 3-8). Sur ces deux seules configurations, on note que les courbes des mesures 2 et 3 se dissocient d'autant plus que la distance au forage croît. Considérons les valeurs de résistivités mesurées à une même profondeur avec les différentes positions de la sonde de surface. Cette population à chaque profondeur permet de calculer un coefficient de variation (CoV) c'est-à-dire le rapport entre la moyenne et l'écart-type qui traduit de la variabilité des mesures liée aux positions de l'électrode en surface. L'analyse de ces CoV (entre les mesures 2 et 3) illustre l'influence de ce paramètre.

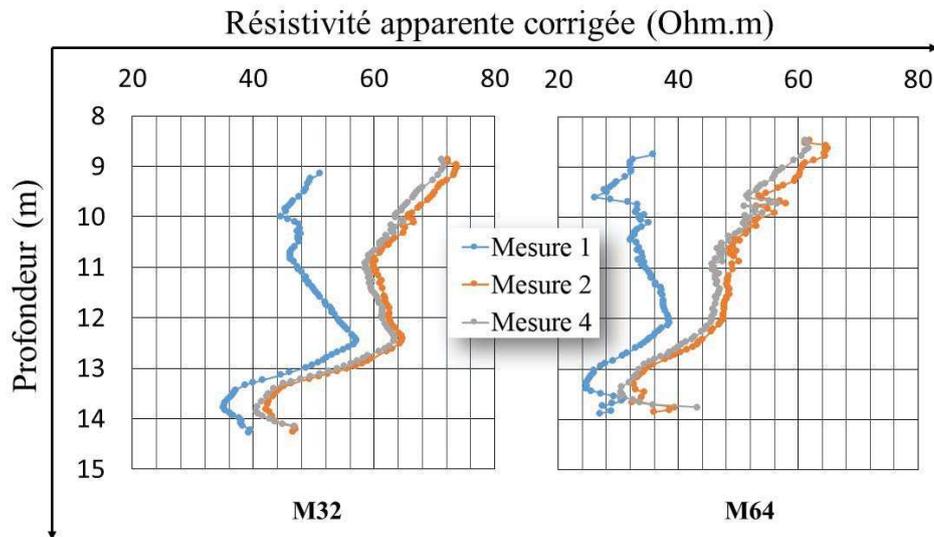


Figure 3-8 : Comparaison des mesures 1, 2 et 3 pour l’espacement M<sub>32</sub> et l’espacement M<sub>64</sub>

Le Tableau 3-2 présente les valeurs de la médiane de ces CoV sur l’ensemble du forage.

Coefficient de variation (%)	M <sub>8</sub>	M <sub>16</sub>	M <sub>32</sub>	M <sub>64</sub>
Médiane	0,20	0,30	1,20	2,03

Tableau 3-2 : Coefficient de variation pour chaque espacement dans l’étude de position de B

Ainsi, on montre par ces tests que la position de l’électrode de courant en surface influence les valeurs de résistivités apparentes mesurées (bien que les variations relatives semblent conservées). Dans le cadre d’une investigation il sera donc souhaitable de ne pas modifier ce paramètre, voire il sera intéressant de positionner exactement l’électrode B dans le cas de mesures à différentes dates. En nous appuyant sur les recommandations de la notice de la sonde et sur les tests effectués, nous considérerons dans la suite de nos travaux une position pour l’électrode en surface de l’ordre de 11m.

### 3.2.2 L’excentricité

Oberto Serra en 1978 rapporte que la sonde peut occuper des positions différentes dans le forage: soit être centrée, soit être collée à la paroi, soit en être plus ou moins écartée. De ce fait, des effets peuvent biaiser les mesures. Une récente étude sur l’excentricité en « Short- et Long Normal », Nam, M.J. et *al.* (2010) donnent de nombreux résultats pertinents sur le sujet. Ils

### 3.2 ÉTUDE DU PROTOCOLE DE MESURE

avancent que l'excentricité est négligeable si le fluide de forage est moins résistant que l'encaissant. Ceci est d'autant plus vrai si le fluide de forage devient très conducteur.

Dans de tels cas, le courant a tendance à circuler principalement dans le forage au détriment de la formation. Cependant, les effets sont pris en compte autour des interfaces et dans le cas où la couche géologique est hautement conductrice. Dans ce cas-ci, le courant pénétrera plus facilement dans l'encaissant rocheux. Ils ajoutent également que les mesures de résistivité effectuées dans un forage de petit diamètre sont moins biaisées que pour un forage de diamètre plus important. Les effets sont plus grands lors de l'augmentation de la distance d'excentricité de l'outil [Nam *et al.*, 2010].

Dans notre cas, le forage 6 a un petit diamètre de 95mm. En sachant que le diamètre de la sonde est d'environ 50mm, la distance d'excentricité varie de 0 à 45mm. Pour établir si l'excentricité de la sonde a un impact sur les mesures, des relevés de résistivité sont été effectués dans un même forage avec une sonde à différente position :

- (1) Sonde collée à la paroi
- (2) Sonde positionnée aléatoirement
- (3) Sonde centrée

Chaque mesure est réalisée avec des paramètres fixes à savoir une électrode de retour de courant B placée dans le sol à 11m, une vitesse d'enregistrement constante, un calibre à 0-250 Ohm.m et un pas de mesure de 0,05m.

Un calcul de coefficients de variation est réalisé entre les trois mesures pour chaque espacement. Le Tableau 3-3 présente la médiane des coefficients de variation déterminée sur le forage.

<b>Coefficient de variation (%)</b>	<b>M<sub>8</sub></b>	<b>M<sub>16</sub></b>	<b>M<sub>32</sub></b>	<b>M<sub>64</sub></b>
Médiane	0,35	0,46	0,68	2,05

Tableau 3-3 : Coefficient de variation pour chaque espacement pour l'étude de l'excentricité

Comme on peut l'attendre des résultats de la bibliographie, dans notre contexte (forage de faible diamètre), les résultats montrent que l'excentricité a peu d'effet sur les mesures présentées. Toutefois, on remarque que le coefficient de variation augmente avec l'espacement et atteint une médiane de 2% pour M<sub>64</sub>. Cette valeur est considérée comme non négligeable, relativement

au seuil de détection que nous considérons sur l'ouvrage (cf. § 3.2.4). De plus, on peut s'attendre à ce que l'excentricité soit un paramètre influençant grandement la mesure lorsque le forage est de diamètre plus gros. De ce fait, on recommande, par précaution, de mettre des centreurs non conducteurs.

### 3.2.3 Le pas de mesure

Le pas de mesure est une distance fixe choisie entre chaque mesure de potentiel que l'on impose à l'outil lors de la remontée de la sonde. Un pas de mesure fin donne une meilleure estimation dans la position en profondeur et l'épaisseur des discontinuités. Un traitement de données a été développé pour s'affranchir des faibles résolutions verticales des outils diagraphiques [Denis *et al.*, 2000]. Les auteurs ont montré que la diminution du pas de mesure permettrait d'obtenir une meilleure estimation de l'épaisseur et de la position en profondeur des couches d'épaisseur inférieure à la résolution verticale de l'outil diagraphique utilisé.

Afin de voir l'influence du pas de mesure, deux enregistrements ont été réalisés dans le même forage et dans les mêmes conditions, mais avec deux pas de mesure différents :

- $\Delta z = 0.05$  m
- $\Delta z = 0.01$  m

Chaque mesure est réalisée avec des paramètres fixes à savoir une électrode de retour de courant B placée dans le sol à 11 m, une vitesse d'enregistrement constante, un mode à 0-250 Ohm.m utilisé et une sonde centrée. On note aussi que 0.01m est la limite minimale du pas de mesure que nous avons expérimenté lors des investigations.

En Figure 3-9, les deux courbes se superposent à la différence que pour un pas de 0,05m, les petites fluctuations observables avec un pas de mesure de 0,01m sont lissées. On observe donc bien qu'en augmentant le pas de mesure, on obtient une meilleure interprétation du log. Il existe une augmentation de la sensibilité de la mesure à cause de la perte de discrétisation, donc un manque de représentativité des variations. Ceci explique que la courbe représentant un pas à 0.05m lisse certaines « petites » fluctuations observées avec un pas plus fin.

### 3.2 ÉTUDE DU PROTOCOLE DE MESURE

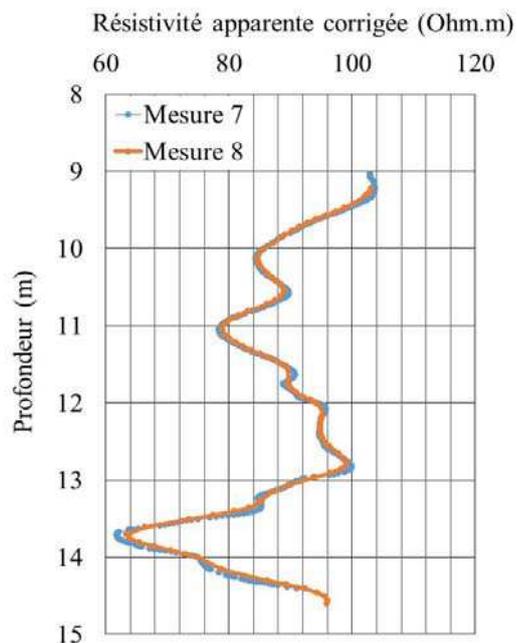


Figure 3-9 : Comparaison entre deux mesures dont les pas sont de 0.01m puis de 0.05m

Le pas de mesure est lié à la vitesse de remontée de l'outil : une vitesse de remontée trop rapide interdit d'avoir un pas de mesure fin (la fréquence d'enregistrement de la sonde est toujours la même; quel que soit le pas de mesure choisi). Ainsi, lors d'une investigation, la notion de temps de mesure sur l'ouvrage est à considérer. Un pas de mesure de 0.01m est préférable pour conserver une bonne représentativité des variations de résistivités et donc, pour la recherche des discontinuités de petites dimensions. Cependant, un pas de mesure de 0.05m augmente la vitesse de remontée possible pour la sonde. Lors de la prise de mesure, la vitesse d'enregistrement choisie, avec un pas de 0.05m, oscille entre 1 et 1,50 m/min alors que pour un pas plus fin, la vitesse est réduite à 0.50m/min. Avec un pas plus grossier, la vitesse est 2.5 fois plus rapide (pour une même fréquence de mesure de l'appareil). Dans le cas d'un ouvrage de grande dimension (d'un forage profond), ce choix peut donc être privilégié. On peut ensuite envisager de reprendre des mesures avec un pas fin sur les zones jugées comme potentiellement plus intéressantes à étudier. On peut ainsi réaliser une investigation plus fine, mais aussi plus ciblée.

#### 3.2.4 Le bruit de mesure

Idéalement, le signal électrique obtenu correspondrait uniquement à la réponse du terrain. Cependant, dans la réalité, les mesures sont parasitées par de nombreuses variables spécifiques aux principes physiques utilisés et au site. Dans le cas de l'électrique, il existe des bruits liés à

## CHAPITRE 3 APPLICATION IN SITU

l'appareil et à l'acquisition puis des bruits externes liés à l'activité humaine. Ainsi, pour déterminer le niveau de bruit global, on effectue plusieurs passages dans un même forage avec les mêmes conditions de mesure. Chaque mesure est réalisée avec des paramètres fixes à savoir une électrode de retour de courant B placée dans le sol à 11 m, une vitesse d'enregistrement constante et un pas de mesure de 0,05 m, et une sonde centrée. La gamme de résistivité apparente de l'ouvrage ne dépasse pas 150 Ohm.m, on choisit d'utiliser le calibre 0-250 Ohm.m. Cependant, pour compléter l'étude, on décide d'estimer également le bruit avec un enregistrement réalisé avec le calibre 0-2500 Ohm.m.

Le bruit est quantifié en comparant les données des différents passages. Les coefficients de variation sont calculés à chaque profondeur, sur la population des différentes mesures répétées. Le Tableau 3-4 et Tableau 3-5 donnent la médiane des coefficients de variation de l'investigation sur le forage, pour chaque espacement.

<b>Coefficient de variation (%)</b>	<b>M<sub>8</sub></b>	<b>M<sub>16</sub></b>	<b>M<sub>32</sub></b>	<b>M<sub>64</sub></b>
Médiane	0,29	0,23	0,89	0,59

Tableau 3-4 : Coefficient de variation de chaque espacement pour le mode 0-250 Ohm.m

<b>Coefficient de variation (%)</b>	<b>M<sub>8</sub></b>	<b>M<sub>16</sub></b>	<b>M<sub>32</sub></b>	<b>M<sub>64</sub></b>
Médiane	0,56	0,84	0,66	2,05

Tableau 3-5 : Coefficient de variation pour chaque espacement pour le mode 0-2500 Ohm.m

On constate que les coefficients de variation c'est-à-dire une expression des écarts relatifs entre les mesures sont relativement faibles ce qui indique qu'il existe très peu de bruit parasitant les données. Cependant, il a été observé que le paramètre statistique augmente lorsque l'espacement grandit. Ainsi, les mesures des grands espacements seraient davantage perturbées. De plus, la quantité de bruit devient plus conséquente avec le calibre 0-2500 Ohm.m (moins bien adapté à cette étude). On note également que le choix du calibre semble aussi influencer les valeurs des résistivités apparentes, puisqu'on observe un décalage des courbes de mesures obtenues dans les mêmes conditions (Figure 3-10). On peut parler, ici, de « perte de justesse ». Ceci confirme

### 3.2 ÉTUDE DU PROTOCOLE DE MESURE

qu'il faut toujours adapter le calibre à la gamme de résistivité observée sur l'ouvrage. Ici, le plus petit calibre, 0-250 Ohm., doit être utilisé.

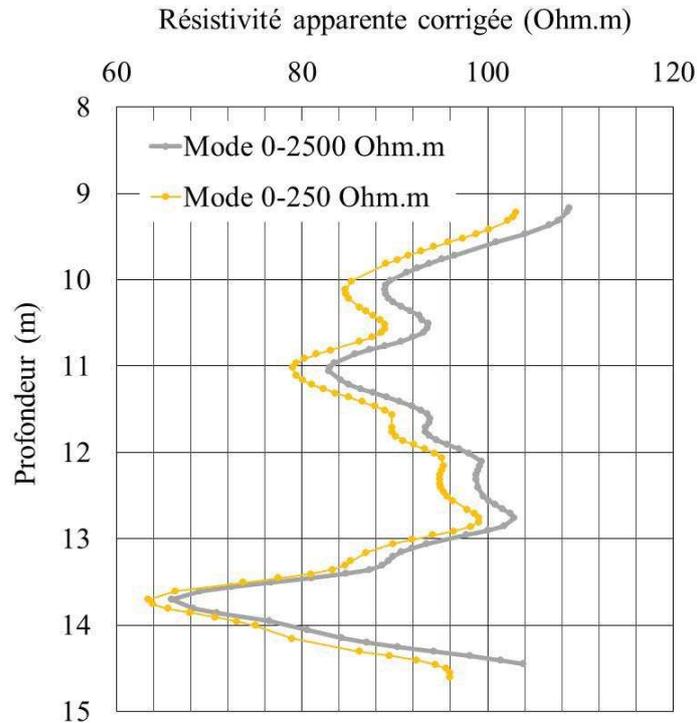


Figure 3-10 : Comparaison des logs obtenus avec les deux calibres de mesure : 0-250 et 0-2500 Ohm.m

Lors d'une première évaluation de l'ouvrage, l'utilisation du mode 0-2500 Ohm.m est recommandée afin de garantir un enregistrement de toutes les valeurs (éviter la saturation de l'appareil). Puis, au vu des résistivités, si elles sont inférieures à 250 Ohm.m, une deuxième investigation dans le forage avec le calibre adapté 0-250 Ohm.m doit être réalisée. Dans le cas de la structure étudiée la résistivité est comprise entre 0 et 250 Ohm.m.

Le Tableau 3-4 présente des coefficients de variation compris entre 0.20% et 0.90%. Le bruit est considéré comme relativement faible voir négligeable. Cependant pour être dans une situation la plus défavorable, on prendra 2% de bruit de mesure lors de l'analyse des logs de résistivité.

### 3.2.5 Conclusion

Pendant l'installation du matériel, la position de B et de la sonde dans le forage sont deux critères à prendre en compte. Les études effectuées sur un même forage permettent, aujourd'hui, d'affirmer plusieurs faits. Tout d'abord, il est préférable de ne pas changer l'emplacement de B en termes de nature d'implantation pendant toute l'investigation. Il est, également, suggéré de choisir le sol comme position préférentielle de l'électrode de retour de courant, B.

Pour chaque investigation, nous suggérons de placer des centreurs afin d'éviter l'influence d'un biais possible en particulier sur les grands espacements.

Au niveau de la mesure, il faut porter une attention particulière au pas de mesure et au calibre. Il est recommandé d'effectuer une première évaluation de reconnaissance avec de «grands» pas de mesures et de calibres permettant une évaluation « dans les grandes lignes » du forage (par exemple, pas de mesure de 0,05 m, une vitesse d'enregistrement compris entre 1 et 1,50 m/min et un mode de mesure de 0-2500ohm.m). En fonction de la gamme de résistivité, et des secteurs potentiellement à étudier, l'acquisition peut être relancée en diminuant le pas de mesure et le calibre à l'ouvrage.

Ainsi, pour une étude complète d'un forage, deux ou trois passages de la sonde peuvent s'avérer nécessaires. L'ensemble du déroulement des essais sur site expérimental et des préconisations sont présentés dans un protocole (voir annexe 3.C) grâce aux études réalisées dans cette section.

### 3.3 Mesures de terrain – interprétations qualitatives

Les mesures de terrain présentées dans cette section sont des mesures réalisées sur les quatre forages de l'écluse de Saint-Lambert en 2011. Pour chaque forage investigué, les mesures sont enregistrées à la remontée. Les résultats sont présentés sous forme de log résistivité apparente en fonction de la profondeur. Dans cette section, il est question, tout d'abord, d'établir de premières observations des mesures de résistivité. Par la suite, les logs de résistivité sont comparés à un ensemble d'informations récolté sur les forages lors de cette même campagne ou lors d'une campagne précédente. En même temps que les mesures de la résistivité, la résistance est enregistrée par le dispositif de monoélectrode intégré dans la sonde. Les données issues des investigations électriques vont être confrontées à différents éléments d'informations : étude des carottes de forage, informations obtenues par les diagraphies d'imagerie acoustique et optique.

### 3.3 MESURES DE TERRAIN – INTERPRÉTATIONS QUALITATIVES

Ces éléments complémentaires ont été obtenus lors de précédentes campagnes d'investigations. Ils permettent d'apporter des précisions pour une interprétation qualitative et de définir le potentiel de la technique à identifier des discontinuités dans des structures massives en béton. Les conclusions de ces études ont l'objet d'une publication en 2014 dans le journal NDT&E International [Taillet et al., 2014].

#### 3.3.1 Observations préliminaires

La Figure 3-11 représente les logs des quatre forages de l'écluse de Saint-Lambert, après corrections des effets de surface et de forage. Pour chaque forage, les variations de résistivité apparente pour les quatre espacements  $M_8$ ,  $M_{16}$ ,  $M_{32}$  et  $M_{64}$  sont présentées. Le bruit de mesure est estimé inférieur à 2% (cf. § 3.2.4). Les gammes de résistivité apparente s'échelonnent entre 0 et 250 Ohm.m. Si pour les forages 3, 5, et 6, les résistivités apparentes sont comparables pour les 4 espacements ce n'est pas le cas pour le forage 2. On observe une évolution des résistivités apparentes mesurées avec les petits espacements ( $M_8$ ) et avec les plus grands ( $M_{16}$ ,  $M_{32}$ ,  $M_{64}$ ). Cela traduit vraisemblablement d'une différence de caractéristiques entre le béton et les parois du forage. L'hypothèse d'un gradient ne repose que sur l'analyse des mesures de résistivités. Nous n'observons ce phénomène seulement sur le forage 2, et n'avons pas d'hypothèses sur son origine possible.

Du fait de la position de l'électrode N sur la bride (à 9.4m au-dessus de A), et de sa sortie de l'eau du forage pour des positions de la sonde trop en surface, l'enregistrement des valeurs de résistivité commence à la profondeur de 10 m.

En effectuant une analyse de bas en haut du graphique, une transition entre un milieu conducteur à un milieu moins conducteur est à noter sur les quatre espacements de sonde et pour chaque forage. Cette transition commune, après correction par espacement, se situe à 13.4m est liée soit à des changements dans les propriétés internes de la matière soit à des modifications de la composition du matériau. La nature exacte de ce changement observé sur l'ensemble des forages ne peut pas être déterminée sans informations complémentaires. Toutefois, la profondeur de cette transition peut être identifiée.

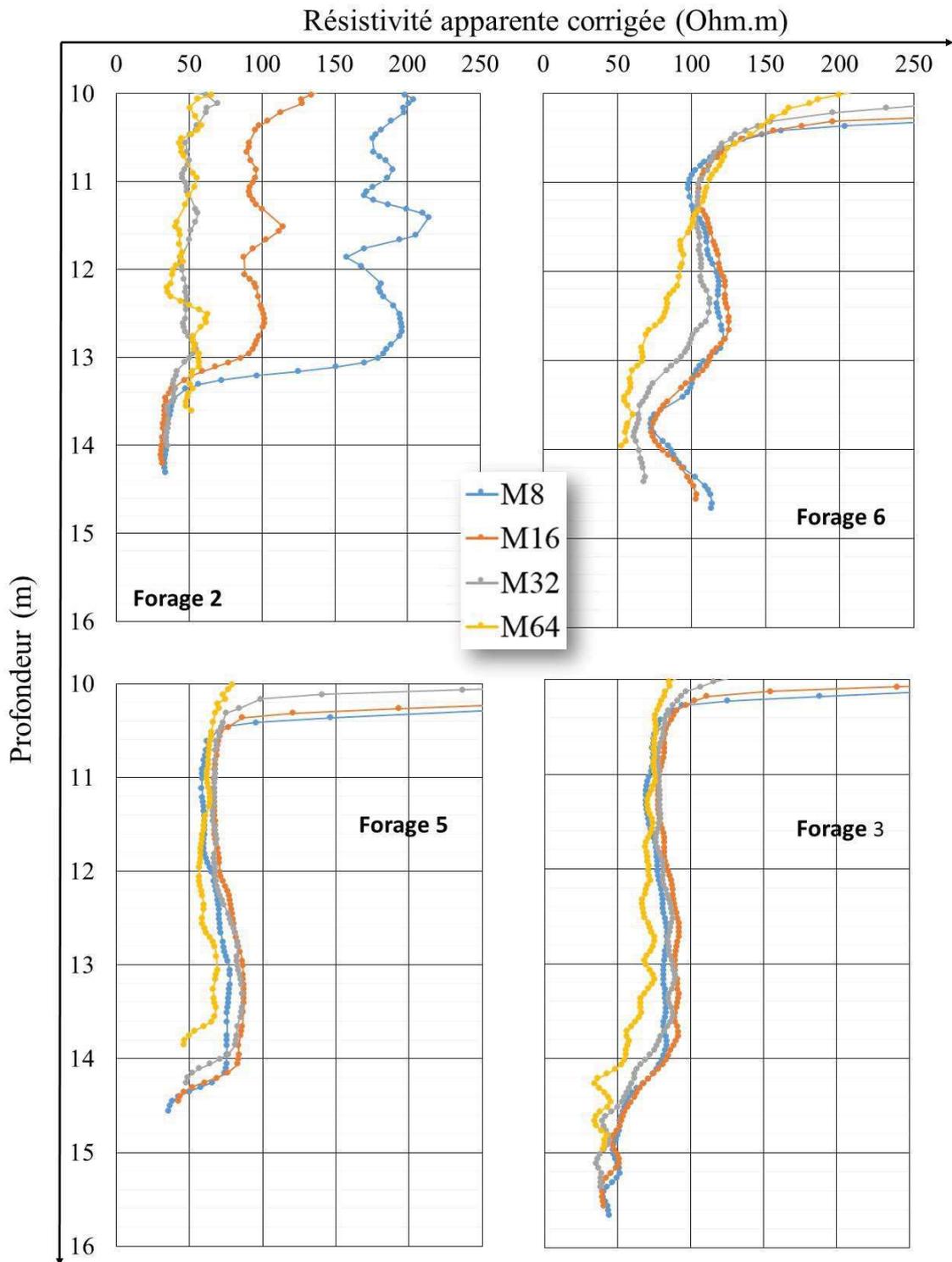


Figure 3-11 : Variation de la résistivité apparente corrigée pour les forages de l'écluse de Saint-Lambert, pour les 4 dimensions de la sonde normale

### 3.3 MESURES DE TERRAIN – INTERPRÉTATIONS QUALITATIVES

Dans un souci de compréhension et de clarté, l'explication sur l'estimation de la profondeur de la transition se fait sur le forage 6 (Figure 3-12).

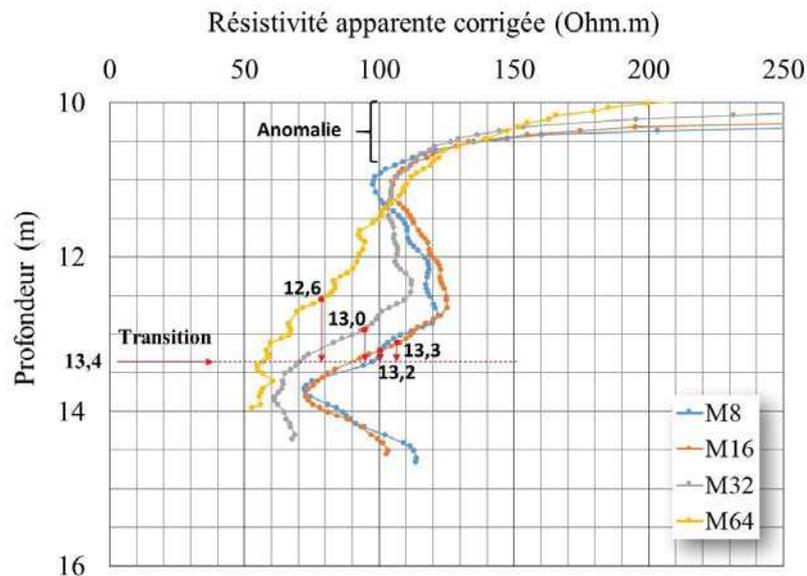


Figure 3-12 : Observation de la transition sur un zoom du log du forage 6

La profondeur de transition correspond à la valeur du point d'inflexion de la courbe rectifiée par une correction égale à  $Mx/2$ . Lorsque l'on passe d'un milieu 'conducteur' à un milieu 'résistant', la profondeur de la transition est sous-estimée et inversement dans le cas contraire (cf. § 2.3.3.3). Dans notre cas, la correction  $Mx/2$  est ajoutée à la valeur de la profondeur du point d'inflexion lue.

Pour le forage 6, la transition se trouve à 13.4 m de la surface (Figure 3-12). Cette méthode d'estimation de la profondeur est appliquée sur l'ensemble des forages (voir annexe 3.D). Les profondeurs de la transition pour chaque forage sont présentées dans le Tableau 3-6. Les forages 3 et 5 en bord du canal ont une profondeur de transition identique de 14.4 m. Pour les forages 2 et 6, la profondeur de la transition est considérée être la même aux alentours de 13.3 m/13.4 m.

Informations	Forage 2	Forage 6	Forage 3	Forage 5
Profondeur de la transition	13,3 m	13,4 m	14,4 m	14,4 m
Position du forage par rapport au canal	4,8 m	4,8 m	1,8 m	1,5 m

Tableau 3-6 : Profondeur de la transition et position de chaque forage par rapport au canal

Une inversion des données de terrain est réalisée pour illustrer les interprétations précédentes. La méthode d'inversion est un processus permettant d'obtenir la distribution de la résistivité vraie du milieu à partir des données mesurées (Cf. §2.4.2.1). La Figure 3-13 est une représentation recomposée en 3D des panneaux électriques inversés (en résistivité vraie) pour chaque forage. L'inversion des données de terrain est obtenue par le logiciel Res2Dinv© [Loke et Barker, 1996]. La méthode d'inversion présente deux zones le long du trou de forage. Une transition à une profondeur de 14,4 m pour B3 et B5 et à 13,4 m pour B2 et B6 est observée. Il y a une chute de 1 m entre les forages près du remblai (B2 et B6) et les forages à proximité du canal (B3 et B5). La transition est un changement de résistivité entre un matériau conducteur (zone 1) et un matériau moins conducteur (zone 2). L'hypothèse sur la nature de cette transition serait la présence du contact substratum/béton. Cette interface expliquerait pourquoi les courbes témoignent d'un changement de résistivité sur les quatre espacements et pour chaque forage.

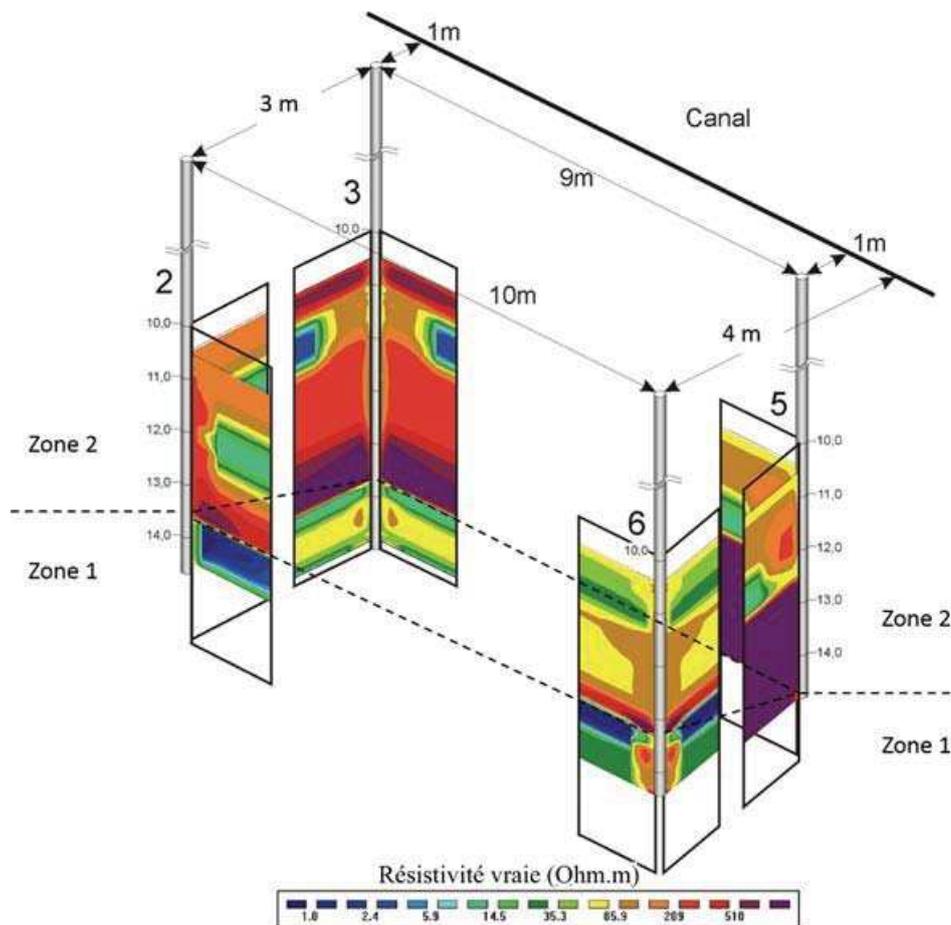


Figure 3-13 : Représentation 3D des données inversées du site expérimental

### 3.3 MESURES DE TERRAIN – INTERPRÉTATIONS QUALITATIVES

#### 3.3.2 Comparaison avec la monoélectrode

La sonde multifonctionnelle 2PEA-1000 fournit différentes informations : la résistance (Ohm) par le dispositif de monoélectrode, la polarisation spontanée (PS) et le gamma naturel (GR). La PS et le GR, de par leur fonctionnement et les paramètres auxquelles elles sont sensibles [Serra, 1979] ne semblent pas intéressants pour la recherche et l'étude de discontinuités sur les ouvrages en béton massif. De plus, des essais préliminaires réalisés en 2010 [Taillet, 2010] montrent qu'effectivement elles ne sont pas sensibles aux interfaces connues dans l'ouvrage. Par contre, la monoélectrode, quant à elle, est une source apportant des précisions dans les observations préliminaires.

##### 3.3.2.1 Principes

À la différence du dispositif normal, la monoélectrode mesure la résistance du milieu face à une sollicitation électrique et non sa résistivité, à l'aide notamment, d'une électrode d'injection descendue dans le forage et une électrode de référence en surface [Hallenburg, 1984]. L'électrode introduite dans le forage occupe aussi bien la fonction d'électrode de courant A que de mesure de potentiel M. Les électrodes N et B sont une même électrode placée en surface et considérée à l'infini. On a un dispositif dipôle (Figure 3-14).

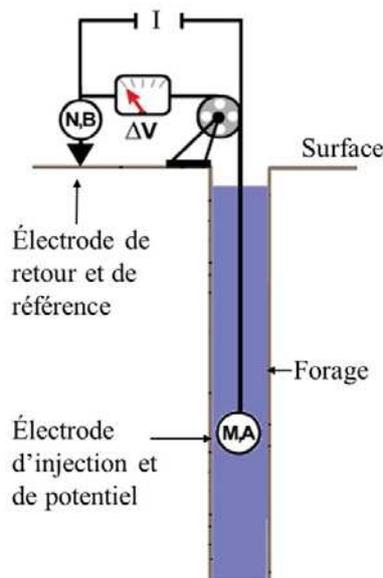


Figure 3-14 : Schéma du principe de mesure en monoélectrode

Pour cette méthode, on définit la « Grounding Resistance »,  $r_g$ . Selon la loi d'Ohm,  $r_g$  est fonction du courant injecté ( $I$ ) et du potentiel ( $E_{e\infty}$ ) dans l'équation suivante (Éq 3- 2) [Hallenburg, 1984] :

$$r_g = \frac{E_{e\infty}}{I} \quad \text{Éq 3-1}$$

La résistance indiquée par la monoélectrode est la somme de la résistance près de l'électrode B et de la résistance de l'électrode A ( $r_g$ ). Puisque la résistance en B ne change pas, toutes modifications survenues sur le log sont le résultat d'un changement de résistance près de A donc dans et autour du forage. Grâce à une très bonne résolution verticale, les courbes obtenues sont symétriques par rapport au milieu de la couche. Les limites des couches peuvent être déterminées simplement avec les points d'inflexion.

### 3.3.2.2 Résultats

Dans cette section, nous avons fait le choix d'établir une comparaison entre les résistances (monoélectrode) et les résistivités apparentes obtenues en sonde normale M<sub>8</sub> sur l'ensemble des forages (Figure 3-15). Les graphiques montrent les courbes obtenues par la monoélectrode et par le dispositif normal traduisant dans l'ensemble de mêmes variations pour chaque forage. La monoélectrode possède une très bonne résolution verticale offrant une meilleure délimitation des zones. Cette meilleure résolution conduit à mieux détecter les variations faibles et très locales des caractéristiques électriques, cela permet de mieux faire apparaître les structures fines. De même, certaines variations 'lissées' par M<sub>8</sub> sont identifiées par la monoélectrode. C'est le cas pour le forage 6 en profondeur 13.1 m. Un pic de la valeur lors de la transition entre les deux milieux est marqué sur la monoélectrode, mais atténué en M<sub>8</sub>. Dans d'autres cas, la monoélectrode est utile pour confirmer ou infirmer des observations préliminaires effectuées sur la résistivité apparente. En effet, nous avons évoqué des variations de résistivité sur M<sub>8</sub> anormalement élevées en forage 2 en comparaison avec les autres forages. Dans cette comparaison, pour les forages 3, 5 et 6, les courbes sont comparables. Pour le forage 2, les valeurs de résistance très élevées sont observées. Ce phénomène a été évoqué lors de l'interprétation des données de résistivité du dispositif normal et vient appuyer l'hypothèse de mesures biaisées. À ce stade, aucune autre information ne peut indiquer la cause de ce phénomène.

### 3.3 MESURES DE TERRAIN – INTERPRÉTATIONS QUALITATIVES

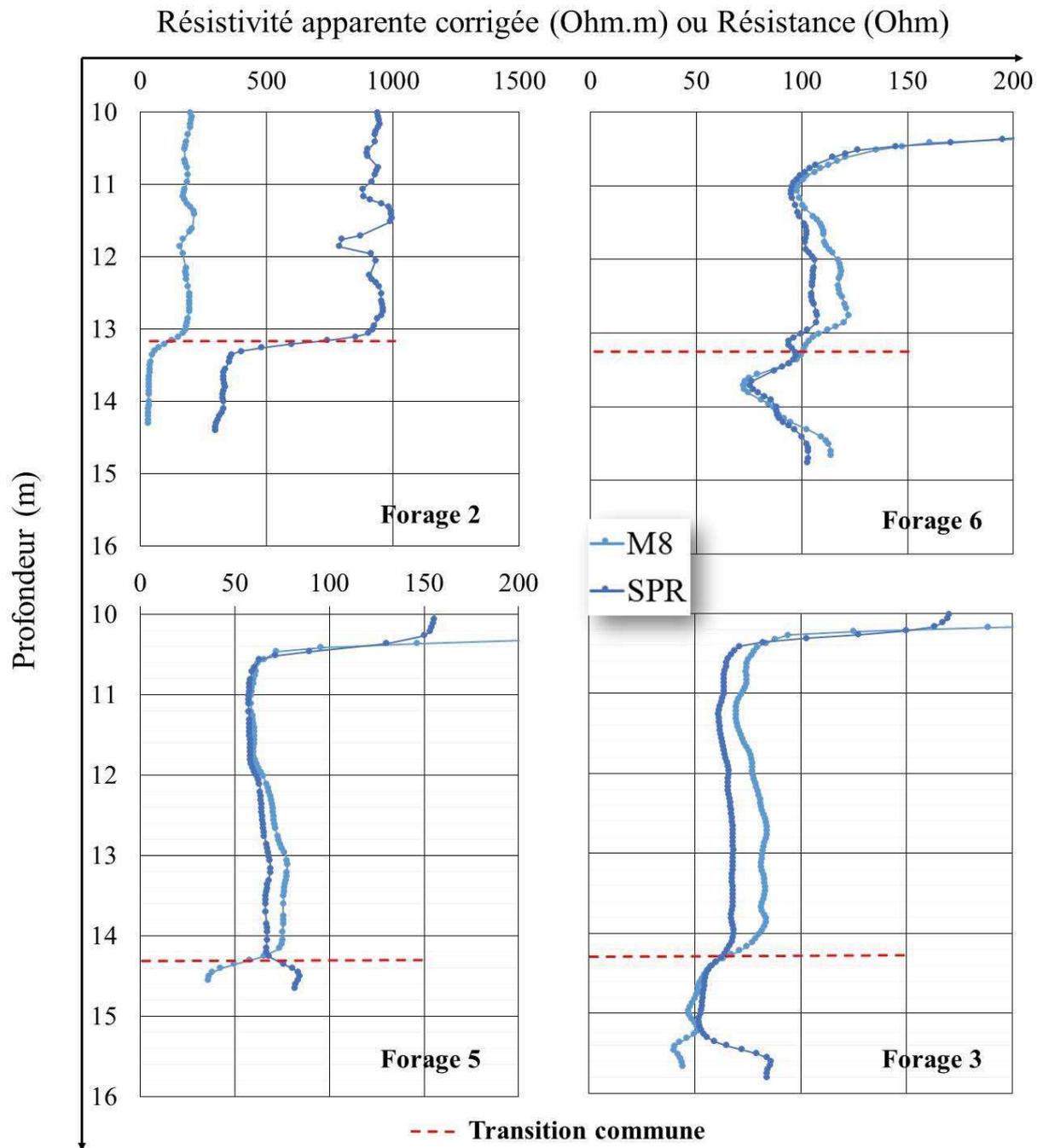


Figure 3-15 : Confrontation entre la résistance et la résistivité apparente pour M8 pour chaque forage

La Figure 3-16 montre des identifications subjectives d'unités conductrices justifiées par une baisse de résistance notable et de résistivité apparente. Cette observation sera plus longuement reprise lors de la confrontation avec les diagraphies d'imagerie acoustique et optique.

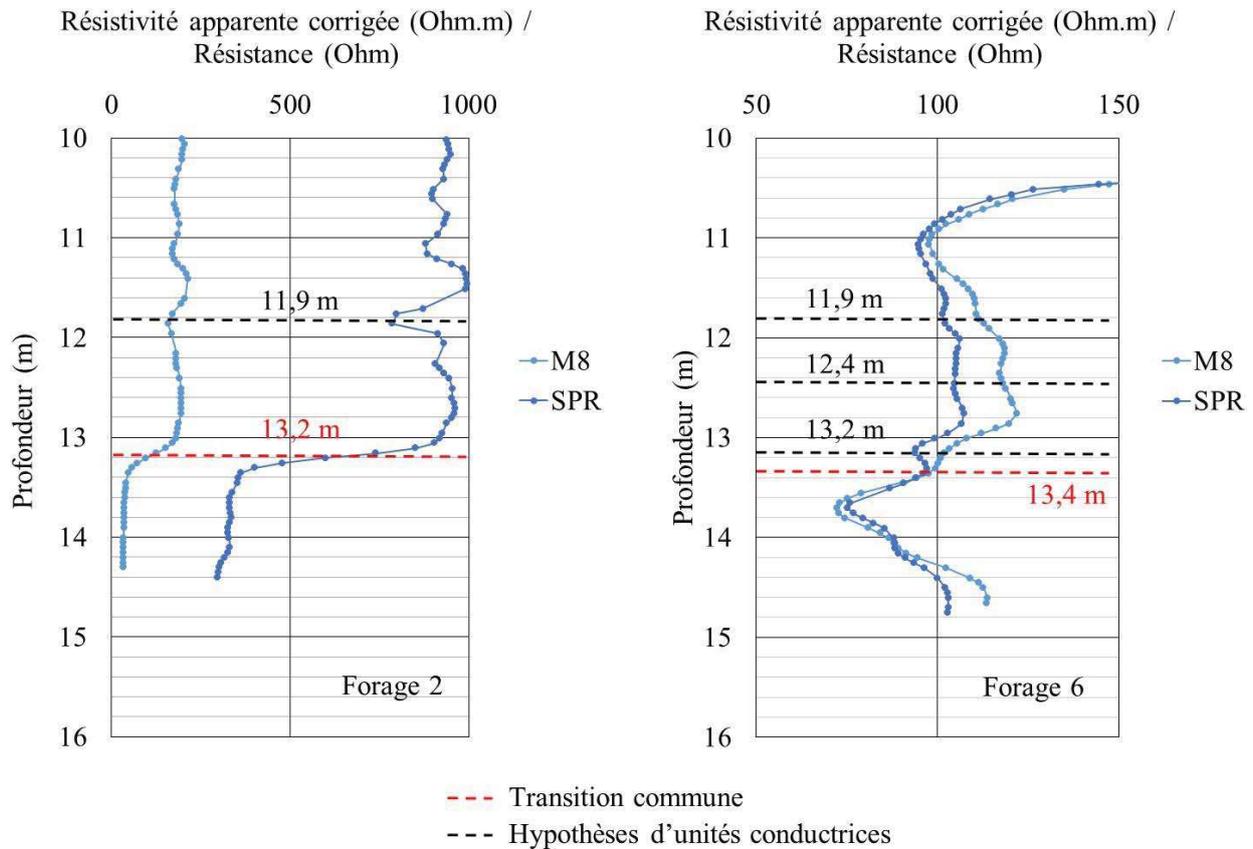


Figure 3-16 : Identification hypothétique d'unités conductrices pour le forage 2 et 6

La monoélectrode fournit des informations complémentaires et en même temps que celles récoltées par le dispositif normal. Avec une résolution plus fine, la monoélectrode est un outil capable de confirmer ou d'infirmer les variations significatives de résistivité apparente. À une profondeur donnée, une baisse de résistivité apparente couplée à une baisse de résistance est synonyme de la présence d'unité conductrice. L'interprétation, par la monoélectrode, reste cependant purement qualitative.

### 3.3.3 Comparaison avec des diagaphies d'imagerie

#### 3.3.3.1 Principes généraux des diagaphies d'imagerie

Les diagaphies enregistrent en continu des variations d'un paramètre donné en fonction de la profondeur. Les diagaphies d'imagerie fournissent directement une visualisation des parois du forage en temps réel. Pour obtenir de telles informations, deux types de sondes sont utilisées : ABI-40 (sonde d'imagerie acoustique) et OBI-40 (sonde d'imagerie optique) [Mount Sopris Instrument, s.d]. La sonde ABI-40 utilise un dispositif de balayage acoustique en trou de forage.

### 3.3 MESURES DE TERRAIN – INTERPRÉTATIONS QUALITATIVES

Un capteur rotatif génère des impulsions ultrasonores. En fonction des différences de propriétés des matériaux, une partie des ondes acoustiques est réfléchiée par la paroi puis récupérée par la sonde. L'outil enregistre, donc, l'amplitude et le temps de parcours des signaux réfléchis à l'interface. L'imagerie acoustique permet ainsi de visualiser les impédances acoustiques des matériaux c'est-à-dire leur  $\rho$  à résister au passage des ondes. La sensibilité des ondes au paramètre géométrique des réflecteurs rend possible la détection de fissures isolées dans des massifs géologiques [Dennis *et al.*, 1987; Paillet *et al.*, 1985] ou dans des barrages [Jobin *et al.*, 2006]. Cependant, ceci engendre des artéfacts dans l'image c'est-à-dire une unité visible sur l'image acoustique, mais non présente dans la réalité.

La sonde OBI-40 génère une image en continu de la paroi du forage en utilisant une caméra spécialisée et un système d'éclairage. L'image optique est souvent plus simple à interpréter, car elle utilise les vraies couleurs. Cette information est complémentaire à l'imagerie acoustique notamment pour confirmer ou infirmer les interprétations établies en imagerie acoustique (artéfacts).

#### 3.3.3.2 Résultats

Avec les nombreuses possibilités qu'offrent ces techniques, il est décidé de confronter les données de résistivités apparentes de 2011 avec des données d'imagerie acoustique et optique réalisées en 2008 sur les forages 2 et 6 (Figure 3-17). Il est important de souligner que l'ouvrage a pu évoluer entre les dates de ces différentes investigations.

L'hypothèse sur la nature de la transition en section 4.1 est validée et étayée par des images de la paroi [VMSL, 2005]. Les résultats, aussi bien en forage 2 qu'en forage 6, montrent la zone de contact entre le substratum et la structure en béton (Figure 3-17 et Figure 3-18). D'autre part, la comparaison apporte des précisions sur la nature des variations de résistivité repérées. Pour la Figure 3-17, la sonde électrique enregistre une zone de faible résistivité comprise entre 13.3 m et 14.4 m. Elle est identifiée comme une zone de forte densité de fissures dans le substratum. Il semblerait également qu'à 11.9 m, la baisse de résistivité apparente témoigne de la présence de cavités perméables.

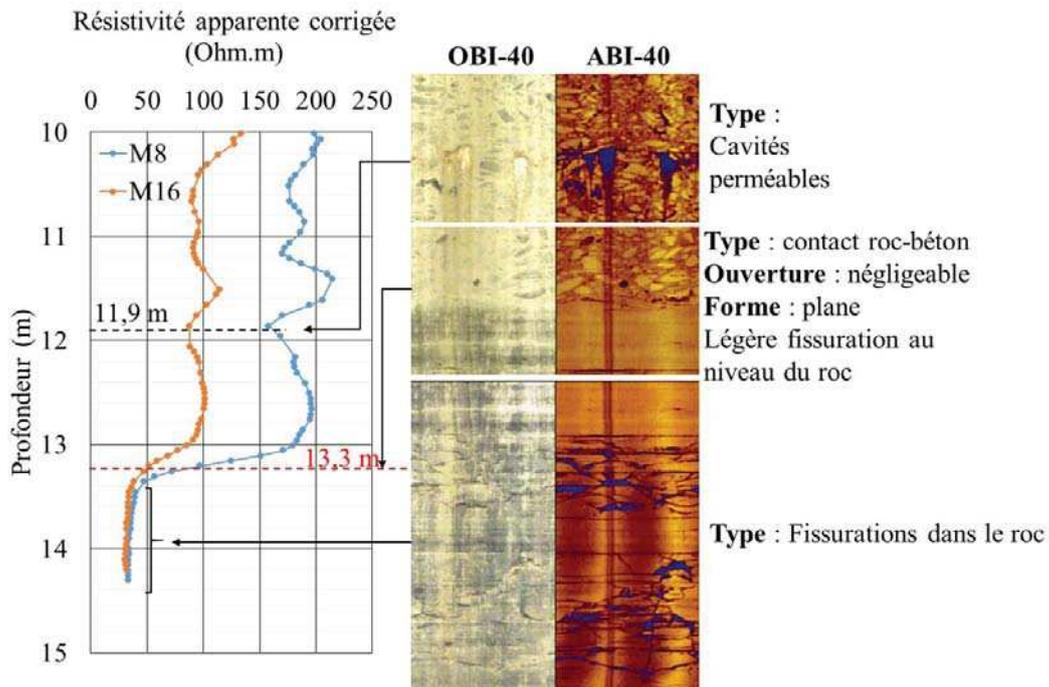


Figure 3-17 : Confrontation des données de résistivité apparente corrigées et des données d'imagerie optique et acoustique pour le forage 2

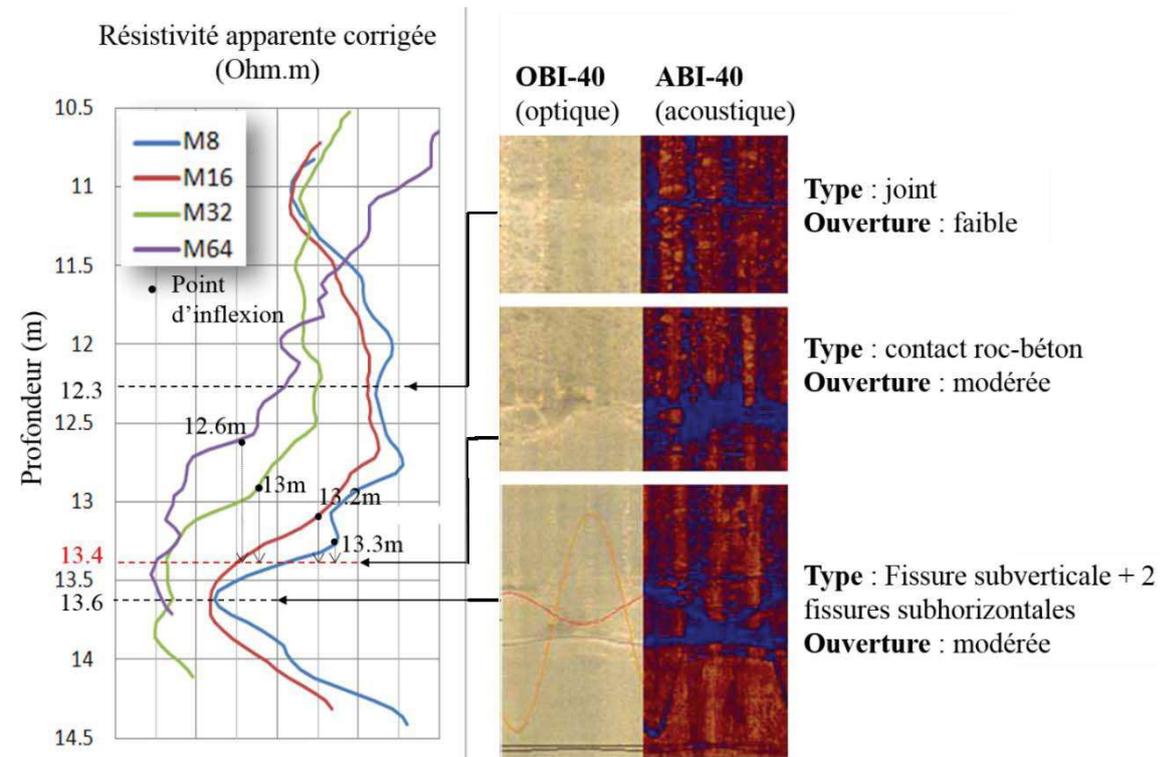


Figure 3-18 : Confrontation des données de résistivité apparente corrigées et des données d'imagerie optique et acoustique pour le forage 6

### 3.3 MESURES DE TERRAIN – INTERPRÉTATIONS QUALITATIVES

Pour la Figure 3-18, d'autres zones bleutées sont identifiées par la diagraphie d'imagerie. À 12.3 m, une baisse de résistivité seulement remarquable en  $M_8$  coïncide avec la présence d'un joint d'ouverture modérée. À 13.6 m, une baisse de résistivité est détectée pour les espacements  $M_8$  et  $M_{16}$ . À cette profondeur, les mesures d'imagerie acoustique et optique détectent deux fissures subhorizontales et une fissure subverticale. Cette baisse de résistivité est donc interprétable comme la présence d'un ensemble de fissures. L'ensemble des fissures est identifié électriquement comme étant une couche équivalente avec une résistivité apparente de 50 à 70 Ohm.m.

#### 3.3.4 Conclusions

Dans cette partie sur l'étude des variations relatives, nous avons vu que la nature des variations significatives ne peut pas être déterminée par des données de résistivités apparentes seulement.

Une interprétation qualitative complète requiert des informations complémentaires. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur des données de résistance par le dispositif de monoélectrode obtenues simultanément avec les données de résistivités apparentes. Purement qualitative, elle appuie l'identification des variations de résistivité identifiées. Par la suite, les données de résistivité apparente sont comparées aux données de diagraphie d'imagerie acoustique et optique. Ces techniques apportent une très bonne visualisation de la paroi du forage. On s'aperçoit que différentes unités comme le contact substratum/béton, les joints ou les cavités perméables détectées par les images acoustiques et optiques sont également identifiées par des baisses de résistivité apparente.

Les différentes comparaisons permettent de montrer que la sonde de résistivité électrique est sensible aux discontinuités et aux zones altérées. Ces dernières peuvent être significativement bien identifiées/localisées.

(1) Un ensemble de fissures est considéré comme une zone d'endommagement. Il est identifié comme une couche mince équivalente. Son épaisseur est déterminée par les points d'inflexion corrigés d'un facteur  $Mx/2$ . Sachant que la couche est conductrice par rapport à l'encaissant résistant, l'épaisseur est surestimée. Dans le cas de cette étude la zone altérée à une épaisseur égale à 0.30 m (Figure 3-19)

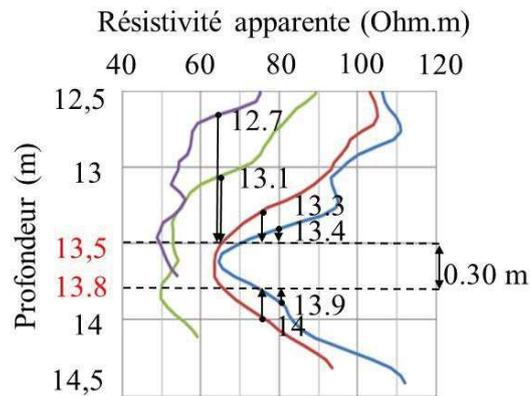


Figure 3-19 : Détermination de l'épaisseur de la couche équivalente

(2) Un joint peut être également détecté par les données de résistivités apparentes selon son ouverture et son contraste de résistivité avec le matériau. La présence d'un joint est vérifiée par deux règles :

- Le joint est, d'abord transcrit en  $M_8$  avec une certaine amplitude. Il apparait, ensuite, sur les autres courbes avec une amplitude diminuant avec l'augmentation du niveau d'observation ( $M_{16}$ ,  $M_{32}$  et  $M_{64}$ ).
- Le joint isolé est vérifié s'il est enregistré par l'imagerie acoustique et optique, voir confirmé par la monoélectrode.

Les diagraphies d'imagerie sont une méthode appuyant également les variations de résistivité, mais sont restreintes à une information de la paroi. Ainsi, la sonde électrique normale, bien qu'offrant de bons résultats qualitatifs, sera développée à des fins quantitatives. Il existe des méthodes nettement plus précises dans la détection comme la monoélectrode et qui demanderaient à être approfondies.

### 3.4 Inversion des mesures

L'inversion des mesures s'appuie, en premier lieu, sur une étude de la variation relative des résistivités au droit des discontinuités uniquement sur le forage 6. Ce paramètre est une différence entre la résistivité vraie du matériau et la résistivité apparente obtenue avec la sonde rapportée à la résistivité vraie (cf. § 3.3.2). Or, la prise de mesure sur le terrain ne donne seulement que les résistivités apparentes. La résistivité vraie doit être déterminée d'une autre manière. Pour cela, nous devons inverser les résistivités apparentes.

### 3.4 INVERSION DES MESURES

Lorsque les variations relatives au droit des discontinuités détectées sont déterminées, une analyse préliminaire est effectuée sur l'ensemble des espacements (cf. § 3.4.1). Cette seconde étape apporte d'ores et déjà une réponse sur la discontinuité idéale en termes d'ouverture, d'extension et de contraste. Ensuite, la technique d'optimisation du recuit simulé est utilisée. Si les données s'ajustent au modèle développé dans le chapitre 2 (§ 2.4.2) alors la méthode affine le domaine de solution. Dans le cas contraire, la méthode d'optimisation n'apporte pas d'autres éléments de réponse.

#### 3.4.1 Étape 1 : Calcul de la variation relative

L'inversion des variations de résistivités apparentes pour le diagnostic des discontinuités passe, tout d'abord, par la détermination de la variation relative des résistivités (Éq 3-2). Le logiciel d'inversion RES2Dinv [Loke et Barker, 1996] est utilisé pour estimer la résistivité vraie, nécessaire dans le calcul de la variation relative.

$$V_r \% = \frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_t} * 100 \quad \text{Éq 3-2}$$

Où  $V_r$  est la variation relative au droit de la zone conductrice.  $\rho_t$  et  $\rho_a$  sont respectivement la résistivité vraie du matériau et la résistivité apparente au droit de la zone.

##### 3.4.1.1 Méthode d'inversion : Res2Dinv

Alors que cette méthode, dans de nombreuses études, est souvent appliquée pour obtenir des informations quantitatives, elle est, dans notre cas, pertinente pour trouver une information clé dans nos analyses. L'inversion permet d'atteindre la résistivité du matériau dans la zone étudiée et donc, de calculer des variations relatives.

Le logiciel Res2Dinv [Loke et Barker, 1996] est un outil d'inversion couramment utilisé. L'outil crée un modèle 2D des distributions des vraies résistivités à partir des données mesurées (résistivités apparentes). Dans le contexte de l'étude, c'est le mode «cross-hole» qui sera utilisé pour l'inversion (Figure 3-20). Les profilages électriques réalisés avec les 4 espacements, le long du forage, sont traités comme s'il s'agissait d'une acquisition classique avec des électrodes disposées de manière régulière dans le forage. Les électrodes sont réparties en trois ensembles avec (1) des électrodes de surface (2) des électrodes dans le forage 1 et (3) des électrodes dans le forage 2.

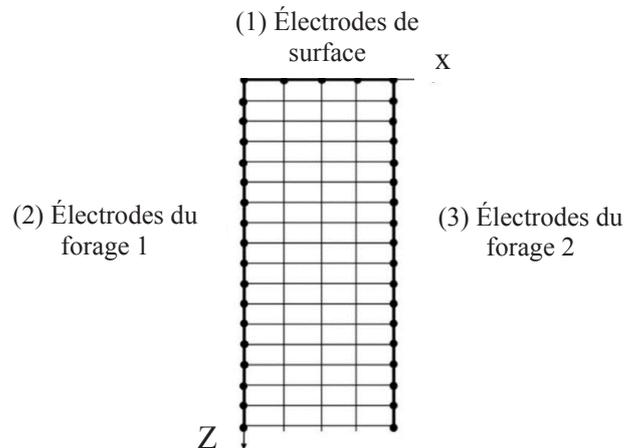


Figure 3-20 : Arrangement des électrodes dans un dispositif cross - hole

Cependant, notre contexte est un forage unique. Il est donc important d'effectuer des modifications dans l'organisation du fichier. La configuration initiale est la même que pour un contexte cross-hole c'est-à-dire que l'on considère des électrodes de surface et des électrodes dans deux forages. Toutefois, dans notre cas, le nombre d'électrodes utilisé n'est pas de 3 mais de 2 (A et M). Ainsi, les électrodes A et M sont référencées dans un seul forage. La position en surface selon X est la position donnée au forage 1 et la position en profondeur Z varie du pas effectué sur le terrain. La dernière information correspond aux valeurs de résistivité apparente associées.

Le processus itératif propose un modèle tel que les résistivités apparentes déterminées par le calcul direct à partir du modèle soit les plus proches des distributions des résistivités apparentes mesurées sur le site. Un indicateur de la qualité de cette inversion est le RMS (Root Mean Square : mesure statistique de l'amplitude d'une quantité qui fluctue), que le processus cherche à minimiser au cours des itérations [Loke, 2013]. Le résultat de l'inversion est une représentation 2D. Or, l'investigation est une mesure en 3D. Ainsi, l'inversion simplifie en considérant que le milieu est homogène dans la 3e dimension. Typiquement, dans le cas d'ouvrage hydraulique, ce n'est pas vrai puisque dans une direction on trouvera le réservoir d'eau et dans les autres directions, non. L'inversion n'est qu'une représentation simpliste en 2D d'une réalité obtenue par des mesures 3D. Elle n'est pas univoque. Ainsi, certaines imprécisions dans le modèle final existent comme le reflet des incertitudes de mesures et des hypothèses simplificatrices du modèle.

### 3.4 INVERSION DES MESURES

#### 3.4.1.2 Résultats et interprétation de l'inversion

La Figure 3-21 permet de comparer les variations des résistivités apparentes et la distribution des résistivités vraies.

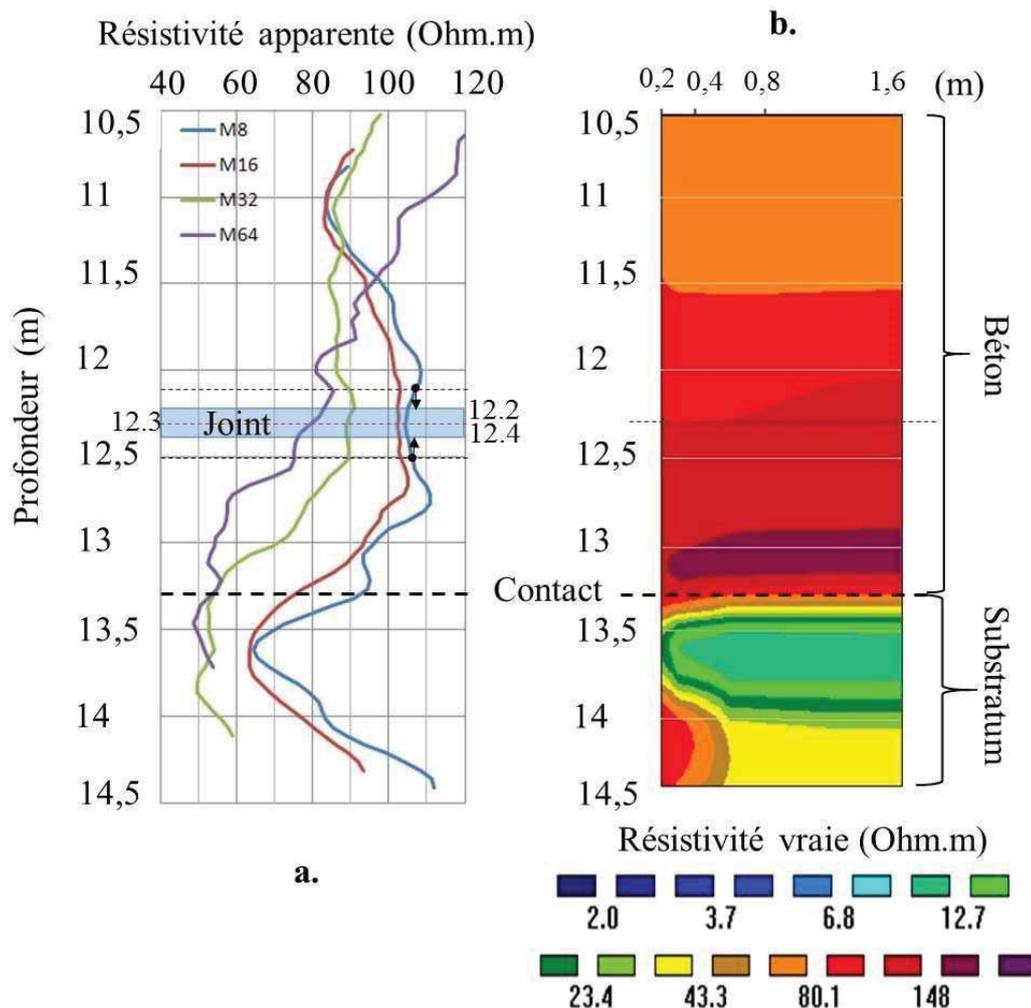


Figure 3-21 : Parallèle entre le log des résistivités apparentes (a.) et le panneau électrique des résistivités vraies (b.)

Le panneau électrique montre une distribution des résistivités vraies en deux gammes de valeurs (deux gammes de teintes). La zone de 10.5m à 13.4m apparaît moins conductrice que celle de 13.4m jusqu'au fond du forage. Cette distinction faite par la sonde normale électrique est le changement de matériau i.e. entre le substratum en partie inférieure et l'ouvrage en béton dans la partie supérieure. La profondeur 13.4 marque le contact entre la roche et le béton. Dans la zone «substratum», on notera que l'inversion marque une zone conductrice de 13.5m à 13.8m avec une résistivité d'environ 10 Ohm.m. Cette observation coïncide avec l'analyse initiale des

variations des résistivités apparentes et la détermination de l'épaisseur de la discontinuité faite précédemment (cf. § 3.3.4 Conclusions).

À -12.3 m, la comparaison avec les diagraphies acoustiques et optiques a montré que la très petite normale (M8) détecte un joint de béton. La réponse électrique identifie une couche équivalente d'une épaisseur égale à 0,20m et une résistivité apparente environ égale à 103 Ohm.m. La résistivité apparente au droit de la discontinuité peut-être comparée avec la véritable résistivité pour obtenir une variation relative. À cette profondeur, la résistivité vraie du béton est égale à environ 110 Ohm.m. La variation relative au droit du joint est de 6.4%.

### **3.4.2 Analyse des résultats de l'enregistrement**

Dans le substratum, entre 13.5m et 13.8m, une zone conductrice est détectée et correspond à deux fissures subhorizontales et une fissure subverticale (Cf. § 3.3.4 Conclusions). Les minces unités conductrices (fissures) ayant une épaisseur inférieure à l'espacement peuvent être détectées, mais leurs caractéristiques ne sont pas atteintes. Serra (1979) définit ces unités par une couche équivalente d'épaisseur au moins égale à l'espacement utilisé. La réponse de la couche est équivalente à la somme des contributions de chaque unité par rapport à leur pourcentage volumique et leur caractéristique. Ainsi, à -13,6 m, l'ensemble des fissures est identifié comme étant une couche équivalente de 30cm avec une résistivité vraie d'environ 10 Ohm.m. Dans le substratum sain, la valeur vraie de la résistivité (fond du forage) n'est pas réaliste du fait d'un manque d'information en limite de maillage. On ne peut donc pas calculer la variation relative. Pour ce cas-ci, la méthodologie ne sera pas appliquée. Cependant, si on note que la réponse de l'outil se traduit sur M8 et M16, au vu des conclusions en modélisation (cf. Chapitre 2), alors le contraste de résistivité est supérieur à 5 et l'extension est supérieure à 0.20m ou 0.40m selon la valeur de contraste. L'ouverture varie entre 0.005m et 0.020m.

Dans l'enregistrement, une discontinuité peut faire l'objet de la méthodologie développée i.e. le joint situé à 12.3m. La baisse de résistivité est seulement remarquable sur l'espacement M8. D'après la Figure 2-26, une information portée seulement sur l'espacement M8 traduit d'une discontinuité soit faiblement contrastée d'ouverture comprise entre [0.005;0.02] soit fortement contrastée, mais de faible ouverture (<0,005 mm). Pour apporter une estimation plus précise sur la quantification de la discontinuité, nous avons proposé d'utiliser la technique d'inversion : le recuit simulé. Cependant, on se retrouve dans le cas où une analyse plus précise semble difficile.

### 3.4 INVERSION DES MESURES

Lors des travaux de modélisation, une seule information importée dans le programme d'inversion n'avait pas donné un affinage de la solution, mais plutôt une infinité de solutions. Il est bien évident qu'il est difficile avec une information de variation relative de trouver une solution et une seule, de trois paramètres.

Afin de tenter d'aller plus loin, nous posons comme hypothèse simplificatrice que la résistivité du joint est égale à la résistivité de fluide de forage soit 10 Ohm.m. Par conséquent,  $C_{vf}$  est égale à environ 10. Si l'on considère que le joint possède une extension infinie, nous avons deux paramètres fixes et un restant à déterminer. La Figure 3-22 montre les variations relatives en fonction de l'ouverture pour un  $C_{vf} = 10$  et une extension infinie. En reportant directement sur le graphique, l'ouverture est estimée à 4mm +/- 1mm. Cette valeur est un bon ordre de grandeur et reste possible. Ce graphique montre également que la dimension de la discontinuité trouvée aurait dû être marquée en M16 avec une variation relative théorique de 3.5%. Les données présentées sur ce graphique proviennent de travaux de modélisation.

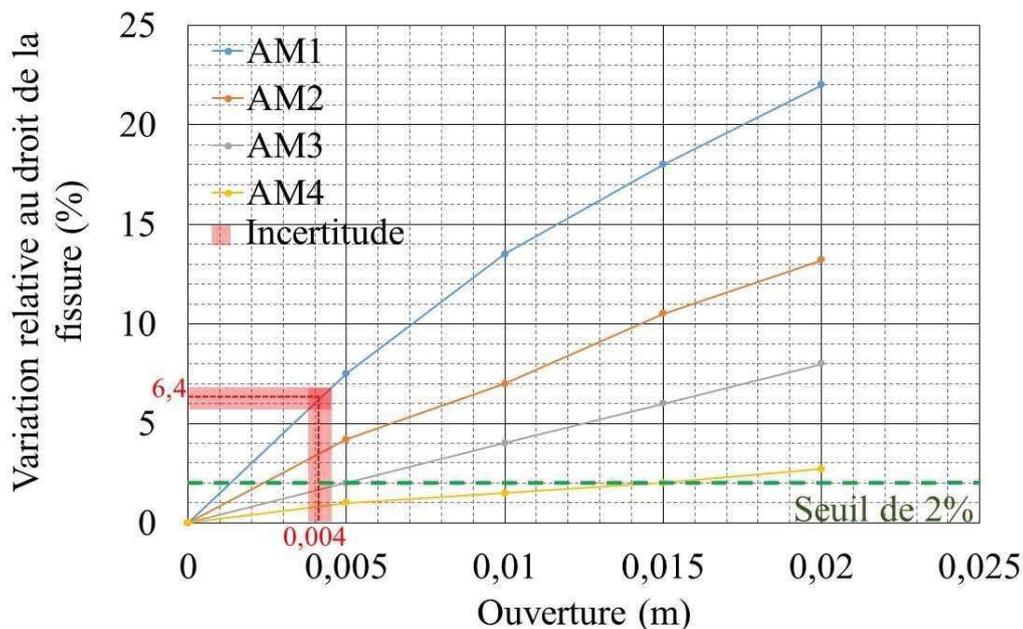


Figure 3-22 : Variation relative au droit du joint en fonction de l'ouverture et pour chaque espacement ( $C_{vm} = 10$ ,  $C_{vf} = 10$  et  $L = \infty$ )

Ce résultat peut être prudemment interprété comme une estimation "en première approche". Cette représentation très simpliste ne tient pas compte du fait que la résistivité des fluides dans la discontinuité peut être différente de la résistivité du fluide du forage. Tout le système est très complexe à représenter, et les propriétés électriques sont en fonction des résistivités électriques

de chaque phase, ainsi que des paramètres géométriques (ouvertures, rugosité, extension, etc.). Quoi qu'il en soit, l'hypothèse faite sur la résistivité de la fissure conduit à une estimation de l'ouverture minimale. Une fissure moins contrastée électriquement doit être plus largement ouverte pour créer le même effet sur l'enregistrement de la résistivité apparente. Avec cette approche, l'ouverture des fissures est idéale. Une fissure réelle présente forcément des pontages et des contacts, à la différence de la fissure idéale. Ainsi, elle doit avoir une ouverture au moins égale à la valeur trouvée, car son contraste électrique est plus faible que le cas « idéal ».

### 3.4.3 Conclusion

La caractérisation de la discontinuité s'appuie sur une inversion des données. Cette étape est essentielle dans le calcul des variations relatives et dans l'analyse conjointe des espacements. Dans cet ouvrage test, la sonde électrique normale détecte des discontinuités et apporte des informations dans l'estimation quantitative. La baisse de résistivité (variation supérieure à 2%, prise comme seuil de bruit) observée en M8 est identifiée comme un joint par les images de la paroi. L'analyse préliminaire a permis de déterminer des gammes de solutions pour chaque paramètre. L'information n'étant portée que sur un seul espacement, le recuit simulé n'a pas été utilisé. Cependant, en apportant des hypothèses sur la résistivité (égale à la résistivité du fluide du forage) et l'extension (infinie) de la discontinuité, les travaux de modélisations donnent une estimation de l'ouverture i.e. 4mm. Ce résultat est une première estimation qui fixe une valeur minimale du paramètre. Dans le cas des discontinuités qui affectent le substratum, la sonde électrique normale les identifie comme une couche équivalente avec une ouverture de 0.30m et 10 Ohm.m. La résistivité vraie du substratum sain n'a pas pu être déterminée, car le forage ne recoupe pas suffisamment la formation géologique. De ce fait, la variation relative ne peut pas être calculée et la méthode ne peut pas être appliquée. Cependant, M8 et M16 détectent la discontinuité et permettent d'établir une première estimation par l'analyse conjointe de chaque espacement. Dans ce résumé de l'analyse des mesures, on se rend compte que les travaux de modélisations sont relativement nécessaires dans la compréhension des données de terrain. En effet, les discontinuités rencontrées ne rentrent pas dans le cas où l'analyse préliminaire de l'enregistrement se combine au recuit simulé. Cependant, l'analyse basée sur la compréhension de la sonde électrique normale donne une première estimation des paramètres des discontinuités. L'analyse parvient à donner des informations essentielles au maître d'ouvrage, mais la méthode mériterait d'être améliorée afin d'affiner cette gamme. Un ou des paramètres du joint sont assez

### 3.4 INVERSION DES MESURES

significatifs pour être détectés par la sonde électrique normale. Ainsi, il serait intéressant de suivre l'état du joint dans les années à venir par cette approche CND. C'est d'autant plus le cas pour la zone de discontinuités affectant le substratum. Visibles sur deux espacements, ces discontinuités peuvent être considérées comme possiblement dommageables à la structure.



## **CHAPITRE 4 VALIDATION DE LA MÉTHODE**

---

Dans le chapitre 3, on montre que la sonde est sensible aux discontinuités. La méthodologie de mesure et la méthode d'interprétation (d'inversion) ont été élaborées sur le cas d'un ouvrage test. Le présent chapitre confronte cette approche à un nouvel ouvrage réel : l'écluse de Côte-Sainte-Catherine. L'ouvrage de validation permet de confronter toute la méthodologie sur site et de tester l'inversion développée sur l'écluse de Saint-Lambert (ouvrage test). Les mesures sont réalisées selon un protocole développé grâce aux études établies précédemment. À partir de ces données, l'analyse des variations relatives de résistivités apparentes est effectuée sur des zones potentiellement endommagées. Puis, l'inversion et l'analyse de l'enregistrement apportent une première estimation de l'ampleur des discontinuités. Par cette nouvelle étude, la méthode montre tout son potentiel, mais révèle des limites dans son exploitation.

## 4.1 Interprétation des variations relatives de résistivité apparente

### 4.1.1 Description du site : Écluse de Côte-Sainte-Catherine

L'écluse de Côte-Sainte-Catherine se situe dans la région montréalaise sur le canal de la Rive Sud à quelques kilomètres de l'écluse de Saint-Lambert. Cet ouvrage massif en béton a des dimensions identiques à toutes les autres écluses composant la Voie Maritime du Saint-Laurent [VMSL, 2005] i.e. 233,5 mètres de longueur, 24,4 mètres de largeur et 9,1 mètres de profondeur. La fondation repose sur un substratum rocheux principalement constitué de calcaire. Deux forages ont été réalisés en 2008 sur les plots 9 nord et 17 nord de l'ouvrage afin d'effectuer des mesures de vitesse acoustique et essais de compression sur les échantillons (Figure 4-1).



Figure 4-1 : Vue satellite de l'écluse de Côte-Sainte-Catherine

Les vitesses moyennes des ondes de compression étaient de l'ordre 4400 m/s et la résistance moyenne en compression unie axiale d'environ 32 MPa. Ces valeurs indiquent un béton de bonne qualité. Les prélèvements de carottes en continu de l'ouvrage ont permis de vérifier que l'ouvrage est peu fissuré [Thivierge, 2011]. Selon les travaux de Thivierge, visuellement, la majorité des joints de coulée semble non-altérés et le substratum rencontré à l'écluse de Côte-Sainte-Catherine est moins fissuré que celui observé à l'écluse de Saint-Lambert. L'imagerie et

## 4.1 INTERPRÉTATION DES VARIATIONS RELATIVES DE RÉSISTIVITÉ APPARENTE

les résultats des essais en laboratoire sont les seules sources d'information sur l'état d'altération de l'écluse de Côte-Sainte-Catherine [Thivierge, 2011].

### 4.1.2 Étude préliminaire

Les mesures sur l'écluse Côte-Sainte-Catherine ont été réalisées en 2013 afin de valider la sensibilité de l'outil face aux discontinuités. La campagne de mesure a pris en compte les conclusions des études préliminaires établies grâce aux investigations sur l'écluse de Saint-Lambert. Ainsi, il a été effectué, sur le nouvel ouvrage, six mesures dans un même forage sur le plot 9. Chacune de ces mesures diffère soit par le calibre de mesure (0-2500 Ohm.m ou 0-250 Ohm.m), soit par le pas de mesure (0.05m ou 0.01m). Les paramètres de mesure et les raisons de ces choix sont résumés dans le Tableau 4-1. Conformément aux conclusions établies dans les chapitres précédents, pour l'ensemble des mesures, l'électrode de retour du courant, B, est plantée dans le sol à 17m du forage, et la mise en place de centreur impose l'excentricité comme minimisée.

	Mode	Pas de mesure	But
Mesure 1	0 – 2500 Ohm.m	0,05 m	Reconnaissance préalable
Mesure 2	0 – 250 Ohm.m	0,05 m	Reconnaissance globale
Mesure 3	0 – 250 Ohm.m	0,05 m	
Mesure 4	0 – 250 Ohm.m	0,05 m	
Mesure 5	0 – 250 Ohm.m	0,01 m	Investigation fine
Mesure 6	0 – 250 Ohm.m	0,01 m	

Tableau 4-1 : Programme de mesure sur l'écluse de Côte-Sainte-Catherine

Au vu de la gamme de résistivité apparente obtenue par la mesure 1, comprise entre 0 et 100 Ohm.m, le mode 0-250 Ohm.m est choisi pour une reconnaissance globale de l'ouvrage (mesure 2, 3 et 4). Les investigations 5 et 6 ont un pas de mesure affiné. Elles sont réalisées dans le but d'apporter de la précision au niveau des discontinuités probables. La Figure 4-2 compare, pour chaque espacement, deux logs de résistivité apparente qui diffèrent par leur pas de mesure : 0.01m et 0.05m. Pour les espacements  $M_8$  et  $M_{16}$ , l'amélioration de la résolution est visible, mais faible. Pour les grands espacements,  $M_{32}$  et  $M_{64}$ , un pas de mesure plus fin n'apporte pas de précision sur les variations enregistrées. Ce sont les mesures avec un pas de 0.01m qui sont choisies par la suite pour les interprétations qualitatives et quantitatives. Ce pas de mesure plus

## CHAPITRE 4 VALIDATION DE LA MÉTHODE

fin est ici utilisé sur l'ensemble de la hauteur du forage. Sur un ouvrage plus grand, le pas aurait pu être utilisé uniquement sur les parties ciblées pour un gain de temps.

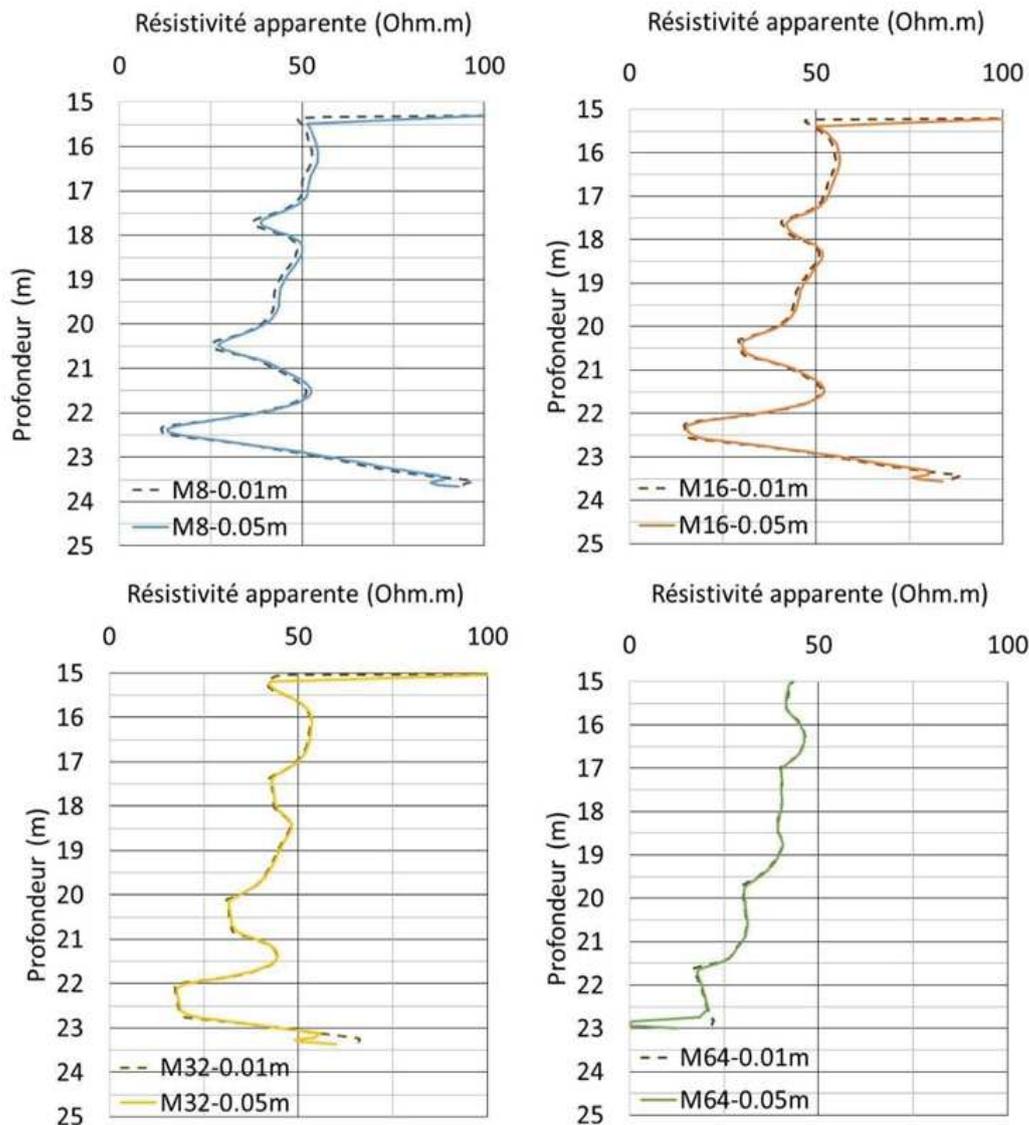


Figure 4-2 : Logs de résistivité avec un pas de mesure de 0.05m et 0.01m pour chaque espacement

Le Tableau 4-2 rapporte le minimum et le maximum des coefficients de variation obtenus pour chaque espacement pour un pas de mesure de 0.05m et 0.01m. Précisons que dans ce cas, les coefficients de variations traduisent la variabilité des mesures à chaque profondeur entre les mesures 2, 3 et 4.

Ce tableau montre une bonne répétabilité des mesures. Les calculs du minimum et du maximum des coefficients de variation montrent que, pour l'ensemble des espacements, le bruit de mesure

#### 4.1 INTERPRÉTATION DES VARIATIONS RELATIVES DE RÉSISTIVITÉ APPARENTE

est compris entre 0.1% et 3 % pour un pas de mesure de 0.05m et entre 0.01% et 2% pour un pas de mesure de 0.01m. Cette comparaison conforte les observations faites sur St-Lambert (un ouvrage du même type) et notamment le niveau de bruit considéré comme inférieur à 2% lorsque le pas de mesure est pris à 0.01m. Même si la différence est minime, elle est non-négligeable dans l'interprétation quantitative qui va suivre. Cette estimation du bruit conditionne l'appréciation ou non de la présence d'une discontinuité. Des variations inférieures à 2% ne permettent pas d'affirmer qu'il y a une discontinuité. Statistiquement, si il y a une variation de + de 2% alors cela correspond à un signal de variation significative de propriétés que nous pouvons traiter comme une discontinuité.

Pas de mesure	Coefficient de variation (%)	M8	M16	M32	M64
Z = 0,05m	Minimum	0,8	0,7	0,1	0,3
	Maximum	2,9	2,4	1,9	2
Z = 0,01 m	Minimum	0,01	0,01	0,01	0,01
	Maximum	1,99	1,75	1,70	1,09

Tableau 4-2 : Estimation du bruit de mesure pour chaque espacement pour un pas de mesure de 0.05m et de 0.01m

En comparant ces résultats avec ceux de Saint-Lambert, on peut se rendre compte que le niveau de bruit sur l'écluse de Côte-Sainte-Catherine est similaire à celui calculé pour l'écluse de Saint-Lambert. Le bruit de mesure de 2%, allant dans le sens de la sécurité, peut-être généralisé sur l'ensemble des ouvrages de type écluse de la Voie Maritime du Saint-Laurent.

#### 4.1.3 Mesures et analyse des résultats

Les résultats présentés sont les mesures de résistivité apparente obtenues lors du cinquième passage de la sonde. La résistivité de l'eau a été, ainsi, mesurée à 1 Ohm.m au niveau piézométrique du forage.

La Figure 4-3 montre les variations de résistivités apparentes corrigées de l'effet de surface et de l'effet de forage pour chaque espacement. La correction de l'effet de forage a pris en compte une eau à 1 Ohm.m et un diamètre de forage de 130mm. Dans une vue générale (Figure 4-3 a.), l'ensemble des courbes traduit les mêmes variations. Cependant, on remarque que les courbes M<sub>8</sub>, M<sub>16</sub> et M<sub>32</sub> sont regroupées alors que M<sub>64</sub> est moins résistif que les résultats des autres espacements. L'hypothèse avancée concernerait la position du forage par rapport au

canal. Situé à 1.6m de forage, le canal perturbe les mesures obtenues par l'électrode M<sub>64</sub>. Il est important de rappeler que le rayon théorique du volume d'investigation est de 2AM. Sachant que l'espacement entre l'électrode de mesure et celle d'injection est de 1.60m, le rayon théorique est estimé à 3.2m. La réponse de l'outil intègre donc, l'information concernant les propriétés de l'eau du canal et abaisse les résistivités apparentes. Cette hypothèse semble être étayée par les valeurs de résistivité avec M<sub>32</sub>. Pour cet espacement, le volume théorique d'investigation est de 1.6m (la distance au canal). En effet, les résistivités apparentes sont légèrement plus faibles par rapport à celles de M<sub>8</sub> et M<sub>16</sub>. Ainsi, on observe déjà, un effet de cette proximité avec le canal.

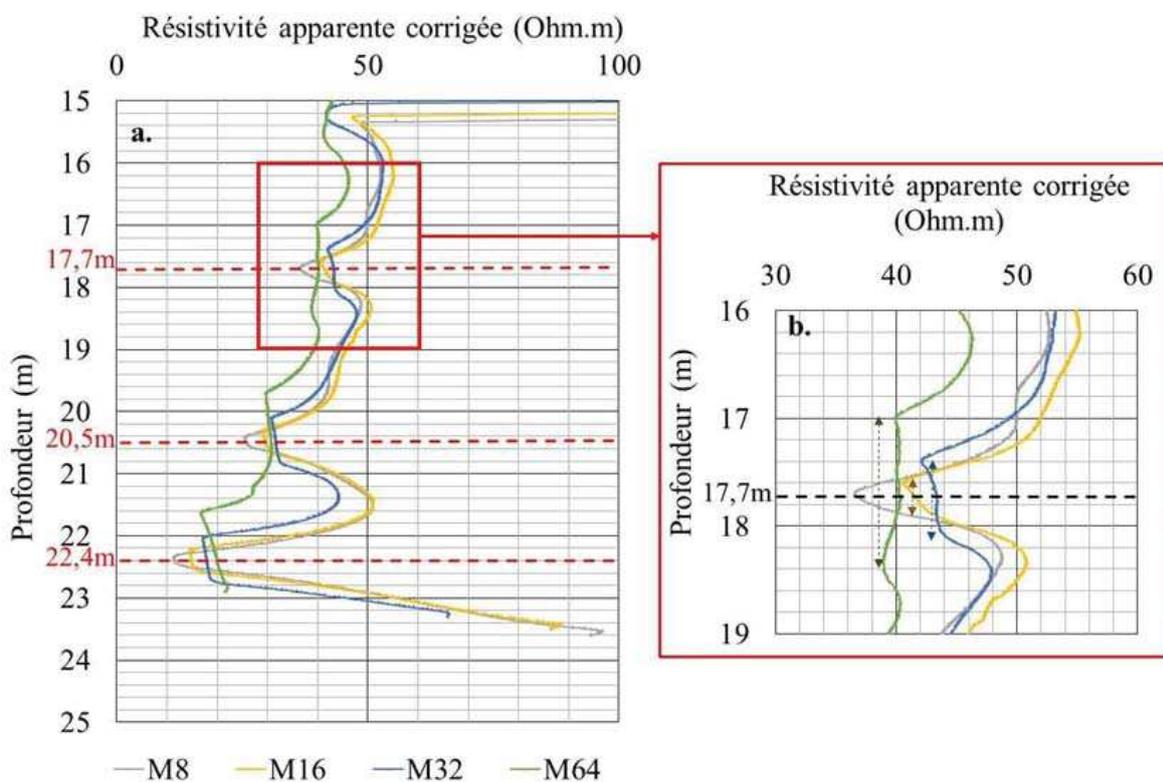


Figure 4-3 : Log des résistivités apparentes corrigées du forage C1 - Côte-Sainte-Catherine – a. Vue d'ensemble et b. Agrandissement entre 16m et 19m

Dans le cas présent, la vue d'ensemble (Figure 4-3 a.) permet de repérer trois chutes de résistivités dont les pics sont à 17.7m, 20.5m et 22.4m de profondeur. Ces baisses de résistivités sont visibles sur les quatre espacements. La Figure 4-3 b. est un agrandissement de la zone comprise entre 16m et 19m. Cette représentation permet, d'une part, d'apprécier une diminution de l'amplitude lorsque l'espacement augmente. D'autre part, l'allure de la courbe dans la zone de plus basse résistivité varie d'un espacement à un autre. Pour M<sub>8</sub>, l'allure de la courbe prend

#### 4.1 INTERPRÉTATION DES VARIATIONS RELATIVES DE RÉSISTIVITÉ APPARENTE

la forme d'un pic. Puis lorsque la résolution verticale diminue, un plateau se forme de longueur environ égale à l'espacement. Ce plateau se creuse ensuite pour les espacements M<sub>32</sub> et M<sub>64</sub>. Cela est conforme à l'analyse faite sur la signature en résistivités des discontinuités conductrices (cf. § 2.3.1.3).

Les observations faites sur ce forage et les résultats en modélisation permettent d'associer ces baisses de résistivité à la présence de discontinuité. Pour confirmer la présence des discontinuités, on décide de s'appuyer sur les résultats de la monoélectrode (Figure 4-4). Le graphique établit une comparaison entre les variations de résistance obtenues par la monoélectrode (courbe rouge) et les variations de résistivité apparente corrigées pour chaque espacement. La monoélectrode permet de vérifier les variations de résistivité apparente mesurées à la sonde normale. Ainsi, les baisses de résistance correspondent aux baisses de résistivité précédemment observées.

L'ensemble des données électriques fait apparaître clairement la présence de discontinuités localisées et marquées par les baisses des résistances/résistivités.

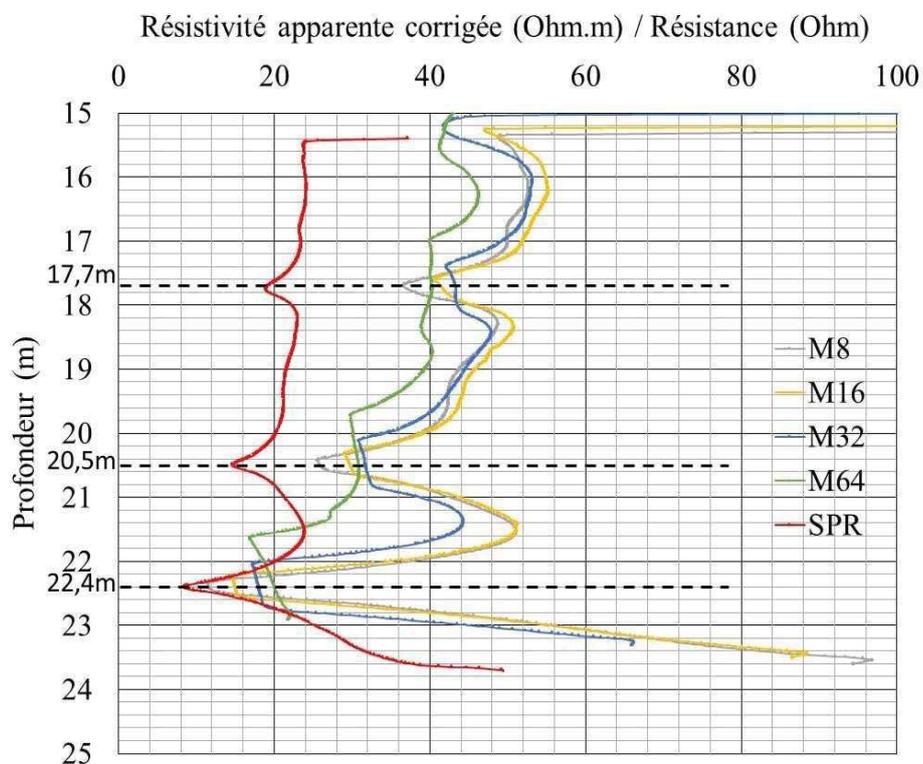


Figure 4-4 : Log de la résistance et Log de la résistivité apparente corrigée

#### 4.1.4 Confrontations Résistivité versus Diagraphie d'imagerie optique et acoustique

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que les diagraphies d'imagerie fournissent uniquement une visualisation de la surface des parois du forage en temps réel. Cette technique apporte des éléments supplémentaires dans une interprétation qualitative. Des données antérieures de 2008 sont disponibles et donnent une image de la paroi du forage fraîchement réalisée. Cependant, si on considère que l'ouvrage peut évoluer, nous avons choisi de réaliser de nouvelles investigations d'imagerie de parois lors de la nouvelle campagne de mesure, en même temps que l'acquisition en résistivité. Cela doit permettre de vérifier que l'état de l'ouvrage n'est pas significativement évolué. Ce choix a pour but d'établir une corrélation pertinente avec les variations de résistivité apparente et d'apporter une information réactualisée.

La Figure 4-5 montre les données d'imagerie acoustique et optique du forage de Côte-Sainte-Catherine. Les résultats sont représentés en niveaux de couleurs traduisant les variations d'amplitudes du signal acoustique. Les couleurs de l'échelle passent ainsi du bleu foncé sur la partie gauche (les faibles amplitudes) au jaune représentant les hautes valeurs (fortes amplitudes). Les faibles amplitudes correspondent à des discontinuités présumées. Ainsi, dans notre cas, on observe trois zones de faible amplitude à (1) 15,5m/16,1m; (2) 19m/19,2m et (3) 20,9m/21,3m ainsi qu'une variation à 23,5m. Cette dernière observation correspond au contact substratum – béton. L'image acoustique obtenue offre une faible résolution ne permettant pas de distinguer la nature des objets détectés N° 1 à 3. Un parallèle est, donc, effectué avec l'imagerie optique, un outil déterminant une visualisation de la paroi du forage. Là encore, la figure b. donne très peu d'information, et ne permet pas d'identifier de discontinuités. L'explication proviendrait du pas de mesure utilisé. Les études sur des essais en laboratoire avec la sonde acoustique, réalisés par Thivierge (2008-2011), montrent qu'un pas de 1.3mm permet de détecter des discontinuités de l'ordre de 3mm à 4mm d'ouverture. De plus, il est également mentionné que pour la sonde optique, un pas de mesure plus faible doit être utilisé pour obtenir des résultats pertinents. Dans notre cas, pour des raisons matérielles, le pas de mesure est choisi à 4mm. On constate d'ores et déjà que le pas de mesure utilisé dans notre investigation est largement supérieur à celui des études antérieures. Notre pas semble donc apte à détecter uniquement les défauts ayant une ouverture supérieure à 4.5mm.

#### 4.1 INTERPRÉTATION DES VARIATIONS RELATIVES DE RÉSISTIVITÉ APPARENTE

Dans les travaux de Thivierge (2008-2011), la profondeur étudiée n'est pas répertoriée et donc interprétée comme si l'auteur n'avait pas pu détecter ou localiser une ou plusieurs discontinuités. Dans ce cas, l'imagerie n'a pas identifié d'endommagement ni lors de la première investigation ni lors de la deuxième.

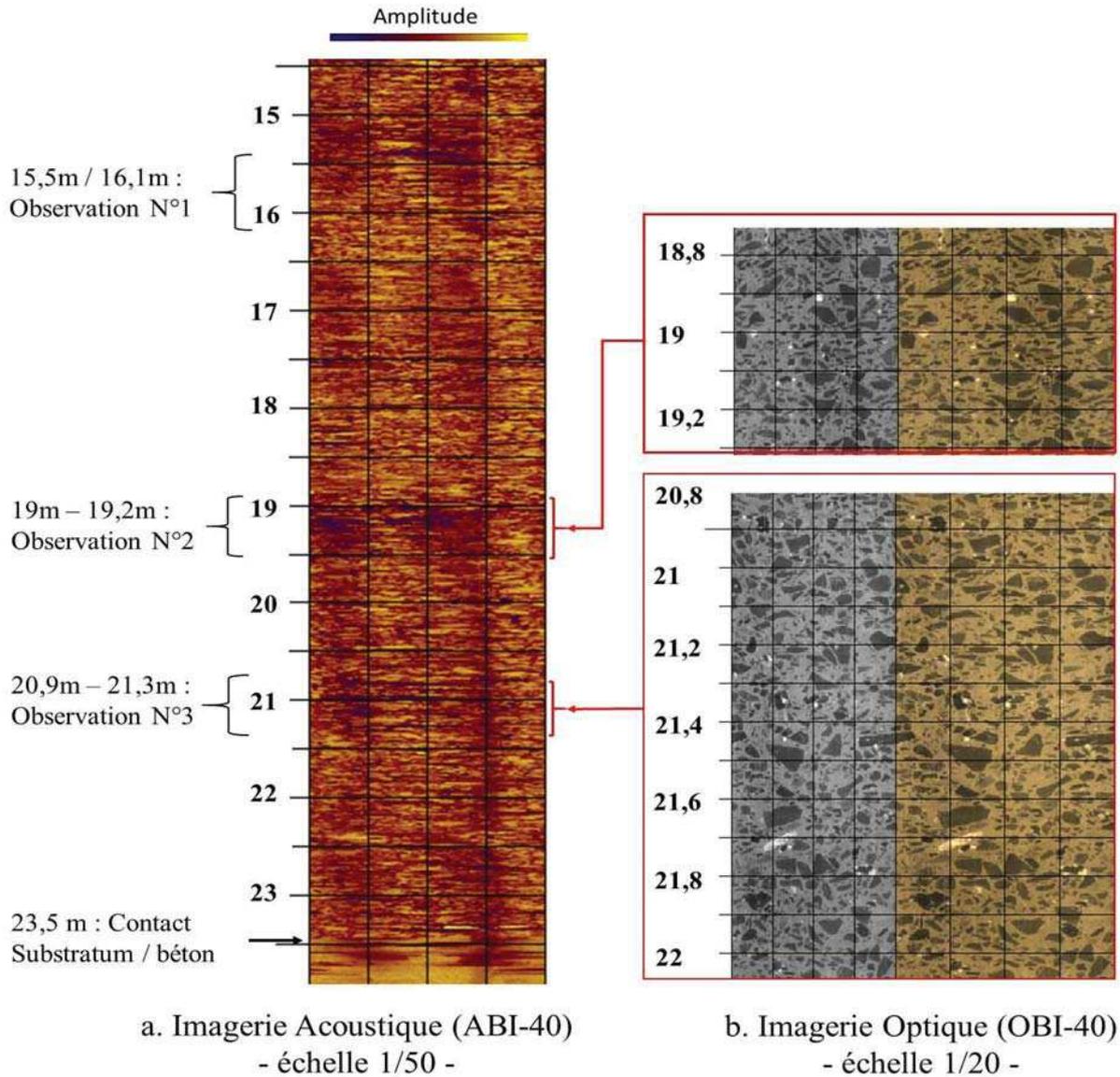


Figure 4-5 : Résultats des diagraphies d'imagerie acoustique (a.) et optique (b.) du forage C1 de Côte-Sainte-Catherine en 2008

## 4.2 Inversion des résultats et diagnostic des discontinuités

### 4.2.1 Résultats et interprétation

Les données de résistivité apparente du forage de Côte-Sainte-Catherine sont donc inversées. Il est important de préciser que les données utilisées sont celles obtenues par  $M_8$ ,  $M_{16}$  et  $M_{32}$ . Les données de  $M_{64}$  étant trop influencées par l'eau du canal, sont écartées pour la détermination des résistivités vraies du terrain.

La Figure 4-6 montre une distribution des résistivités vraies de l'ouvrage. Cette représentation est une coupe longitudinale selon Z et non orientée. Les zones les plus conductrices sont indiquées par des couleurs bleues alors que les couleurs rouges à violettes sont des zones plus résistantes. Dans une vue d'ensemble, il existe un découpage de l'enregistrement en trois parties:

- La zone A de 15.9m à 20.5m avec une résistivité vraie comprise entre 50 et 70 Ohm.m. Elle comprend, elle-même, deux couches plus conductrices : (1) 17.5m/18m et (2) 20m/20.5m avec des résistivités respectives comprises entre 20 et 40 Ohm.m et 5 et 10 Ohm.m.
- La zone B de 20.5m à 22.1m avec une résistivité comprise entre 200 et 250 Ohm.m. Une fine couche conductrice (3) est détectée entre 22.1m et 22.6m avec une résistivité apparente d'environ 1 à 2 Ohm.m. Elle sépare la zone B de la zone C.
- La zone C de 22.6m à 23.6m avec une résistivité d'environ 100 à 150 Ohm.m.

Cette représentation permet d'une part de combiner l'information obtenue par les différents espacements et d'autre part, de compartimenter l'ouvrage en zones conductrices et en zones plus résistantes. Les observations et les premières interprétations sont mises en parallèle avec les données en résistivité apparente. Ainsi, nous décidons de comparer les données inversées à une distance prise arbitrairement à 0.3m du forage avec les données de résistivité apparente obtenues avec les quatre espacements.

La Figure 4-7 montre une comparaison entre les logs de résistivité apparente et de résistivité vraie. Les résultats sont relativement bons. En « s'éloignant » du forage, les résistivités vraies sont comparables à celles proches du forage. Le découpage de l'ouvrage apparaît uniquement selon la verticale.

## 4.2 INVERSION DES RÉSULTATS ET DIAGNOSTIC DES DISCONTINUITÉS

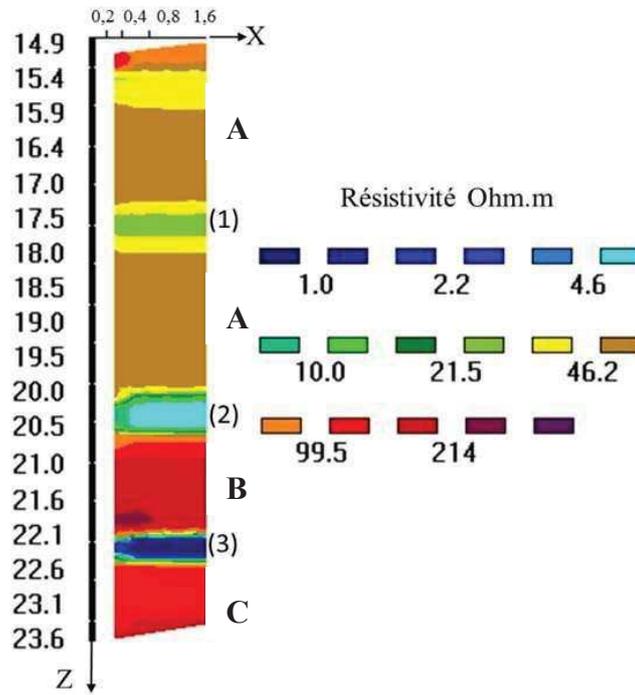


Figure 4-6 : Panneau électrique des données inversées (Itérations : 7 et RMS =4.4%)

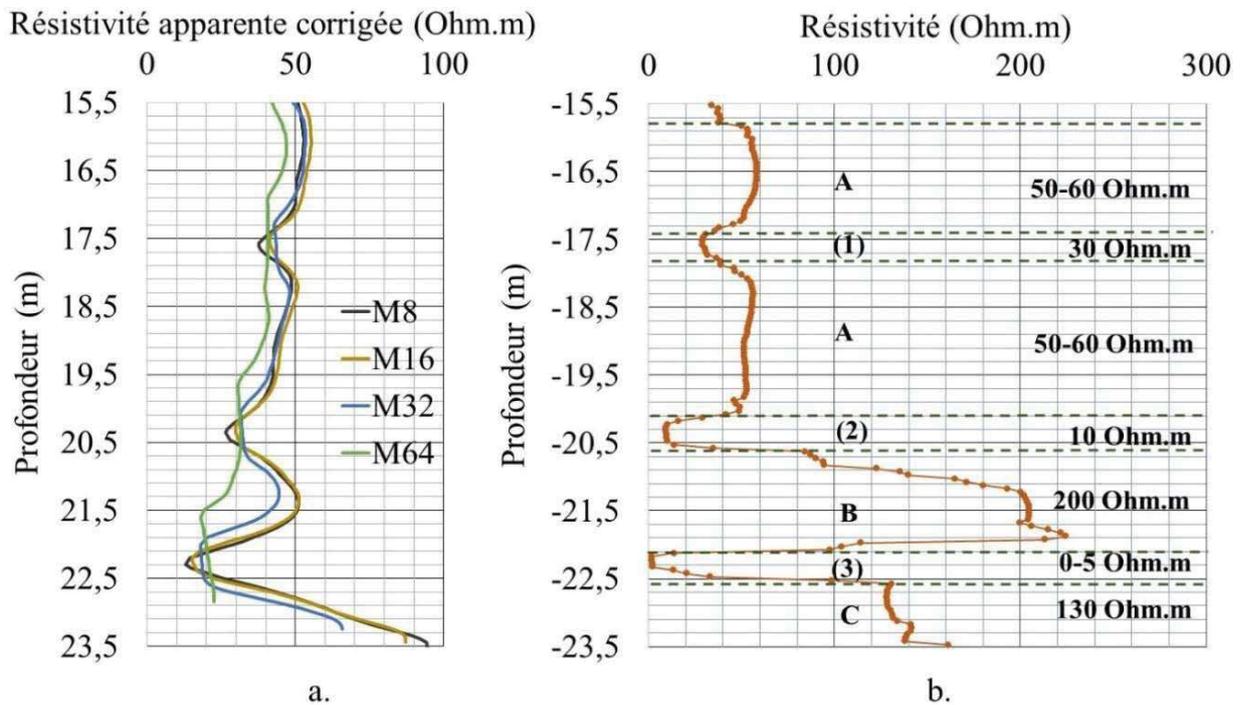


Figure 4-7 : Comparaison des logs de résistivité apparente (a.) et de résistivité vraie (b.)

## CHAPITRE 4 VALIDATION DE LA MÉTHODE

L'ensemble des informations est présenté dans un tableau précisant les profondeurs des zones, leur épaisseur et les résistivités vraies trouvées (Tableau 4-3). Il permet d'apprécier les premières estimations de zones supposées endommagées.

Zones	Profondeur (m)	Épaisseur (m)	Résistivité (Ohm.m)
A	[-15,6;-20,6]	5	50-60
(1)	[-17,4;-17,8]	0,40	30
(2)	[-20,1;-20,6]	0,50	10
B	[-20,6;-22,1]	1,5	200
(3)	[-22,1;-22,6]	0,50	0-5
C	[-22,6;Fond du forage]	1,0	130

Tableau 4-3 : Caractéristiques des zones observées

Toujours dans cette optique de quantification, on peut estimer, également un contraste de résistivité pour les zones conductrices. Si l'on suppose que la valeur moyenne de résistivité du béton sain dans la partie du forage compris entre -15.6m et -20.6m est de 55 Ohm.m alors le contraste de résistivité entre la zone (1) et le matériau est d'environ 1.8. Pour le calcul du contraste de la zone (2), la zone C sous-jacente n'est pas prise en compte. Le contraste est également calculé avec une valeur de béton de 55 Ohm.m. La zone conductrice (2) possède un  $C_{vf}$  d'environ 5.5. En zone (3), le rapport s'effectuera en prenant un béton de 200 Ohm.m (zone B). En effet, la valeur de 130 Ohm.m représentant le fond du forage est certainement une sous-estimation de la résistivité vraie. Le logiciel d'inversion n'a pas pu atteindre la vraie valeur probablement, par manque d'information en limite du maillage. De ce fait, le paramètre  $C_{vf}$  entre la zone B et la couche conductrice est compris entre 40 et 200. Ainsi, en (3), le contraste est supérieur à 40. Les valeurs d'épaisseur ainsi que les contrastes calculés donnent une première estimation des zones conductrices. Si l'on considère que les épaisseurs sont surestimées alors le paramètre de contraste trouvé devient une valeur minimale de contraste.

Les informations de l'espacement  $M_{64}$  ont été modifiées pour une estimation cohérente de la variation relative. On fait l'hypothèse que les mesures en  $M_{64}$  sont perturbées tout le long du forage du fait de la proximité de l'eau du canal. De ce fait, il est possible de penser que la courbe a subi un décalage des valeurs vers de faibles résistivités (Figure 4-8). En ajoutant, une valeur subjective de 4 Ohm.m sur l'ensemble des mesures, la courbe  $M_{64}$  vient se superposer aux autres courbes (Figure 4-8 b.). Une autre forme de correction serait aussi envisageable (utilisation d'un

## 4.2 INVERSION DES RÉSULTATS ET DIAGNOSTIC DES DISCONTINUITÉS

facteur de correction par exemple). Cette correction va permettre de prendre en compte ces données supplémentaires pour étudier les discontinuités avec un maximum d'information. Ainsi, les variations relatives peuvent ainsi être déterminées de façon approximative.

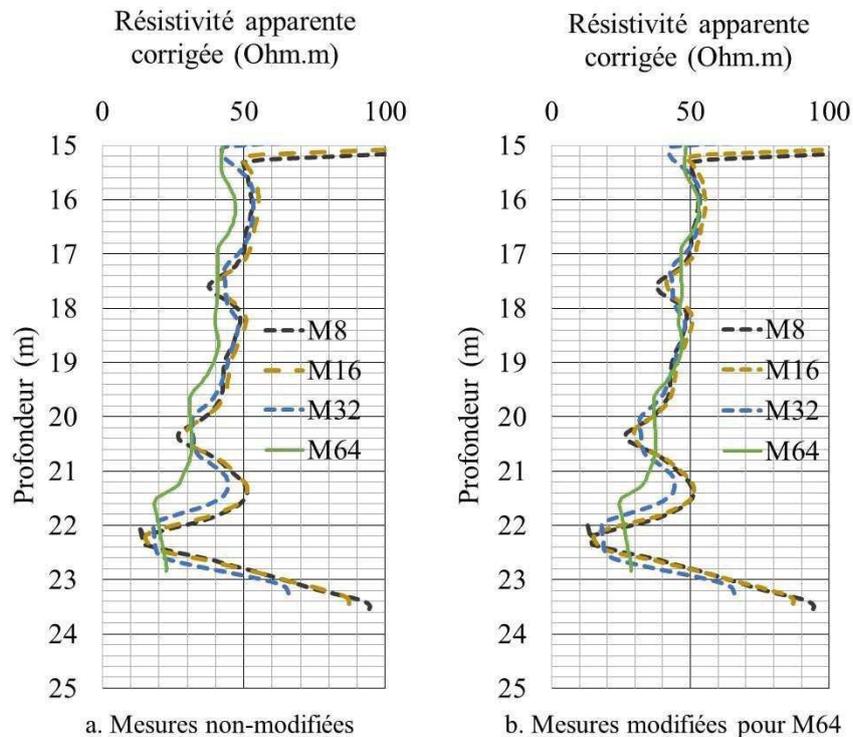


Figure 4-8 : Translation des données obtenues par l'espacement M<sub>64</sub>

Le Tableau 4-4 réunit la résistivité vraie dans la zone considérée, les résistivités apparentes au droit de chaque zone conductrice identifiée pour chaque espacement et les calculs de variation relative associés.

	Résistivité vraie du béton sain (ohm.m)	Résistivité apparente (Ohm.m)				Variation relative (%)			
		M8	M16	M32	M64	M8	M16	M32	M64
Zone (1)	55	37,7	41,7	43,6	46,9	<b>31,5</b>	<b>24,2</b>	<b>20,7</b>	<b>14,7</b>
Zone (2)	55	26,5	30	32,1	37,5	<b>51,8</b>	<b>45,5</b>	<b>41,6</b>	<b>31,8</b>
Zone (3)	200	13,1	15,3	18,4	26,95	<b>93,5</b>	<b>92,4</b>	<b>90,8</b>	<b>86,5</b>

Tableau 4-4 : Calcul de la variation relative au droit des zones conductrices pour les espacements M<sub>8</sub>, M<sub>16</sub> et M<sub>32</sub>

En regardant le Tableau 4-4, on s'aperçoit que la zone (1) dont la baisse de résistivité est moins remarquable que les autres possède des variations relatives comprises entre 31,5% et 14,7%. Ces variations sont relativement élevées. L'explication peut venir de l'effet combiné d'une ouverture, un contraste et une extension importante ou de la valeur de résistivité vraie du béton prise pour le calcul des variations relatives.

### 4.2.2 Analyse des résultats de l'enregistrement

Dans cet enregistrement, les zones conductrices sont détectées par les quatre espacements. Le but est d'estimer, en première approche, les paramètres quantitatifs des discontinuités (ouverture, extension et contraste).

Les discontinuités détectées possèdent un contraste de résistivité avec le matériau supérieur à 10, des ouvertures plurimillimétriques à centimétriques et une extension minimale de 1.6m (cf. chapitre 2 § Figure 2-26). Dans ce cas de figure, il est difficile de définir avec précision l'extension de la discontinuité. Ces valeurs représentent des extensions minimales de la discontinuité et dépendent de la profondeur d'investigation de l'outil. Ici, la sonde atteint sa limite d'investigation et ne permet pas de fournir une valeur tranchée de l'extension. Les enregistrements faits avec les 4 dimensions de sondes (et en prenant compte la correction pour  $M_{64}$ ) permettent d'envisager de lancer le processus de recuit simulé avec les quatre équations. Les paramètres avancés par l'analyse préliminaire i.e. un contraste supérieur à 10, une ouverture comprise entre 5 et 20mm et une extension supérieure à 1.6m sont autant de critères à prendre en compte dans le processus du recuit simulé.

Lors de l'étape du recuit simulé, les variations relatives calculées au droit de chaque zone conductrice pour chaque espacement sont implantées dans la macro et une solution de paramètres de discontinuité est trouvée. Il est important de noter que les variations relatives obtenues sont relativement élevées et n'ont pas été observées dans les travaux de modélisation. De ce fait, il n'est pas surprenant de voir que dès la première identification, zone (1), les paramètres de contraste  $C_{vf}$  et  $h$  atteignent les limites du domaine soit  $C_{vf}=20$  et  $h=0.02$ . Seule l'extension est obtenue à 7.4m.

Pour les deux autres zones, d'amplitude plus importante, le constat est le même i.e. que les solutions atteignent les limites du modèle. Ainsi pour la zone (2) et (3), l'ouverture est considérée supérieure à 0.02m et le contraste, supérieur à 20.

### 4.3 SYNTHÈSE ET DISCUSSION

En ce qui concerne l'extension, les valeurs obtenues sont de 8.6m pour la zone (2) et 9m pour la zone (3). Le Tableau 4.5 résume les résultats annoncés et permet de clarifier les paramètres physiques et géométriques des discontinuités détectées.

	Résistivité du béton sain (Ohm.m)	Résistivité de la discontinuité (Ohm.m)	Ouverture (m)	Extension (m)
Zone (1)	55	< 2,75	> 0,02	7,4
Zone (2)	55	< 2,75	> 0,02	8,6
Zone (3)	200	< 10	> 0,02	9

Tableau 4-5 : Paramètres estimés des discontinuités

### 4.3 Synthèse et discussion

Les observations sont similaires aux résultats de la modélisation d'une discontinuité isolée et idéale avec une ouverture  $h$ , un  $C_{vf}$  et une extension donnés. Ces faits permettent, d'une part, d'affirmer que ces baisses de résistivité témoignent de la présence de discontinuités isolées. D'autre part, cela montre la pertinence des travaux de modélisation sur la réponse de l'outil face à une discontinuité isolée.

Dans cet enregistrement, les diagraphies d'imagerie semblent témoigner de la présence de plusieurs discontinuités regroupées sans certitude. La trop faible fréquence de mesure choisie ne permet pas de trancher sur la question. La sonde électrique normale est, quant à elle, très sensible pour trois profondeurs. L'interprétation quantitative des discontinuités équivalentes localisées à -17.3m, -20.3m et 22.3m suit la méthodologie des travaux de modélisation. La méthode d'inversion utilisée dans le but de définir la résistivité vraie permet de constater la présence de zones de résistivités plus faibles, mais également de déterminer des zones générales plus ou moins saines de béton. Ces valeurs déterminées, la variation relative est calculée et une estimation des paramètres de discontinuités peut être établie. Cependant, on se rend compte que ces valeurs ne correspondent pas au schéma de pourcentage ( $M_8$ ,  $M_{16}$ ,  $M_{32}$  et  $M_{64}$ ) observé lors de la modélisation des configurations ( $h$ ,  $C_{vf}$  et  $L$ ) de fissure. Faisons une comparaison entre les

## CHAPITRE 4 VALIDATION DE LA MÉTHODE

données observées en zone 1 et celles obtenues en modélisation pour une fissure d'ouverture 0,02m,  $C_t/f=20$  et  $L=1,6m$  (cf. Tableau 4-6).

	Variation relative (%)			
	M8	M16	M32	M64
Données de terrain en zone 1	<b>31.4</b>	<b>24.2</b>	<b>20.7</b>	<b>14.7</b>
Données de modélisation	<b>34.7</b>	<b>22.4</b>	<b>12.9</b>	<b>3.6</b>

Tableau 4-6 : Comparaison des variations relatives obtenues sur le terrain ( $\rho_t = 55\text{Ohm.m}$ ) et en modélisation ( $h=0,02m$ ,  $C_t/f=20$  et  $L=1,6m$ )

Si pour les espacements M8 et M16, les valeurs sont cohérentes pour les deux types de données, pour M32 et M64 les valeurs sont très différentes de ce qu'on pourrait attendre. De ce fait, lors de l'application du recuit simulé, la macro trouve pour la zone 1 ainsi que les deux autres zones, une solution égale aux limites du modèle i.e. une ouverture égale à 0.02m, un  $C_{t/f}$  égal à 20. Pour justifier des différences d'amplitude entre discontinuités, la macro affiche des valeurs d'extension différentes et non identifiables par la sonde utilisée (limite du volume d'investigation). L'étude de l'ouvrage de Côte-Sainte-Catherine montre les limites des travaux de modélisations. Il s'agit de savoir si les bornes du modèle des paramètres  $C_{t/f}$  et  $h$  et/ou le choix de la résistivité vraie du béton pour le calcul de la variation relative ne sont pas la ou les causes du problème.

En modifiant la résistivité vraie du béton de 55 Ohm à 48 Ohm, les variations relatives pour chaque espacement est recalculées puis comparées à la réponse d'une fissure d'ouverture 0,02m,  $C_t/f=10$  et  $L=1,6m$  (cf. Tableau 4-7).

Les valeurs sont relativement proches entre les deux types de données pour chaque espacement. On s'aperçoit qu'en faisant varier légèrement la résistivité vraie du béton de quelques Ohm.m, les valeurs de terrain entrent dans notre champ d'observation en modélisation. Les mesures de Côte-Sainte-Catherine soulèvent donc un questionnement sur la sensibilité des variations relatives en fonction des résistivités vraies du béton.

### 4.3 SYNTHÈSE ET DISCUSSION

	Variation relative (%)			
	M8	M16	M32	M64
Données de terrain	<b>21.5</b>	<b>13.1</b>	<b>9.2</b>	<b>2.3</b>
Données de modélisation	<b>21.6</b>	<b>12.8</b>	<b>7.0</b>	<b>1.8</b>

Tableau 4-7 : Nouvelle comparaison des variations relatives obtenues sur le terrain ( $\rho_t = 48$  Ohm.m) et en modélisation ( $h=0,02m$ ,  $C_t/f=20$  et  $L=1,6m$ )

Concernant l'aspect quantitatif, l'analyse préliminaire indique que lorsque la baisse de résistivité est présente sur les quatre espacements, l'extension de fissures est métrique à plurimétrique, l'ouverture est comprise entre 0.005m et 0.02m et  $C_t/f$  est supérieure à 10. L'application du recuit simulé avec les nouvelles variations n'apporte guère de précision comme nous l'avions prédit durant l'approche numérique. Cependant, on s'aperçoit qu'elle permet d'éliminer des discontinuités de 0,005m.

En modifiant la résistivité vraie, à 17,7m, nous avons attesté de la présence d'une discontinuité d'ouverture centimétrique avec une différence de résistivité supérieure à 10. Au vu des faibles variations relatives en M<sub>64</sub>, l'extension est comprise entre 1.6m et 3.2m. Une baisse de résistivité visible sur les quatre espacements justifie que l'extension est supérieure à 1.6m. Cependant, au vu du faible pourcentage en M<sub>64</sub>, l'extension de la fissure ne peut pas excéder 2AM soit 3.2m.

Grâce à ces analyses en forage, on peut affirmer du caractère préjudiciable de la discontinuité à 17,7m. Toutefois, une analyse de la sensibilité des variations relatives en fonction de la résistivité vraie doit être réalisée pour apporter de la précision. Pour les deux autres discontinuités, des informations numériques supplémentaires doivent être fournies pour rendre un jugement sur leur effet sur l'ouvrage notamment en augmentant les bornes des paramètres en modélisation.



## CONCLUSION

---

Cette thèse rentre dans le cadre de préoccupations majeures concernant l'état évolutif des structures massives en béton dans le temps. Nous tentons ici d'apporter des outils supplémentaires aux maîtres d'ouvrage afin d'apporter une aide à la décision sur la gestion économique des structures.

Aujourd'hui, les techniques d'imagerie acoustique et optique figurent parmi les seuls moyens employés pour explorer l'intérieur des ouvrages. Cependant, elles offrent seulement une estimation partielle de l'endommagement avec une image des parois du forage. Les informations apparentes fournies par ces techniques sont insuffisantes pour établir un diagnostic complet de l'état de dégradation de l'ouvrage. Les recherches exposées dans cette thèse ont pour objectif d'apporter des informations supplémentaires aux techniques déjà utilisées. Afin de répondre à ces attentes, les travaux se sont dirigés vers l'exploitation du comportement électrique du béton notamment la résistivité électrique. En effet, dans les études antérieures de surface, la méthode de la résistivité a montré toute sa sensibilité à certains facteurs révélateurs d'une altération (variation de la porosité, présence de discontinuités, etc.). Dans un but d'exploration interne de l'ouvrage, la méthode de résistivité est appliquée par l'intermédiaire de forages préexistants. D'abord développée à des fins pétrolières, la sonde électrique normale est adaptée dans ces travaux. Ces recherches établissent les aptitudes d'une sonde électrique normale à détecter et caractériser des discontinuités dans la structure interne des ouvrages massifs en béton.

La revue des connaissances, développée dans le premier chapitre, a permis de définir l'origine, la nature et les caractéristiques des discontinuités affectant un ouvrage en béton. Cette analyse aide à la compréhension de l'aspect préjudiciable de certaines discontinuités par l'entrée d'agents érosifs (Réseau de fissures, joints ou interfaces roche/béton). Elle permet également de cibler les paramètres de discontinuité utiles aux maîtres d'ouvrage. La revue des connaissances nous a permis de souligner les avantages et les inconvénients rencontrés dans l'emploi de la technique de résistivité en dispositif normal de forage. Si la sonde électrique normale permet de prospecter sur de grands volumes, la résolution verticale diminue, Il sera donc, plus difficile de détecter de fines unités. Lorsque la dimension d'une discontinuité est supérieure à la résolution verticale (2AM), la réponse obtenue est différenciable des autres unités et pourra être analysée.

## CONCLUSION

Par contre, si les discontinuités sont inférieures aux paramètres cités alors les interprétations qualitatives et quantitatives seront difficiles. Ces premières conclusions nous ont donc menés à étudier la problématique par la modélisation.

Les travaux de modélisation ont été une étape essentielle pour corriger les données obtenues par sonde et pour comprendre la réponse de l'outil face à une discontinuité idéale et isolée. Dans une telle configuration, la géométrie et la résistivité du fluide du forage sont des paramètres influençant directement la mesure. Des études sur l'influence du forage ont déjà été établies notamment par le développement d'équation de correction. La modélisation engagée dans cette thèse reprend le raisonnement tout en considérant des contraintes supplémentaires. L'équation de correction établie dans cette thèse prend en compte la géométrie et la physique de la sonde (parties résistantes et conductrices) et donne une correction des mesures adaptée à celle-ci. Au-delà de cette correction, la modélisation a permis d'apporter une connaissance approfondie de la signature de fine couche conductrice. Des études antérieures avaient démontré la sensibilité de la technique face à des ouvertures de discontinuité inférieures à l'espacement. Notre étude va plus loin en prenant des ouvertures très largement inférieures à la discontinuité et en prenant en compte l'effet du forage et de la sonde. L'étude des paramètres d'une fissure conductrice est un autre aspect développé par la modélisation. Elle représente une première étude descriptive d'une discontinuité conductrice en fonction de son ouverture, de son extension et de sa résistivité. La réponse de l'outil est conditionnée par la combinaison de l'ensemble de ces trois paramètres, chacun apportant une contribution notable. Cependant, la modélisation a ainsi révélé le problème récurrent de la non-unicité i.e. pour une réponse diagraphique, plusieurs configurations de paramètres sont possibles. Nous avons donc tenté de réduire l'espace de solution en tirant avantage des informations apportées par chaque espacement de la sonde. Cette analyse a permis d'établir des gammes de solutions. Pour aller encore plus loin, une technique d'optimisation, le recuit simulé a été implémenté. Alors que la méthode fournit de bons résultats lorsque l'information est portée sur deux ou trois espacements, elle n'est pas efficace pour un ou quatre espacements. Une seule information est insuffisante pour converger vers une solution. À l'inverse, lorsque l'information est portée sur les quatre espacements, on a une imprécision des estimations liées indirectement au «trop» d'informations. Ceci est directement lié aux équations intervenant dans le recuit simulé, développées en régression multiple non linéaire. Il est important de noter qu'entre les données obtenues par la modélisation et les données calculées

## CONCLUSION

par les modèles pour certaines configurations, l'écart est non négligeable notamment pour l'espacement M64. Ainsi, lorsque l'on croise les informations des quatre espacements, l'erreur se répercute et donne une autre estimation des paramètres. En rétrospective, il serait bon de redéfinir les équations pour traduire au mieux des données modélisées. Pour cela, un retour en modélisation est suggéré en augmentant le nombre de configurations des paramètres à étudier.

L'application in situ sur l'écluse de Saint-Lambert constitue un ouvrage test démontrant la pertinence des travaux de modélisation et permettant de souligner le potentiel de la sonde électrique normale. Avant d'établir ce constat, un protocole de mesure de la sonde a été mis en place. L'étude de la position de l'électrode B et du bruit est importante pour répondre à une interprétation précise. Il est ainsi préférable de ne pas changer l'emplacement de B en termes de nature d'implantation pour une bonne répétabilité temporelle des mesures. Quant à la quantification du bruit, spécifique à chaque ouvrage, elle aide à la détection de discontinuités. En dessous du seuil de bruit fixé, les variations ne sont plus considérées comme étant le signal d'une discontinuité. En établissant d'une étude comportementale de la sonde dans le milieu d'étude on s'assure d'une analyse non erronée des variations de résistivité. En ce qui concerne les résultats de Saint-Lambert, la sonde électrique normale est sensible à des endommagements. En effet, lors de comparaisons avec la monoélectrode et les diagraphies d'imagerie acoustique et optique, nous avons mis en évidence l'approche qualitative de la sonde. Les discontinuités révélées par les images acoustiques et optiques corroborent avec les observations faites sur les variations de la résistivité électrique. Par la suite, une première approche en quantification est avancée et démontre tout le caractère pertinent en termes de caractérisation de la discontinuité. Malgré des hypothèses fortes, nous avons apporté une première estimation de l'ouverture d'un joint nous assurant d'une quantification minimale du paramètre. Ces données viennent compléter les informations dont dispose le maître d'ouvrage.

La dernière étape de cette thèse a été la validation de la méthode sur un nouvel ouvrage hydraulique : l'écluse de Côte-Sainte-Catherine. Les résultats soulignent de façon plus appréciable la pertinence de la méthode et permettent de conclure sur l'état avancé de la dégradation de l'ouvrage. La sonde électrique a permis de détecter trois zones de faible résistivité, perçue par les quatre espacements. En comparaison avec les résultats de

## CONCLUSION

modélisation, ces signatures témoignent de la présence de discontinuités. Ces endommagements n'ont pas été révélés par les techniques d'imagerie acoustique et optique. En termes de caractérisation l'écluse de Côte-Sainte-Catherine révèle les limites du domaine de modélisation choisie i.e.  $h$  [0.005;0.02],  $Ct/f$  [2;20] et  $L$  [0.1;20]. Au vu des réponses de l'outil, les variations relatives traduisent des paramètres se situant en dehors du domaine étudié. Dans cette interprétation, le domaine étant limité, les solutions trouvées correspondent aux bornes du domaine notamment pour l'ouverture et le contraste. Pour justifier les différences de variations entre les trois discontinuités détectées, c'est l'extension qui varie. Dans ces résultats, on voit là encore la nécessité d'agrandir le domaine des paramètres modélisés.

À court terme, la perspective première est d'effectuer de nouvelles modélisations en agrandissant le domaine des paramètres. Nous pouvons soumettre l'idée d'étudier l'ouverture d'une fissure inférieure à 0.005m et le contraste entre 1 et 100. L'extension possède une gamme assez large, mais il serait préférable d'affiner les valeurs d'extension entre 0.1 et 3.20m (deux fois le plus grand espacement). À partir de là, l'analyse préliminaire doit être reprise et les équations aidant au recuit simulé revue. De par ces nouvelles conclusions, la pertinence de la méthode du recuit simulé dans ce cas pourra à être rediscutée. À moyen terme, il serait intéressant d'effectuer une étude approfondie dans le cas où la résistivité du forage est inférieure à la résistivité du béton et à la résistivité de la fissure. Jusqu'à présent, la configuration étudiée a été celle d'une résistivité fissurale plus faible. Pour aller plus loin, une fissure résistante pourrait être modélisée i.e. agrandir le domaine d'observation du contraste de résistivité entre le béton et la fissure. À long terme, ce travail doit être rapporté dans une modélisation en 3D. En changeant d'espace, des questions comme l'inclinaison pourraient être traitées. De plus, un travail pourrait être effectué concernant l'influence des limites de l'ouvrage sur les mesures faites dans un forage i.e. reproduire en modélisation la configuration réelle de la zone d'étude. On pourrait ainsi, établir un facteur correcteur permettant de corriger les données de l'influence de l'eau du canal et optimiser toutes les informations de la sonde.

En termes d'application in situ, une investigation sur des ouvrages de type barrage serait très porteuse. Elle permettrait d'élargir la validation à des ouvrages représentant un enjeu économique majeur.

## CONCLUSION

La contribution de cette thèse porte essentiellement sur le détournement de la fonction première de la sonde électrique normale i.e. la caractérisation des réservoirs de pétrole ou de gaz et d'aquifères. Dans ces recherches, la sonde montre tout son potentiel pour donner de premières estimations de l'endommagement dans la structure interne d'un ouvrage massif en béton. Cette thèse montre que la résistivité électrique est une méthode pertinente dans la quantification. La pluralité des espacements permet d'aller chercher l'information plus loin dans l'ouvrage. Le couplage d'information est un atout majeur. Il est vrai que la perte de résolution est conséquente, mais à ce jour c'est la seule technique en forage qui mesure des volumes aussi importants.



# ANNEXES

---

ANNEXE 1 .....171

ANNEXE 2 .....172

A- Études sur différents modèles pour M16, M32 et M64

B- Programme du Recuit Simulé sous Visual Basic

ANNEXE 3.....176

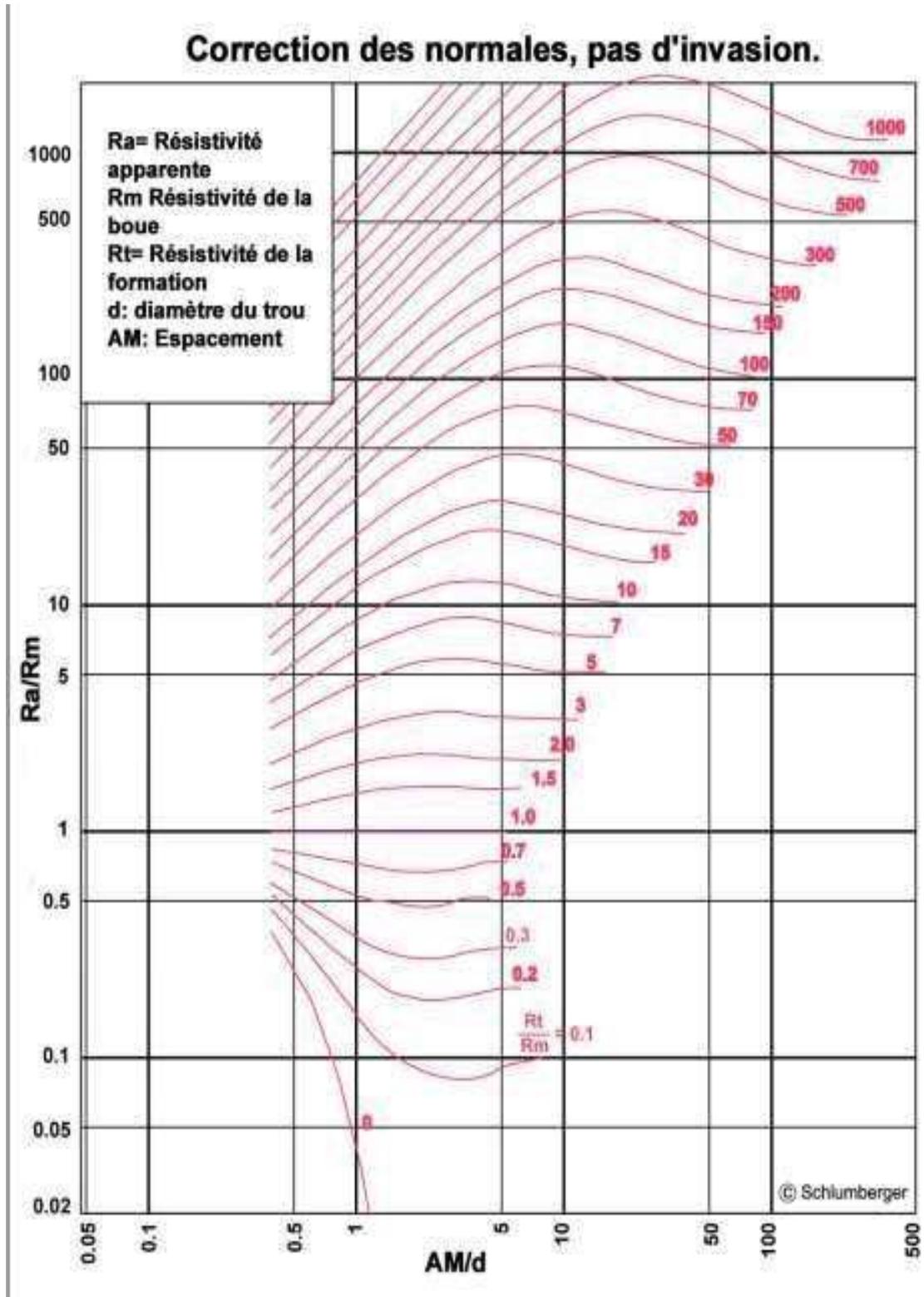
A- Essais en laboratoire sur des échantillons de l'écluse (Rapport VMSL, 2005)

B- Essais Lugeon sur les forages 1, 2 4 et 6 (Rapport VMSL, 2005)

C- Protocole de mesure pour la sonde 2PEA-1000

D- Analyse détaillée de l'enregistrement des forages B5, B3 et B3

## ANNEXE 1 : Abaque de correction développé par Schlumberger

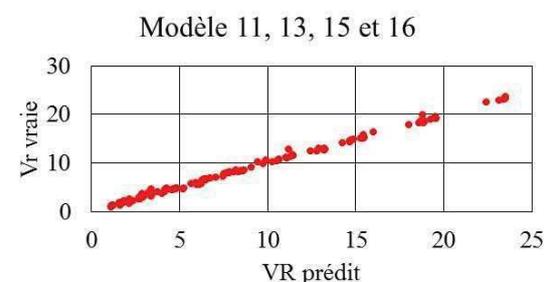
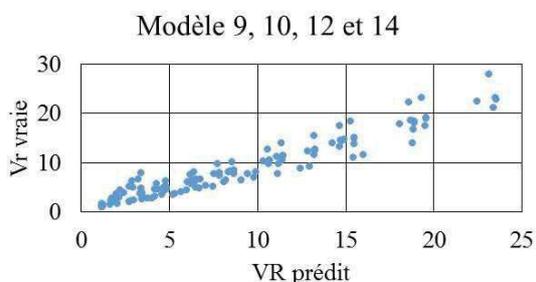
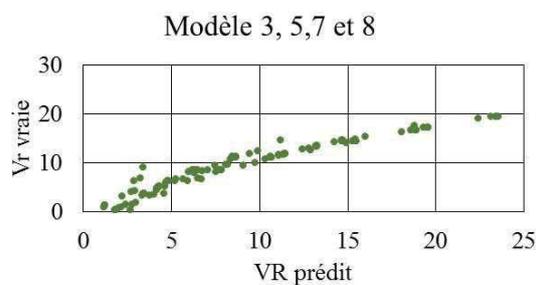
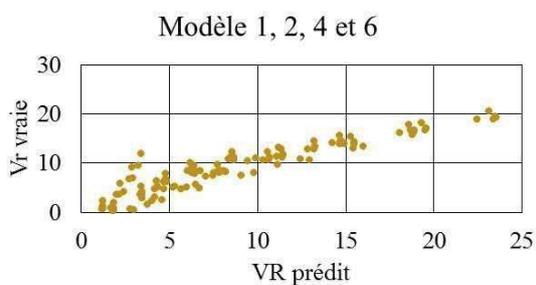


## ANNEXE 2 : Études des équations multiples et non linéaires des espacements M16, M32 et M64

### A - Études sur différents modèles pour M16, M32 et M64

Variable dépendante	Modèles	Variables indépendantes	Coefficients de détermination
Vr	1	Ct/f ; L ; h	0,8581
	2	Log Ct/f ; L ; h	0,8581
	3	Ct/f ; Log L ; h	0,9006
	4	Ct/f ; L ; Log h	0,8581
	5	Log Ct/f ; Log L ; h	0,9006
	6	Log Ct/f ; L ; Log h	0,8581
	7	Ct/f ; Log L ; Log h	0,9006
	8	Log Ct/f ; Log L ; Log h	0,9006
Log Vr	9	Ct/f ; L ; h	0,9068
	10	Log Ct/f ; L ; h	0,9068
	11	Ct/f ; Log L ; h	0,9926
	12	Ct/f ; L ; Log h	0,9068
	13	Log Ct/f ; Log L ; h	0,9926
	14	Log Ct/f ; L ; Log h	0,9068
	15	Ct/f ; Log L ; Log h	0,9926
	16	Log Ct/f ; Log L ; Log h	0,9926

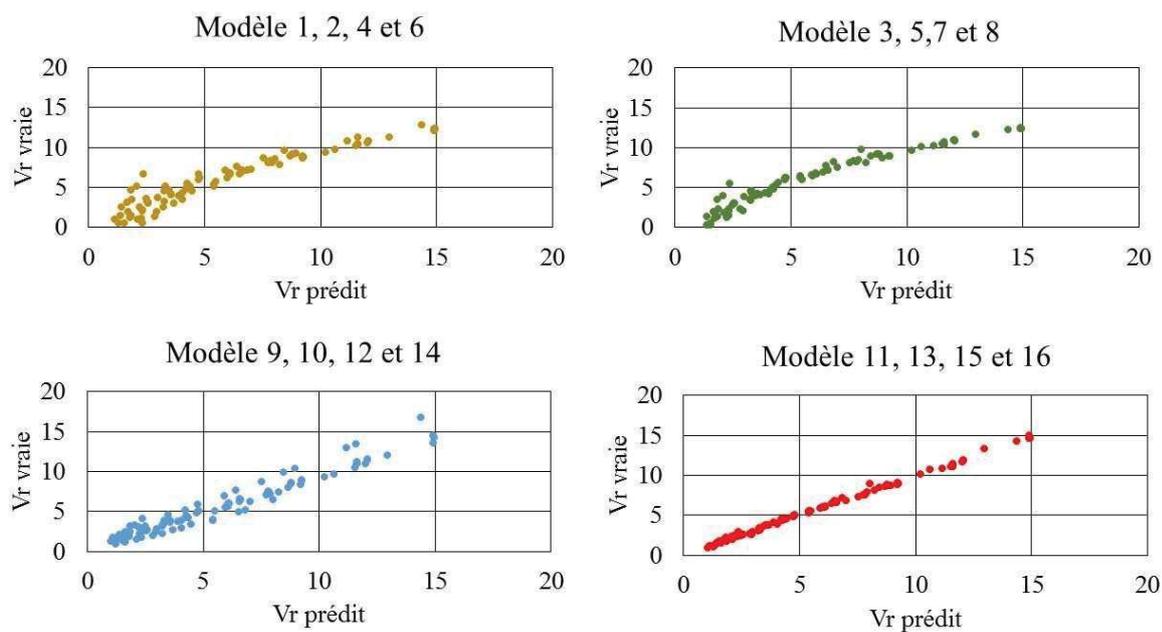
**Coefficients de détermination pour 16 modèles selon les résultats de l'espacement M16**



**Variations relatives observées en fonction des variations relatives prédites par les différents modèles pour l'espacement M16**

Variable dépendante	Modèles	Variables indépendantes	Coefficient de corrélation
Vr	1	Ct/f ; L ; h	0,8833
	2	Log Ct/f ; L ; h	0,8833
	3	Ct/f ; Log L ; h	0,8524
	4	Ct/f ; L ; Log h	0,8833
	5	Log Ct/f ; Log L ; h	0,8524
	6	Log Ct/f ; L ; Log h	0,8833
	7	Ct/f ; Log L ; Log h	0,8524
	8	Log Ct/f ; Log L ; Log h	0,8524
Log Vr	9	Ct/f ; L ; h	0,9227
	10	Log Ct/f ; L ; h	0,9227
	11	Ct/f ; Log L ; h	0,9925
	12	Ct/f ; L ; Log h	0,9227
	13	Log Ct/f ; Log L ; h	0,9925
	14	Log Ct/f ; L ; Log h	0,9227
	15	Ct/f ; Log L ; Log h	0,9925
	16	Log Ct/f ; Log L ; Log h	0,9925

Coefficients de détermination pour 16 modèles selon les résultats de l'espacement M32

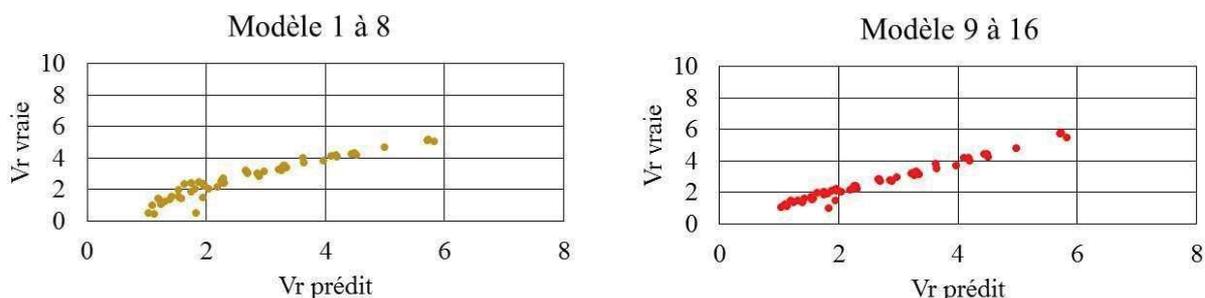


Variations relatives observées en fonction des variations relatives prédites par les différents modèles pour l'espacement M32

ANNEXE

Variable dépendante	Modèles	Variables indépendantes	Coefficient de corrélation
Vr	1	Ct/f ; L ; h	0,9098
	2	Log Ct/f ; L ; h	0,9098
	3	Ct/f ; Log L ; h	0,9098
	4	Ct/f ; L ; Log h	0,9098
	5	Log Ct/f ; Log L ; h	0,9098
	6	Log Ct/f ; L ; Log h	0,9098
	7	Ct/f ; Log L ; Log h	0,9098
	8	Log Ct/f ; Log L ; Log h	0,9098
Log Vr	9	Ct/f ; L ; h	0,9404
	10	Log Ct/f ; L ; h	0,9404
	11	Ct/f ; Log L ; h	0,9404
	12	Ct/f ; L ; Log h	0,9404
	13	Log Ct/f ; Log L ; h	0,9404
	14	Log Ct/f ; L ; Log h	0,9404
	15	Ct/f ; Log L ; Log h	0,9404
	16	Log Ct/f ; Log L ; Log h	0,9404

Coefficients de détermination pour 16 modèles selon les résultats de l'espacement M64



Variations relatives observées en fonction des variations relatives prédites par les différents modèles pour l'espacement M64

B - Programme du Recuit Simulé sous Visual Basic

```
For i = 1 To nbdon
diagdon(i, 1) = Cells(i + 1, 1).Value 'VM_8
diagdon(i, 2) = Cells(i + 1, 2).Value 'VM_16
diagdon(i, 3) = Cells(i + 1, 3).Value 'VM_32
Next i
```

```
For jj = 1 To nbdon
obs(1) = (diagdon(jj, 1))
obs(2) = (diagdon(jj, 2))
obs(3) = (diagdon(jj, 3))
```

```
nbmove = 2000
```

```
'LogL
```

```
bmax(1) = 0.21
```

```
bmin(1) = -0.69
```

```
'Ct/f
```

```
bmax(2) = 20
```

```
bmin(2) = 5
```

```
'h
```

```
bmax(3) = 0.0225
```

```
bmin(3) = 0.0025
```

```
dm(1) = 0.025
```

```
dm(2) = 5
```

```
dm(3) = 0.0005
```

```
nbtemp = 12
```

```
temp(1) = 1
```

```
temp(2) = 0.8
```

```
temp(3) = 0.6
```

```
temp(4) = 0.4
```

```
temp(5) = 0.2
```

```
temp(6) = 0.1
```

```
temp(7) = 0.05
```

```
temp(8) = 0.01
```

```
temp(9) = 0.001
```

```
temp(10) = 0.0001
```

```
temp(11) = 0.000001
```

```
temp(12) = 0.0000001
```

Capture d'écran du paramétrage initial du programme

## ANNEXE

```
For i = 1 To 3
md(i) = (bmax(i) + bmin(i)) / 2
Next
```

### Capture d'écran du modèle initial choisi

```
Sub newmodele(ByRef modeleini, modelesortie)
Dim choix As Integer
Dim signe As Variant
For i = 1 To 3
modelesortie(i) = modeleini(i)
Next i
choix = Int(3 * Rnd + 1)
signe = 0
Randomize
Do
signe = 0
While signe = 0
signe = -2 * Rnd + 1
Wend
modelesortie(choix) = modeleini(choix) + dm(choix) * (signe / Abs(signe)) 'enlève ou ajoute un
incrément dm
Loop Until (modelesortie(choix) <= bmax(choix) And modelesortie(choix) >= bmin(choix))

End Sub
```

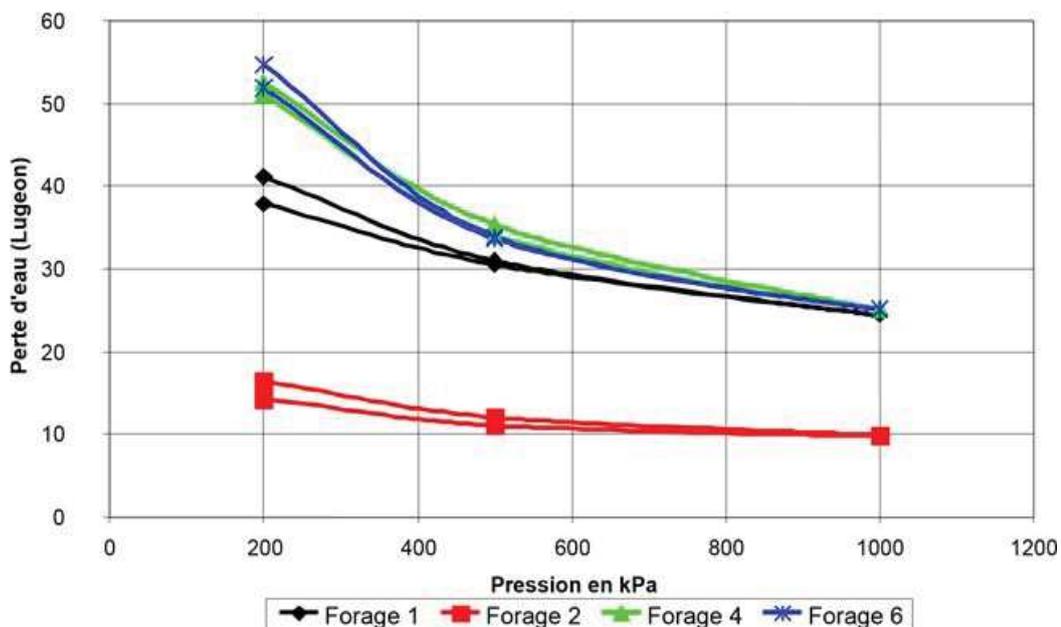
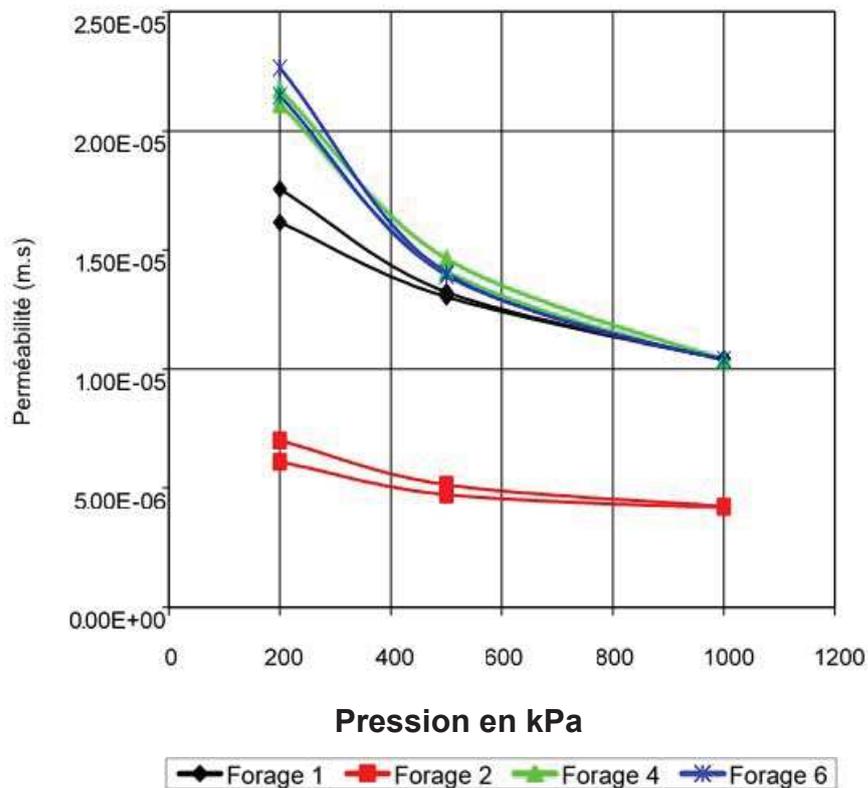
### Capture d'écran du sous-programme engendrant un nouveau modèle

## ANNEXE 3 : Compléments à l'analyse de l'enregistrement sur l'écluse de Saint-Lambert

## A-Essais en laboratoire sur des échantillons de l'écluse (Rapport VMSL, 2005)

ESSAIS		Forage 3					Forage 5					Forage 6					
		moyenne	écart-type	coefficient de variation	valeur min.	valeur max.	moyenne	écart-type	coefficient de variation	valeur min.	valeur max.	moyenne	écart-type	coefficient de variation	valeur min.	valeur max.	
essai non destructifs en laboratoire	Résistivité électrique	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	105,56	28,36	26,87	78,34	198,78	96,36	21,84	22,67	60,69	171,79	98,02	18,56	18,93	72,08	124,71
	Fréquence de résonance	E dyn. long. (MPa)	26,12	5,13	19,63	14,51	33,36	28,94	4,03	13,93	21,75	36,59	28,43	6,45	22,69	16,32	36,40
		E dyn. trans. (MPa)	26,16	5,14	19,65	11,43	32,35	29,75	3,82	12,85	24,07	39,47	28,41	6,15	21,64	17,91	36,58
		v dyn.	0,080	0,106	132,328	-0,098	0,218	0,151	0,126	83,301	-0,006	0,638	0,074	0,246	333,657	-0,369	0,274
	Temps de propagation des ondes primaires et secondaires	vitesse compression (m/s)	4283	382	9	3630	5095	3983	335	8	3442	4693	3947	198	5	3820	4176
		vitesse cisaillement (m/s)	2213	377	17	1662	2840	2232	317	14	1755	2999	1852	114	6	1734	1962
		E dyn. (GPa)	31,92	10,11	31,66	18,11	50,18	30,70	7,55	24,58	19,85	48,45	22,75	2,57	11,30	20,08	25,20
		v dyn.	0,314	0,057	18,312	0,178	0,368	0,266	0,063	23,841	0,086	0,344	0,359	0,011	3,193	0,347	0,370
	Ondes de compression en transmission direct	vitesse de compression (m/s)	4011	598	15	2894	5000	3954	431	11	3163	4682	3734	293	8	3244	4151
	essai destructifs en laboratoire	essai de fendage	ft (MPa)	3,01	0,65	21,51	2,06	3,58	3,19	0,71	22,27	2,34	4,26				
essai de compression uniaxiale		f <sub>c</sub> (MPa)	29,58	6,24	21,11	20,98	45,20	24,95	3,72	14,92	19,66	30,50	26,64	6,07	22,81	22,34	30,93
		E stat. (GPa)	20,72	2,65	12,78	17,10	24,50	18,88	5,79	30,70	13,90	26,60					
		v stat.	0,282	0,070	24,999	0,180	0,370	0,215	0,048	22,306	0,170	0,280					

B- Essais Lugeons sur les forages 1, 2 4 et 6 (Rapport VMSL, 2005)



Perte d'eau dans les forages au contact béton/roc en fonction de la pression

## C- Protocole de mesure pour la sonde 2PEA-1000

Ce protocole a pour but d'indiquer à l'utilisateur la **faisabilité** des mesures, de prendre **connaissance du matériel** utilisé, son **fonctionnement** et **les différentes étapes** à suivre pour réussir les investigations en forage.

Chaque section est suivie de **préconisations** préalablement établies grâce à des études sur le terrain référées en annexe.

### Conditions générales

#### *Un forage rempli d'un fluide*

- La diagraphie électrique s'effectue dans un forage noyé d'un fluide. Ce dernier va, d'une part, faciliter la pénétration du courant dans la structure et d'autre part, servir de fluide de saturation dans l'ouvrage. Cette technique ne fonctionne pas dans un forage sec.

#### *Une longueur et un diamètre de forage respectivement supérieur à 15m et 50 mm.*

- La géométrie du forage, de part sa longueur et son diamètre, est un facteur important dans la réalisation des mesures. La taille du dispositif est une contrainte majeure. L'assemblage des différents éléments porte à 9,38 m la longueur totale du matériel inséré dans le forage. Par conséquent, la longueur du forage doit être supérieure à 10 m pour apprécier les variations de résistivité. De plus, le diamètre du forage doit être supérieur à celui de la sonde c'est-à-dire à 50 mm.

#### *La présence d'une prise terre entre 8 m et 25 m du forage*

- La présence d'une prise de terre (sol) proche du forage c'est-à-dire à une distance entre 8m et 25m est fortement conseillé. Cette condition permet de planter l'électrode de retour du courant dans des dispositions optimales pour un bon couplage électrique.

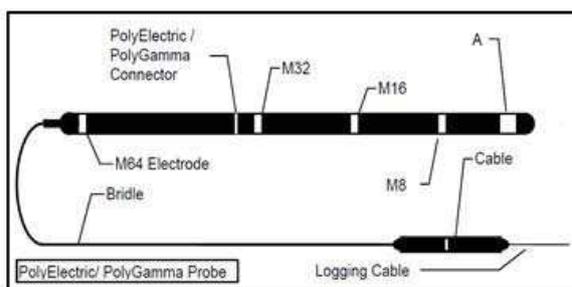
#### *Un forage ne recoupant pas des armatures ou des objets métalliques*

- La présence d'armatures ou objets métalliques est prohibée. Ce type de matériau est fortement conducteur. De cette propriété, le courant injecté circulera dans ce type objet au détriment de l'ouvrage étudié.

## ANNEXE

### Matériel utilisé

#### Sonde 2PEA-1000



#### Bride

#### Treuil Secondaire

#### Câble

#### Treuil Principal

#### Système d'acquisition MGX II

#### Electrode B

#### Ordinateur

- 1- La sonde PolyElectric 2PEA-1000 effectuée lors d'une seule remontée des mesures en monoélectrode, en dispositif normal, en potentiel spontanée et en gamma naturel.

**A** : Electrode émettrice (Dispositif normal) ou 'R' monoélectrode (Single point)

**B** : Electrode retour du courant positionnée en surface = Mudplug

**N** : Electrode de référence

**M8** : Electrode réceptrice séparée de l'électrode A d'une distance de 8" (20cm)

**M16** : Electrode réceptrice séparée de l'électrode A d'une distance de 16" (40cm)

**M32** : Electrode réceptrice séparée de l'électrode A d'une distance de 32" (80cm)

**M64** : Electrode réceptrice séparée de l'électrode A d'une distance de 64" (160cm)

- 2- La bride sert d'intermédiaire entre le câble et la sonde. Constituée de matière isolante, elle évite toutes interactions avec la partie métallique du dispositif. Sa deuxième fonction est d'être porteuse de l'électrode N.
- 3- Le treuil secondaire permet de conduire directement le câble, la bride et la sonde dans le forage. Il évite, ainsi, le frottement du dispositif à même le sol.
- 4- Le câble assure la descente et la remontée de l'outil tout en effectuant une liaison électrique entre la sonde et le système d'acquisition.
- 5- Le treuil principal peut dérouler plusieurs dizaines de mètres de câble.
- 6- Le système d'acquisition MGX II © est un composé électronique moderne permettant de recueillir des informations analogiques et de les transformer en numérique de sorte à être utilisées par un ordinateur.
- 7- Le mudplug représente l'électrode B. Il est directement relié au système d'acquisition et est planté dans le sol afin d'avoir un bon couplage électrique.
- 8- L'ordinateur permet de recueillir toutes les informations de manière numérique à l'aide du logiciel MSlog ©. Ce dernier contrôle également le système d'acquisition et à fortiori, l'enregistrement des mesures.

## Mise en place

- 1- Connection entre la bride et le treuil
- 2- Connection entre la bride et la sonde polyElectric
- 3- Mise en place du système (Mount\_Sopris\_Instrument, 2002):



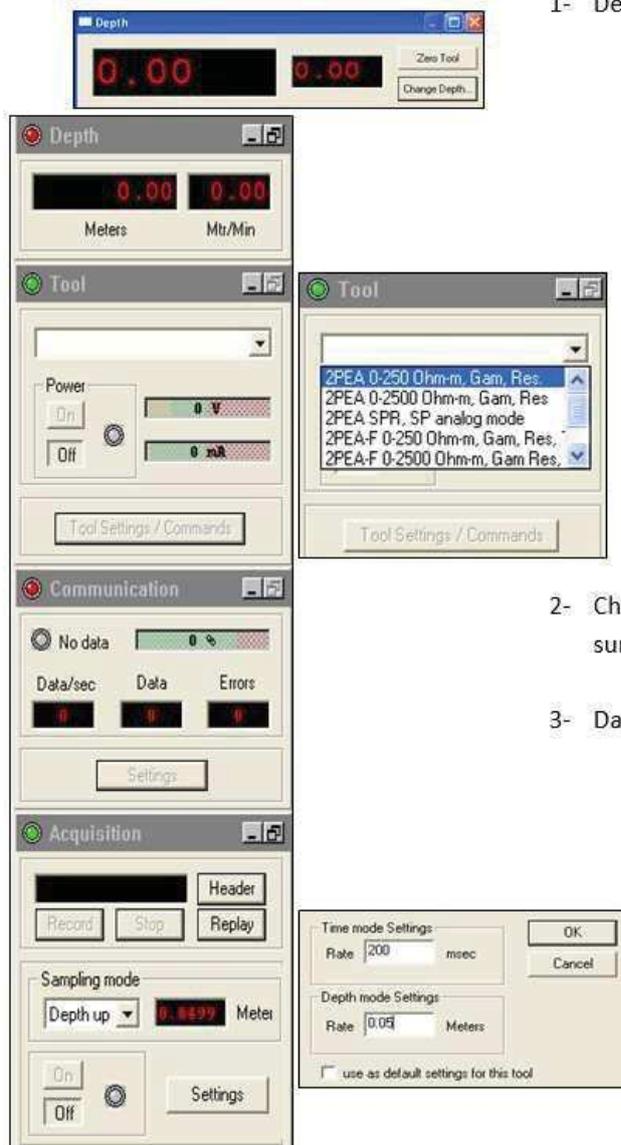
- Connection Mudplug (Electrode B) avec MGX II © (Centrale d'acquisition)
- Connection MGX II avec le treuil
- Connection MGX II avec l'ordinateur
- Alimentation de la centrale et du PC
- Allumer le PC puis le MGX II

- 4- Configuration de la prise d'acquisition (Mount Sopris Instrument, 1998):

- Démarrer le logiciel MSlog © (Mount Sopris Instrument, 1998): Il faut avoir préalablement charger les fichiers de l'outil pour qu'une reconnaissance du PC soit possible
- Mise sous tension de l'outil : Chauffer le système pour de meilleures mesures
- Vérification des communications et du fonctionnement de l'outil
- Mettre l'outil dans le trou du forage et définir le point de référence ; ici la surface du bajoyer.

## ANNEXE

### Acquisition des données



#### 1- Définir la profondeur

- Descendre la sonde jusqu'à la jonction tête de la bride et câble
- Définir le zéro de référence sur MSLog en cliquant en haut de la fenêtre **Depth**
- Descendre la sonde jusqu'au fond du forage
- Noter la valeur et calculer la hauteur réelle du forage. Pour cela, il suffit d'additionner la longueur de la sonde ( $L_s = 1.88$  m), la longueur de la bride ( $L_B = 7.50$  m) et la valeur lue sur le moniteur,  $h$  soit  $H = L_s + L_B + h$ .

#### 2- Choisir la configuration de l'outil dans **Tool** et cliquer sur **On**

#### 3- Dans la fenêtre **Acquisition** :

- Choisir le mode d'échantillonnage **Depth Up**
- Cliquer sur **Setting** et inscrire la fréquence de mesure (0,05 m et 0,01 m)
- Cliquer sur **Record** - une fenêtre d'enregistrement apparaît
- Inscrire le nom du fichier puis cliquer sur **Ok**

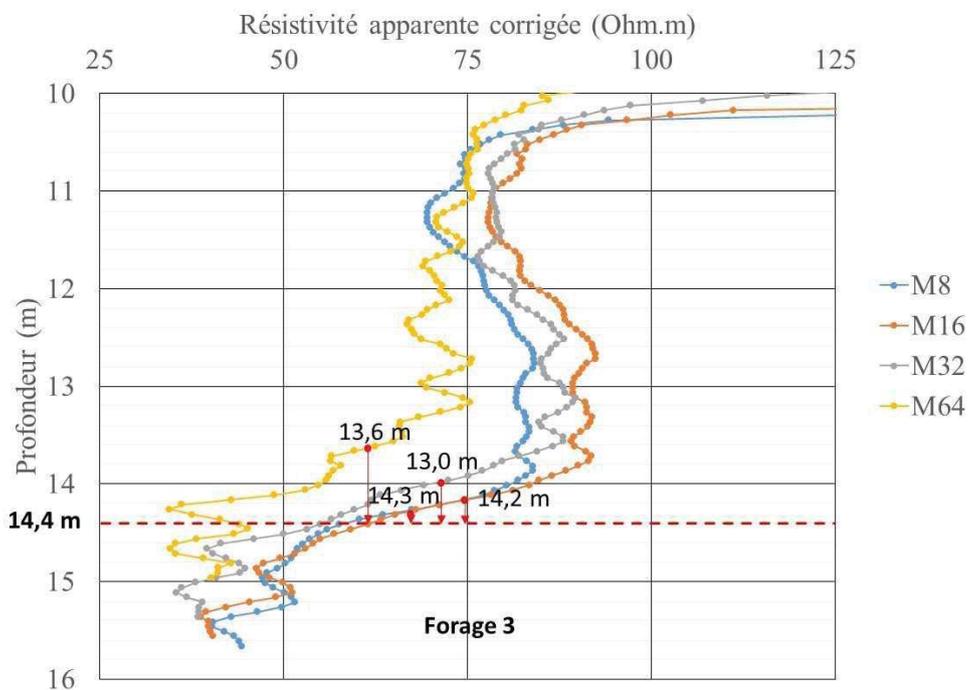
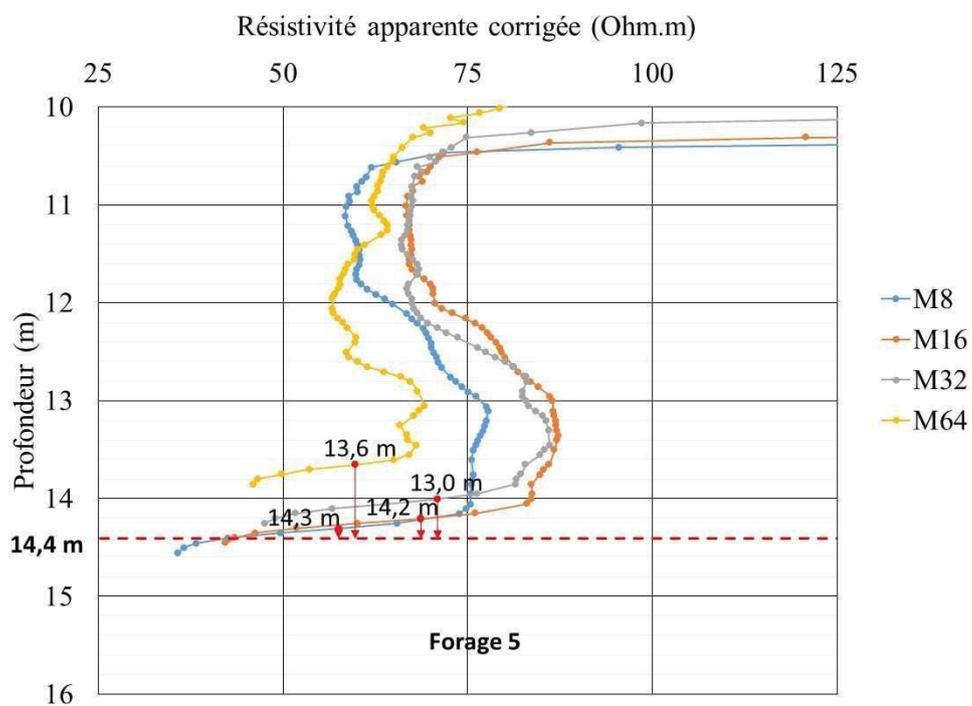
#### 4- Commencer les mesures en remontant le treuil avec une vitesse constante

#### 5- Pour terminer l'acquisition, appuyer sur **Stop**

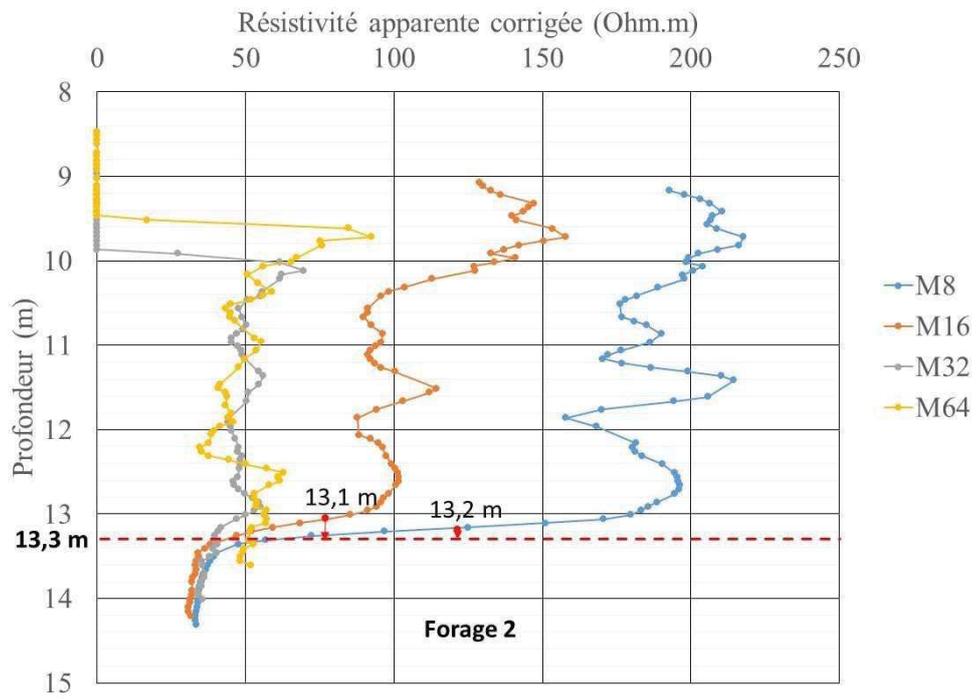
A chaque changement de forage ou de position de B ou lors d'un mauvais fonctionnement de la sonde, Eteindre l'outil en cliquant sur **Off** dans la fenêtre **Tool**.

#### 6- Traitement des données en enlevant le bruit et faire une correction de l'effet de surface et de forage

## D- Analyse détaillée de l'enregistrement des forages B5, B3 et B3



ANNEXE





## LISTE DES RÉFÉRENCES

---

- ACI Committee 224 (1984). *Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures* 211-230 p.
- Aguilera, R. (1979). *Naturally fractured reservoirs*. Petroleum Publishing Company, Tulsa, Okla.,
- Alfano, L. (1962). Geoelectrical prospecting with underground electrodes. *Geophys. Prosp.*, volume 10, numéro 3, p. 290-303.
- Al'Pen, L. M. (1964). On the solution of the fundamental problem of resistivity logging. *Sci. Rep. Izv. Geophys. Ser.*, p. 236-238.
- Anderson, B., Minerbo, G., Oristaglio, M., Barber, T., Freedman, B. et Shray, F. (1992). Modeling electromagnetic tool response. *Schlumberger: Oilfield Review*, volume 4, p. 22-32.
- Anderson, B. I. (2001). *Modeling and inversion methods for the interpretation of resistivity logging tool response*. University of Delft (Netherlands),
- Angulo, B., Morales, T., Uriarte, J. A. et Antigüedad, I. (2011). Hydraulic conductivity characterization of a karst recharge area using water injection tests and electrical resistivity logging. *Engineering Geology*, volume 117, numéro 1-2, p. 90-96.
- Archie, G. E. (1942). The electrical log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Dallas meeting*, p. 54-62.
- Beck, B., Leo, R. et Swift, A. (2008). *Voie Maritime du Saint-Laurent, Dossier : Les pionniers de l'Arctique*. Maritime magazine, Québec, 48 p.
- Beck, M., Girardet, D., Chapellier, D. et Descloîtres, M. (2001). *Diagraphies électriques pour l'optimisation de l'hydrofracturation en zone de socle. Premiers résultats au Burkina Faso*. 1-5 p.
- Bertrand, Y. (1967). *La prospection électrique appliquée aux problèmes des Ponts et Chaussées*, Ministère de l'équipement, Laboratoire central des Ponts et chaussées édition Paris,
- Bittar, M. S., Shattuck, D. P. et Shen, L. C. (1995). Finite-element modeling of the normal resistivity tool in azimuthally inhomogeneous formations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, volume 14, numéro 1-2, p. 59-63.

## LISTE DES RÉFÉRENCES

- Boukhtouta, A. (1993). *Étude numérique de la fissuration dans le béton de masse*. Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec), CANADA,
- Breysse, D. et Abraham, O. (2005). *Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton*, Presses ENPC édition Paris,
- Candansayar, M. E. (2008). Two-dimensional individual and joint inversion of three- and four-electrode array dc resistivity data. *Journal of Geophysics and Engineering*, volume 5, numéro 3, p. 290.
- Centre Saint-Laurent (1996). *Volume 1 : L'écosystème du Saint-Laurent* (Rapport de synthèse du Saint-Laurent). Éditions Multi-Mondes, Montréal,
- Cerny, V. (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman Problem: an efficient simulation algorithm - *Journal of optimization theory and application*, volume 45, numéro 1, p. 41-51.
- Chaussadent, T. (1999). *État des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé*, LCPC Paris édition Paris,
- Daknov, V. N. (1959). *Geophysical well logging* 443 p. p.
- Daniels, J. (1978). Interpretation of buried electrode resistivity data using a layered earth model. *Geophysics*, volume 43, numéro 5, p. 988-1001.
- Denis, A., Breysse, D. et Cremoux, F. (2000). Traitements et analyse des mesures de diagraphies différées pour la reconnaissance géotechnique. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, volume 58, numéro 4, p. 309-319.
- Dennis, B., Standen, E., Georgi, D. T. et Callow, G. O. (1987). Fracture identification and productivity predictions in a carbonate reef complex  
. *Society of Petroleum Engineers Annual - Technical Conference and Exhibition*, p. 16808-MS.
- Desbrandes, R. (1982). *Diagraphies dans les sondages*, Éditions Technip Paris,
- Fournier, B. et Bérubé, M. A. (2000). Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 27, p. 167-191.
- Gaudreault, M. (2000). *The St. Lawrence Seaway (Québec, Canada): A case study in the management of structures affected by alkali-aggregate reaction* (Comptes rendus de la 11e CIRAG) Québec, 179-188 p.

## LISTE DES RÉFÉRENCES

- Gérard, B., Reinhardt, H. - et Breysse, D. (1997). *Penetration and permeability of concrete, Chapitre 8: Measured transport in cracked concrete*, Rilem Report 16 édition
- Gianzero, S. et Anderson, B. (1982). An integral transform solution to the fundamental problem in resistivity logging. *Geophysics*, volume 47, numéro 6, p. 946-956.
- Giroux, B. (2001). *Auscultation des barrages en béton par écoute micro-sismique : Déteabilité et localisation des évènements*- Thèse, École polytechnique de Montréal - Département des génies civil, géologie et des mines, Montréal,
- Gomez-Rivero, O. (1976). A practical method for determining cementation exponents and some other parameters as an aid in well log analysis. *The Log Analyst*, volume 5, p. 17.
- Goncalves, M. I. C., Grossman, J. P., Han, Y., Lim, G. H. W., Meng, Z., Ong, B. W. L. et Tan, Y. (2002). *Resistivity well logging - GIMMC modelling workshop* -1-4 p.
- Gu, P., Xu, Z., Xie, P. et Beaudoin, J. J. (1993). An A.C impedance spectroscopy study of micro-cracking in cement-based composites during compressive loading. *Cement and Concrete Research*, volume 23, p. 675-682.
- Guo, T. R., Tong, L. T., Chiang, L. W. et Yang, C. H. (2011). A fracture study by using bipole–bipole cross-well logging. *Journal of Applied Geophysics*, volume 75, numéro 2, p. 203-210.
- Hallenburg, J. K. (1984). *Geophysical logging for mineral and engineering applications*, PennWells édition
- Hammond, E. et Robson, T. D. (1975). Comparison of electrical properties of various cements and concretes. *The Engineer*, volume 199, p. 78-80.
- Heiland, C. A. (1946). *Geophysical exploration*. Prentice-Hall, New-York,
- ISE (1992). *Structural effect of alkali-silica reaction – technical guidance on the appraisal of existing structures*44 p. p.
- Jamtlid, A., Magnusson, K. A., Olsson, O. et Stenberg, L. (1984). Electrical borehole measurements for mapping of fracture zones in crystalline rock. *Geoexploration*, volume 22, p. 203-216.
- Jobin, H., Bouchard, R. et Babin, D. (2006). *Caractérisation d'un ouvrage hydroélectrique en béton à l'aide de sondes optique et acoustique, barrage de la Chute-du-Diable* Annual Canadian Dam Association Conference 2006,

## LISTE DES RÉFÉRENCES

- Karhunen, K., Seppänen, A., Lehtikoinen, A., Monteiro, P. J. M. et Kaipio, J. P. (2010). Electrical Resistance Tomography imaging of concrete. *Cement and Concrete Research*, volume 40, numéro 1, p. 137-145.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. et Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, volume 220, numéro 4598, p. 671-680.
- Lagabrielle, R. (1999). *Diagraphies et géophysique de forage* 17 p.
- Lapointe, R. (1997). *Contribution à l'étude des méthodes d'injection des fissures dans le béton*. Université McGill, Montréal, Canada,
- Lasfargues, P. (1957). *Prospection électrique par courants continus*. Masson & Cie, Paris,
- Lataste, J. F., Balayssac, J. P., François, D., Bonnet, S. et Rhazi, J. (2005). *Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton armé - Chapitre B6 : méthodes électriques et électrochimiques*, Presses ENPC édition. Presses ENPC, Paris, 275-304 p.
- Lataste, J. F., Breysse, D., Abraham, O. et Fargeot, B. (2001). *Évaluation Non Destructive de l'état d'endommagement des ouvrages en béton armé : Stratégie générale et identification des besoins, COSS' 01, XIXes rencontres universitaires de génie civil*, Lille, 1-6 p.
- Lataste, J. F., Sireix, C., Breysse, D. et Frappa, M. (2002). Fissuration des ouvrages en béton armé : Auscultation par mesure de résistivité électrique. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, volume 239. réf : 4422, p. 79-91.
- Loke, M. H. (2013). Tutorial: 2D and 3D electrical Imaging, 8th edition, Dans [www.geotomosoft.com](http://www.geotomosoft.com) (page consultée le 2013).
- Loke, M. H. et Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo sections by a quasi-Newton method. *Geophys. Prospec.*, volume 44, numéro 1, p. 131-152.
- Luthi, S. et Souhaité, P. (1990). Fracture apertures from electrical borehole scans. *Geophysics*, volume 55, numéro 7, p. 821-833.
- Marecot, L. (2004). *Modélisation directe et inverse en prospection électrique sur des structures 3D complexes par la méthode des éléments finis*. Université de Nantes et de Lausanne,
- Merkel, R. H. et Alexander, S. S. (1971). Resistivity analysis for models of a sphere in a half space with buried current sources. *Geophys. Prosp.*, volume 19, numéro 4, p. 640-651.
- Monfore, G. E. (1968). The electrical resistivity of concrete. *Journal of the PCA research and development laboratories*, volume 10, p. 35-48.

## LISTE DES RÉFÉRENCES

- Mount Sopris Instrument *User Guide : QL40 ABI – Acoustic Borehole Imager Q40 OBI-1000, Optical Televiewer*
- Mount Sopris Instrument (1998). *MSlog v.6 for the MGX II*
- Mount Sopris Instrument Co. (2002). *2PEA-1000 and 2PEA-1000/F PolyElectric Probes*
- Naar, S. (2006). *Évaluation non destructive du béton par mesures de résistivité électrique et thermographie infrarouge passive*. Université de Bordeaux et Université de Sherbrooke,
- Nam, M. J., Pardo, D., Torres-Verdín, C., Hwang, S., Park, K. G. et Lee, C. (2010). Simulation of eccentricity effects on short- and long-normal logging measurements using a Fourier-hp-finite-element method. *Exploration Geophysics, 2010*, volume 41, p. 1-9.
- Neville, A. (1995). Chloride attack of reinforced concrete: an overview. *Materials and Structures*, volume 28, numéro 2, p. 63-70.
- Neville, A. M. (2000). *Propriétés des bétons*, Eyrolles édition, 806 p.
- Niculescu, B. M. (2010). Forward modeling of ultra-long spacing electrical logs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, volume 73, numéro 3–4, p. 238-247.
- Nikkanen, P. (1962). *On the Electrical Properties of Concrete and Their Applications*. Valtion Teknillinen Tutkimuslaitos, Tiedotus, Sarja III Rakennus 60,
- Paillet, F. L., Keys, W. S. et Hess, A. E. (1985). *Effects of Lithology on televiewers-log quality and fracture interpretation* 27th Annual Logging Symposium Transactions, Society of Professional Well Log Analyst,
- Pirson, S. J. (1967). *Geologic well log analysis*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas,
- Ployaert, C. (2010). Limiter la fissuration: Condition indispensable à la durabilité des bétons. *Technologie - Bulletin de la Fédération de l'industrie Cimentière Belge* -, p. 23.
- Rivard, P. (2002), Contribution à l'étude de l'expansion résiduelle des bétons atteints de réactivité alcalis-silice, INSA de Toulouse, Université de Sherbrooke, thèse de doctorat, 245 p.
- Rossi, P. (1988). Fissuration du béton: du matériau à la structure - Application de la mécanique linéaire de la rupture. *LCPC*, volume 150, p. 1-240.
- Roy, A. et Apparao, A. (1971). Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, volume 36, numéro 5, p. 943-959.

## LISTE DES RÉFÉRENCES

- Roy, A. et Dhar, R. (1971). Radius of investigation in dc resistivity well logging. *Geophysics*, volume 36, numéro 4, p. 754-760.
- Schlumberger (1950). *Electrical Well Logging* 72 p.
- Scott, J. H. (1978). *A FORTRAN algorithm for correcting normal resistivity logs for borehole diameter and mud resistivity*. Geological Survey, Box 25046 Federal Center, Denver, Colorado 80225, 1-12 p.
- Serra, O. (1979). *Diagraphies différées - Bases de l'interprétation, Tome 1 : Acquisition des données diagraphiques*, Elf Exploration édition Paris,
- Skalny, J., Marchand, J. et Odler, I. (2002). *Sulfate Attack on Concrete*. Spon Press, London and New-York,
- Snyder, D. et Merkel, R. (1973). Analytic models for the interpretation of electrical surveys using buried current electrodes. *Geophysics*, volume 38, numéro 3, p. 513-529.
- Taillet, E. (2010). *Application de méthodes de diagraphie électrique pour la caractérisation de fissures dans les massifs de béton et les massifs rocheux* (Stage) Université de Bordeaux et Université de Sherbrooke, 1-72 p.
- Taillet, E., Lataste, J., Rivard, P. et Denis, A. (2014), Non-destructive evaluation of cracks in massive concrete using normal dc resistivity logging. *NDT&E International*, volume 63, p. 11-20.
- Telford, W. S., Geldart, L. P. et Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*, Cambridge University Press édition
- Thivierge, P. (2011). *Caractérisation des infrastructures à l'aide des diagraphies d'imagerie optique et acoustique*. Maitrise, Université de Sherbrooke - Département de Génie civil - , Sherbrooke,
- Thomas, T. C. et HSU, T. T. C. (1963). Mathematical analysis of shrinkage stresses in a model of hardened concrete. *ACI Journal Proceedings*, volume 60, numéro 3, p. 371390.
- Thomas, T. C., Slate, F. O., Sturman, G. M. et Winter, G. (1963). Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strain Curve . *ACI Journal Proceedings*, volume 60, numéro 2, p. 209-224.
- Tikhonov, V. I. et Zakharov, Y. E. V. (1977). Solution of electrical prospecting for inhomogeneous media. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, volume 13, p. 833-839.
- Torrijos, M. C., Giaccio, G. et Zerbino, R. (2010). Internal cracking and transport properties in damaged concretes. *Materials and Structures*, volume 43, numéro 1, p. 109-121.

## LISTE DES RÉFÉRENCES

- Tsang, L., Chan, A. et Gianzero, S. (1984). Solution of the fundamental problem in resistivity logging with a hybrid method. *Geophysics*, volume 49, numéro 10, p. 1596-1604.
- Tselentis, G. A. (1985a). An investigation of the relation between fissure flow and degree of contact area by an electric analogue model. *Journal of Hydrology*, volume 78, numéro 3–4, p. 325-330.
- Tselentis, G. A. (1985b). The processing of geophysical well logs by microcomputers as applied to the solution of hydrogeological problems. *Journal of Hydrology*, volume 80, numéro 3–4, p. 215-236.
- Tselentis, G. A. (1985c). A study of the hydro geophysical properties of fissured aquifers using a double porosity model, . *Journal of hydrology*, volume 78, p. 331-344.
- Tselentis, G. A. (1986). On-site assessment of rock discontinuities from resistivity logs. T-L log: A new logging technique. *Journal of Hydrology*, volume 83, numéro 3–4, p. 269-283.
- Tumidajski, P. J., Schumacher, A. S., Perron, S., Gu, P. et Beaudouin, J. J. (1996). On the relationship between porosity and electrical resistivity in cementations systems. *Cement and Concrete Research*, volume 26, numéro 4, p. 539-544.
- Ulugergerli, E. U. (2011). Two dimensional combined inversion of short- and long-normal dc resistivity well log data. *Journal of Applied Geophysics*, volume 73, numéro 2, p. 130-138.
- Van Golf-Racht, T. D. (1982). *Fundamentals of fractured reservoir engineering*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands,
- Von Gonten, W. D. et Osoba, J. S. (1969). *A method of predicting saturation exponents in logging*, 7 p.
- VMSL (2005). Rapport des forages de surface de Saint-Lambert.
- Wait, J. R. (1970). *Electromagnetic waves in stratified media*, Pergamon Press edition New York,
- Whiting, D. et Nagi, M. (2003). *Electrical resistivity of concrete - A literature Review* 58 p.
- Whittington, H. W., McCarter, J. et Forde, M. C. (1981). The conduction of electricity through concrete. *Magazine of concrete research*, volume 33, numéro 114, p. 48-60.
- Yang, F. et Ward, S. (1984). Inversion of borehole normal resistivity logs. *Geophysics*, volume 49, numéro 9, p. 1541-1548.
- Zhang, G. et Shen, L. (1984). Response of a normal resistivity tool in a borehole crossing a bed boundary. *Geophysics*, volume 49, numéro 2, p. 142-149.

## LISTE DES RÉFÉRENCES

Zhifi, Y. (2004). *Interaction Between Micro-Cracking, Cracking, and Reduced Durability of Concrete: Developing Methods for Quantifying the Influence of Cumulative Damage in Life-Cycle Modeling*. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, west Lafayette, indiana, U.S,