



**HAL**  
open science

# Caractérisation des discontinuités dans le massif rocheux par combinaison de mesures de diagraphies soniques et électriques

Nourhan Tartoussi

► **To cite this version:**

Nourhan Tartoussi. Caractérisation des discontinuités dans le massif rocheux par combinaison de mesures de diagraphies soniques et électriques. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux; Université de Sherbrooke (Québec, Canada), 2023. Français. NNT : 2023BORD0125 . tel-04190315

**HAL Id: tel-04190315**

**<https://theses.hal.science/tel-04190315>**

Submitted on 29 Aug 2023

**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.

THÈSE EN COTUTELLE PRÉSENTÉE POUR  
OBTENIR LE GRADE DE  
**DOCTEUR DE**  
**L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**  
**ET DE L'UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE**

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR  
SPÉCIALITÉS GÉNIE MÉCANIQUE / GÉNIE CIVIL

Par Nourhan TARTOUSSI

**CARACTÉRISATION DES DISCONTINUITÉS DANS LE  
MASSIF ROCHEUX PAR COMBINAISON DE MESURES  
DE DIAGNOSTICS SONIQUES ET ÉLECTRIQUES**

Sous la direction de : Jean-François LATASTE  
(co-directeur : Patrice RIVARD)

Soutenue le 24/05/2023

Membres du jury :

|                           |                               |                          |              |
|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------|
| M. LATASTE, Jean-François | Professeur                    | Université de Bordeaux   | Directeur    |
| M. RIVARD, Patrice        | Professeur                    | Université de Sherbrooke | Co-directeur |
| Mme. DOAN, Mai Linh       | HDR. Maîtresse de conférences | Université de Grenoble   | Rapporteuse  |
| M. DUPUIS, J. Christian   | Professeur                    | Université de Laval      | Rapporteur   |
| M. NUTH, Mathieu          | Professeur                    | Université de Sherbrooke | Président    |
| M. SADEK, Marwan          | HDR Maître de conférences     | Université de Lille      | Examineur    |
| M. BUGAREL, Frederik      | Expert Hydrogéologue          | ENGIE                    | Examineur    |
| M. BARBOSA, Nicolás D.    | Postdoctorant                 | Université de Lausanne   | Examineur    |



# Caractérisation des discontinuités dans le massif rocheux par combinaison de mesures de diagraphies soniques et électriques

## Résumé

La présence de discontinuités dans un massif rocheux a un impact significatif sur la stabilité et la résistance mécanique de ce dernier, ainsi que sur la sécurité et la conception de projets impliquant la roche. Dans cette thèse, nous chercherons à caractériser les propriétés des discontinuités, directement dans le massif, par l'utilisation de mesures diagraphiques classiques, avec les sondes Fullwave (FWS) et sonde électrique normale (DN). Le but ultime est de mieux comprendre leur impact sur le comportement du massif et de prendre des décisions éclairées en matière de construction, d'exploitation minière et de gestion des risques géologiques.

Dans cette optique, cette thèse propose une nouvelle méthodologie de caractérisation des propriétés géométriques (ouverture, longueur) et physiques (vitesse de compression, vitesse de cisaillement, masse volumique, résistivité) des discontinuités en combinant les réponses de deux techniques. Les deux outils ont montré leur potentiel de détecter les discontinuités, ainsi que leurs limites à caractériser ces propriétés. La complémentarité des données électriques (DN) et acoustiques (FWS) est exploitée pour surmonter les limites de chaque méthode et bénéficier de leurs caractéristiques distinctes en termes de volume d'investigation, de propriétés détectées et de résolution. Pour cela, les réponses des deux outils sont combinées dans le but de caractériser les propriétés des discontinuités de manière non destructive.

Cette thèse repose sur une première approche numérique qui consiste à modéliser la réponse de deux outils de diagraphie (FWS et DN) face à la présence d'une discontinuité idéale et isolée dans un massif rocheux. Sur la base de l'étude de sensibilité réalisée, cette approche a permis de définir des facteurs de perte acoustique (liés à l'atténuation et au retard des ondes de compression et de cisaillement) et électrique (liés à la diminution de la résistivité). Une base de données numériques de 880 cas issue de l'étude paramétrique, est construite. Des techniques de régressions multiples non linéaires et de réseaux de neurones ont été comparées pour créer des modèles prédictifs visant à diagnostiquer les différentes propriétés de la discontinuité. Les résultats sont ensuite confrontés à une validation expérimentale sur des données réelles réalisées sur un site de calibration à Bells Corners (Ottawa, Ontario, Canada). Les résultats attestent du potentiel de l'approche pour évaluer l'ouverture de la discontinuité à un niveau de précision d'ordre centimétrique.

**Mots clés :** Discontinuité, massif rocheux, diagraphies, sonde électrique normale, sonde Fullwave, modélisation numérique, mesure sur site, combinaison de données.





# Characterization of discontinuities in rock mass by combining sonic and electrical log measurements.

## Abstract

The presence of discontinuities in a rock mass has a significant impact on its stability, mechanical resistance, as well as stability of structures laid on hard rock. The purpose of this research is to investigate these discontinuities with borehole logging techniques in an attempt to better understand their impact on the behavior of the rock mass and to propose an appropriate guideline for construction, mining operations, and geological risk management. In this regard, this thesis proposes a new methodology to characterize the geometric (opening, length) and physical (compression velocity, shear velocity, density, resistivity) properties of discontinuities by combining the responses of two wireline logging techniques, namely [Fullwave Sonic (FWS) and Normal Electrical Resistivity (DN) probes]. These two tools have shown potential in detecting discontinuities, as well as their limitations in characterizing these properties. Therefore, the objective is to combine the response of both tools to overcome the limitations of each method and benefit from their distinct characteristics in terms of investigation volume, detected properties, and resolution, to accurately characterize the properties of discontinuities.

The thesis is based on a numerical approach that models the response of two logging tools (FWS and DN) in the presence of an ideal and isolated discontinuity in a rock mass. This approach defines acoustic loss factors (related to the attenuation and delay of compression and shear waves) and electrical loss factors (related to the decrease in resistivity) and evaluates their sensitivity to the geometric, mechanical, and electrical properties of a filled discontinuity. By conducting a parametric study, a numerical database of 880 cases was built, and techniques such as multiple nonlinear regression and neural networks were used to create predictive models aimed to characterize various properties of the discontinuity. Real FWS and DN log measurements from the Bells Corners calibration site (in Ottawa, Ontario, Canada) were used to validate the developed method. These promising results demonstrate a high potential for identifying discontinuity aperture with centimeter precision.

**Keywords:** Discontinuity, rock mass, borehole logging, normal electrical probe, Fullwave sonic probe, numerical modelling, site measurement, data combination.



# Unité de recherche

Institut de Mécanique et d'Ingénierie, UMR 5295, Département Génie Civil  
Environnemental, Bât A11, 351 Cours de la Libération, 33405 Talence cedex, France  
<http://i2m.u-bordeaux.fr>

Faculté de génie civil, Université de Sherbrooke, 2500 boulevard de L'université, J1K  
2R1, Sherbrooke, Québec, Canada



*À mon petit Abdel-Baset, à mes parents et à mon mari.*



# Remerciements

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers toutes les personnes qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours de thèse. Leur soutien et leur contribution ont été essentiels pour mener à bien ce travail de recherche.

Tout d'abord, je souhaite remercier chaleureusement mes directeurs de thèse, Messieurs Rivard et Lataste, pour leur confiance, leur soutien et leurs conseils précieux. Leur expertise et leur présence régulière ont grandement enrichi mon expérience scientifique et personnelle.

Je tiens également à exprimer ma sincère gratitude envers les membres du jury qui ont évalué et examiné ma thèse. Leurs connaissances et leur expertise ont contribué de manière significative à l'enrichissement de mon travail de recherche. Je souhaite remercier tout particulièrement les rapporteurs, Mai Linh DOAN et J. Christian DUPUIS, pour leur évaluation approfondie de ma thèse et leurs précieux commentaires qui ont contribué à sa qualité. Mes remerciements vont également à Mathieu NUTH, Marwan SADEK, Nicolás D. BARBOSA et Frederik BUGAREL, les examinateurs de ma thèse. Leurs observations et suggestions ont été d'une grande valeur pour l'amélioration de mon travail.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers les équipes remarquables de l'Université de Bordeaux et de l'Université de Sherbrooke. Mes remerciements vont à Isabelle Dusanier pour son aide précieuse dans les démarches administratives interminables, à Bouchra El Oifi pour avoir toujours trouvé un bureau pour moi et à Jean-Christophe Lacasse pour son expérience et son expertise lors des travaux sur le terrain.

Je suis reconnaissant envers les nombreux spécialistes qui ont contribué à la réalisation de ma thèse. Un grand merci au Dr Nicolas Barbosa de l'Université de Lausanne pour son assistance dans le traitement des données acoustiques. Je tiens également à remercier le Dr René Christensen, directeur d'Acculation, pour son aide précieuse dans la finalisation de mon modèle acoustique. Mes remerciements vont également à Heather Crow de la Commission géologique canadienne pour ses conseils et son soutien sur le terrain.

J'exprime ma gratitude envers le Dr Safwan Chahal, mon professeur au Liban, pour son soutien constant et sa motivation. Je souhaite également remercier Tarudati pour son amitié précieuse et son soutien inébranlable.

Une thèse en cotutelle implique d'avoir deux familles dans deux pays différents. À Sherbrooke, je n'oublie pas le couple accueillant, Wadad et Khaled, qui m'a chaleureusement accueilli au Canada. Je n'oublie pas non plus ma famille sherbrookoise, Amine, Sibel, Zahya, Paul, Hannah, Tamara, Ahmad, Montassar, avec qui j'ai partagé d'agréables moments. À Bordeaux, j'ai eu la chance de rencontrer une amie extraordinaire et une sœur de cœur, Habiba. Je te suis infiniment reconnaissante pour ton soutien tout au long de ces trois années de thèse. Je remercie également mes collègues et amis de laboratoire, Fabien, Nathalie, Wafaa, Sara, Axelle, Lucas, Reno, Ali, Amal, Amine, Lisa, Marie, Colin, pour avoir apporté joie et convivialité dans cette aventure doctorale. (Je présente mes excuses si j'ai omis de mentionner quelqu'un).

Je souhaite remercier tout particulièrement Abdallah. Tu as toujours été là pour moi, me portant et me soutenant afin que je puisse achever mon travail à temps. Je te suis



reconnaissante pour ta patience, ta tendresse, ton soutien et ton amour. Je ne saurai jamais comment te remercier. Je t'aime de tout mon cœur.

Mon petit Abdel Baset, je te suis infiniment reconnaissante de me donner la force et la motivation pour mener à bien ma thèse. Merci de m'accompagner dans cette aventure, même avant ta naissance.

Enfin, un immense MERCI à mes parents Mossaab et Ihsan TARTOUSSI. Merci pour votre amour constant. Vous m'avez permis de réaliser mes aspirations et de poursuivre jusqu'au bout pour atteindre mon rêve. Je suis extrêmement fière d'être votre fille et j'espère vous rendre fiers de moi. Israa, Rawan, Bouchra, Najah, Hazar, Youssef, Sabira, Mozhar, Mohamad, Jad, vous êtes exceptionnels. Sachez que je pensais à vous à chaque instant de cette journée. Je vous aime infiniment.

Merci à TOUS !

# Table de matières

|  |    |
|--|----|
| Résumé .....   | 3  |
| Abstract.....  | 5  |
| Remerciements .....  | 11 |
| Table de matières.....   | 13 |
| Liste des figures.....   | 15 |
| Liste des tableaux .....   | 19 |
| Liste des symboles.....  | 21 |
| Chapitre 1 : Introduction .....  | 23 |
| 1.1. Mise en contexte .....  | 23 |
| 1.2. Problématique et objectif .....   | 24 |
| 1.3. Organisation du travail.....  | 25 |
| Chapitre 2 : Revue de connaissances.....   | 27 |
| 2.1. Les massifs rocheux.....  | 27 |
| 2.1.1. Propriétés physiques des roches .....                                       | 27 |
| 2.1.2. Discontinuité de la matrice rocheuse.....                                   | 35 |
| 2.1.3. Synthèse.....   | 37 |
| 2.2. Diagraphies .....   | 37 |
| 2.2.1. Méthodes de diagraphies utilisées pour caractériser les discontinuités..... | 39 |
| 2.2.2. Diagraphie acoustique .....   | 41 |
| 2.2.3. Diagraphie électrique.....  | 45 |
| 2.2.4. Discussion : Complémentarité des méthodes de diagraphies.....               | 51 |
| 2.3. Approche méthodologique.....  | 55 |
| Chapitre 3 : Modélisation des réponses diagraphiques .....                         | 57 |
| 3.1. Modèle acoustique .....   | 58 |
| 3.1.1. Présentation du modèle acoustique sonique .....                             | 58 |
| 3.1.2. Validation du modèle numérique .....  | 62 |
| 3.1.3. Position de la discontinuité.....   | 64 |
| 3.1.4. Étude paramétrique.....   | 66 |
| 3.1.5. Quantification de la perte de transmission acoustique .....                 | 67 |
| 3.1.6. Incertitude du traitement des données acoustique .....                      | 70 |
| 3.1.7. Résultats et discussion .....   | 71 |
| 3.1.8. Synthèse.....   | 80 |
| 3.2. Modèle de résistivité.....  | 81 |
| 3.2.1. Présentation du modèle électrique.....                                      | 81 |
| 3.2.2. Validation du modèle numérique .....  | 84 |
| 3.2.3. Correction des données diagraphiques .....                                  | 84 |

|                  |   |     |
|------------------|---|-----|
| 3.2.4.           | Position de la discontinuité.....                       | 85  |
| 3.2.5.           | Étude paramétrique.....                                 | 87  |
| 3.2.6.           | Quantification de la perte de résistivité .....         | 87  |
| 3.2.7.           | Résultats et discussion .....                           | 87  |
| 3.2.8.           | Synthèse.....   | 92  |
| 3.3.             | Conclusion .....  | 93  |
| Chapitre 4 :     | Analyse et combinaison des données .....                | 95  |
| 4.1.             | Construction de la base de données .....                | 95  |
| 4.2.             | Analyse de données .....                                | 96  |
| 4.2.1.           | Présentation de l'objectif.....                         | 96  |
| 4.2.2.           | Test de corrélation .....                               | 98  |
| 4.2.3.           | Analyse en composantes principales ACP .....            | 107 |
| 4.2.4.           | Régression simple.....                                  | 109 |
| 4.3.             | Combinaison des données.....                            | 111 |
| 4.3.1.           | Régression multiple non linéaire .....                  | 112 |
| 4.3.2.           | Réseaux de neurones artificiels .....                   | 118 |
| 4.3.3.           | Comparaison et discussion .....                         | 123 |
| 4.4.             | Conclusion .....  | 128 |
| Chapitre 5 :     | Application en situ et validation .....                 | 131 |
| 5.1.             | Présentation du site et des mesures .....               | 131 |
| 5.1.1.           | Site de calibration <i>Bells corners</i> .....          | 131 |
| 5.1.2.           | Déroulement des essais.....                             | 137 |
| 5.2.             | Campagne expérimentale.....                             | 138 |
| 5.2.1.           | Sonde sonique FWS 1TX-3RX .....                         | 139 |
| 5.2.2.           | Sonde électrique 2PEA-1000.....                         | 147 |
| 5.2.3.           | Synthèse.....   | 151 |
| 5.3.             | Mesures de terrain – interprétations qualitatives ..... | 151 |
| 5.3.1.           | Analyse classique des mesures de diagraphies.....       | 152 |
| 5.3.2.           | Synthèse.....   | 158 |
| 5.4.             | Validation de la méthodologie de travail .....          | 159 |
| 5.4.1.           | Application de l'approche de travail .....              | 159 |
| 5.4.2.           | Prédiction des ouvertures des discontinuités.....       | 162 |
| 5.4.3.           | Synthèse et discussion .....                            | 164 |
| 5.5.             | Conclusion .....  | 166 |
| Chapitre 6 :     | Conclusion .....  | 167 |
| Annexe.....      |   | 175 |
| Références ..... |   | 199 |

## Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure 2 - 1 : Les ondes de volume et de surface (Bjørlykke, 2015).....  | 32 |
| Figure 2 - 2 : Bande de lithologie dans l'espace $V_p$ - $V_s$ (km/s) (cité par Mount Sopris Instruments co., 2009). .....   | 33 |
| Figure 2 - 3: Résistivité et conductivité électrique de divers types de roche (Palacky, 1987). .....   | 35 |
| Figure 2 - 4 : Types d'émetteurs Array sonore. A : monopole émetteur donnant une impulsion multidirectionnelle. B : dipôle émetteur donnant une impulsion dirigée. (Cité par Mari et Vergniault, 2018). .....  | 42 |
| Figure 2 - 5 : Coupe transversale du trou de forage illustrant la propagation des ondes acoustiques dans le fluide de forage et dans la formation autour du trou de forage (pour $V_p > V_s > V_f$ ) (Schlumberger, 1997). .....   | 43 |
| Figure 2 - 6 : Configuration d'électrode schématisée pour l'outil normal (Anderson, 2001). .....   | 47 |
| Figure 2 - 7 : Répartition des lignes de courant (lignes sombres avec des flèches) et des équipotentielles (lignes lumineuses orthogonales) (Anderson, 2001). .....  | 48 |
| Figure 2 - 8 : Représentation du volume d'investigation (Taillet, 2013). .....   | 49 |
| Figure 2 - 9 : Influence de l'épaisseur des bancs et de la résistivité, (Serra, 1979). .....   | 51 |
| Figure 2 - 10 : Profondeur d'investigation et résolution des outils d'investigation (Bjørlykke, 2015). .....   | 52 |
| Figure 2 - 11 : Schéma qui montre la méthodologie de travail. ....   | 55 |
| Figure 3 - 1 : Outils acoustiques : outil monopôle (Mount Sopris Instruments co., 2009). ..  | 58 |
| Figure 3 - 2 : Graphe qui représente les différents éléments (Domaine, Frontière) qui constituent notre modèle acoustique. ....  | 60 |
| Figure 3 - 3 : Couplage bidirectionnel à l'interface fluide-solide. ....   | 61 |
| Figure 3 - 4 : Schéma représentant le processus de validation du modèle numérique. ....  | 64 |
| Figure 3 - 5 : (a) Dix signaux enregistrés par le premier récepteur pour les différentes positions de discontinuité et (b) une fenêtre zoomée sur les arrivées d'ondes P. Les traces en pointillés bleus correspondent au signal de référence pour un milieu homogène. ....  | 65 |
| Figure 3 - 6 : (a) et (c) représentent, respectivement, les temps d'arrivée (dt) des ondes P et S pour les dix positions de la discontinuité entre (-0.2 m et 1.6 m). (b) et (d) montrent, respectivement, l'amplitude de l'atténuation par ondelettes du premier cycle des ondes P et S pour les dix positions. Les points noirs représentent les positions de l'émetteur (T), du récepteur 1 (R1), du récepteur 2 (R2) et du récepteur 3 (R3). ..... | 66 |
| Figure 3 - 7 : Diagramme illustrant le processus appliqué pour quantifier la perte de transmission à partir des modèles discontinus et homogènes. (i) représente les ondes P ou S respectivement. ....   | 69 |
| Figure 3 - 8 : Différence entre un signal échantillonné tous les 1 $\mu$ s et un autre tous les 4 $\mu$ s. ....  | 70 |
| Figure 3 - 9 : Étude paramétrique sur les facteurs de variation de la vitesse des ondes P et S pour les quatre cas d'étude. La forme I représente la barre d'incertitude (+/-4%). .....  | 73 |
| Figure 3 - 10 : Étude paramétrique des facteurs d'atténuation de l'amplitude des ondes P et S pour les quatre cas d'études. La forme I représente la barre d'incertitude (+/-4%). .....  | 76 |
| Figure 3 - 11 : Étude paramétrique des facteurs de perte de transmission acoustique pour les ondes P et S pour le premier cas d'étude et au niveau des trois récepteurs R1, R2 et R3. ..   | 78 |
| Figure 3 - 12 : Intervalle d'influence de chaque paramètre de discontinuité dans l'étude paramétrique sur quatre facteurs de perte de transmission. Les points bleus représentent la valeur moyenne des intervalles d'influence. Les rectangles rouges représentent la propriété qui affecte le plus le facteur de perte de transmission. ....   | 79 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 3 - 13 : Sonde électrique normale 2PEA-1000 (Mount Sopris Instruments co., 2009).<br>.....  | 81  |
| Figure 3 - 14 : Graphe qui représente les différents éléments (Domaine, Frontière) qui<br>constituent notre modèle électrique. ....  | 83  |
| Figure 3 - 15 : La réponse de résistivité apparente corrigé au niveau des 4 électrodes de<br>mesure du dispositif normal pour les différentes positions de la discontinuité entre (-1 m et<br>2 m) par rapport à l'électrode d'injection. ....   | 86  |
| Figure 3 - 16 : Influence de <i>CRMDF</i> sur le facteur de perte électrique ( $V_r$ ) pour différentes<br>ouvertures de la discontinuité au niveau des 4 électrodes de réception M8, M16, M32 et M64<br>et pour différents contrastes (Matrice rocheuse/discontinuité). ....  | 89  |
| Figure 3 - 17 : Influence de <i>CRMDF</i> sur le facteur de perte électrique ( $V_r$ ) pour différentes<br>extensions de la discontinuité au niveau des 4 électrodes de réception M8, M16, M32 et M64<br>et pour différents contrastes (Matrice rocheuse/discontinuité). ....  | 90  |
| Figure 3 - 18 : Graphes montrant la distribution du potentiel électrique pour des faibles (a et<br>c) et forts contrastes de résistivité (b et d) pour différentes longueurs et ouvertures de<br>discontinuités. Les différents points rouges, bleus, verts, jaunes et gris représentent<br>respectivement la position de l'électrode d'injection A et des électrodes de mesure M8, M16,<br>M32 et M64. .... | 91  |
|  |     |
| Figure 4 - 1 : Graphe illustrant la combinaison des deux bases de données acoustiques et<br>électrique. ....   | 96  |
| Figure 4 - 2 : Schéma qui représente la progression du travail, de l'analyse des facteurs de<br>perte à la caractérisation des propriétés de la discontinuité idéal. ....  | 97  |
| Figure 4 - 3 : Analyse (ACP) sur les axes F1, et F2. Seulement l'ouverture de la discontinuité<br>e et les variables d'entrées déterminées par l'analyse de corrélation sont représentés. ....   | 108 |
| Figure 4 - 4 : Comparaison entre les valeurs de la base de données et les valeurs prédits par<br>les modèles de prédiction pour les différentes propriétés d'une discontinuité remplie. ....   | 116 |
| Figure 4 - 5 : Schéma fonctionnel d'un neurone artificiel (multi-entrées multi-sorties). ..  | 119 |
| Figure 4 - 6 : (RMSE) du réseau en fonction du nombre d'itération pour la prédiction de<br>l'ouverture de la discontinuité. ....   | 121 |
| Figure 4 - 7 : Comparaison entre les valeurs de la base de données et les valeurs prédits par<br>le modèle de prédiction par RNA pour les différentes propriétés d'une discontinuité remplie.<br>.....   | 122 |
|  |     |
| Figure 5 - 1 : Carte montrant l'emplacement des installations de calibration au Bells Corners<br>(adaptée de Mwenifumbo et al., 2005). ....  | 132 |
| Figure 5 - 2 : Positions et profondeurs des six forages de Bells Corners (adapté de<br>Mwenifumbo et al., 2005). ....  | 133 |
| Figure 5 - 3 : La géologie du forage BC84-5 jusqu'à 249 m de profondeur. Le rectangle<br>rouge représente la zone étudiée (de 80 à 120m). ....   | 135 |
| Figure 5 - 4 : La géologie et le tracé récapitulatif des différents outils de diaggraphie acquises<br>en BC84-5 (Imagerie acoustique et optique, diamètre, densité, résistivité, et acoustique<br>sonique). Les profondeurs sont relatives au sommet du tubage. ....   | 137 |
| Figure 5 - 5 : (1) schéma représentant le dispositif installé sur le terrain, la bride et l'électrode<br>B se présentent quand on utilise la sonde électrique uniquement. (2) photographie du<br>dispositif installé sur chantier. ....  | 138 |
| Figure 5 - 6 : Sonde sonique FWS (FWS 1TX-3RX) avec trois récepteurs et un transmetteur.<br>.....  | 139 |
| Figure 5 - 7 : Comparaison entre trois mesures acoustiques dont les pas de mesure sont<br>respectivement de 1, 5 et 10 cm, pour le premier récepteur. (a) et (c) représentent les résultats  |     |

|  |     |
|--|-----|
| de l'amplitude des ondes P et S, respectivement. (b) et (d) représentent les résultats de temps d'arrivée des ondes P et S, respectivement. Les lignes bleues représentent les positions des discontinuités. ....  | 141 |
| Figure 5 - 8 : Comparaison entre trois mesures acoustiques pour différentes fréquences émises par la sonde, pour le premier récepteur. (a) et (c) représentent l'amplitude des ondes P et S mesurées respectivement. (b) et (d) représentent les temps d'arrivée des ondes P et S mesurés, respectivement. Les lignes bleues représentent les positions des discontinuités. ....   | 143 |
| Figure 5 - 9 : Les résultats pour les différents passages de la sonde acoustique, pour le premier récepteur. (a) et (c) représentent les résultats en l'amplitude des ondes P et S, respectivement. (b) et (d) représentent les résultats en temps d'arrivée des ondes P et S, respectivement. ....  | 146 |
| Figure 5 - 10 : Sonde de résistivité normale ALT 2PEA-1000 .....   | 147 |
| Figure 5 - 11 : Comparaison entre trois mesures électriques dont les pas sont de 1, 5 et 10 cm. ....   | 149 |
| Figure 5 - 12 : Les résultats pour les différents passages de la sonde électrique, au niveau de la première électrode M8. ....   | 150 |
| Figure 5 - 13 : Exemple de tracé des images acoustiques et optiques ainsi que les signaux enregistrés par les trois récepteurs FWS en fonction de la profondeur au niveau du forage BC84-5. Les flèches rouges représentent la zone d'influence pour chaque récepteur. ....  | 153 |
| Figure 5 - 14 : Exemple de tracé des images acoustiques et optiques ainsi que les données de résistivité apparente corrigées des trois électrodes (M8, M16, M32) de réception en fonction de la profondeur au niveau du forage BC84-5. Les lignes bleues représentent quelques positions des discontinuités. ....  | 154 |
| Figure 5 - 15 : Visualisation des images acoustiques et optiques, données de résistivité apparente corrigées pour l'électrode M8, et les enregistrements du temps d'arrivée et d'amplitude de la première ondelette des ondes acoustiques P et S, pour la zone de forage BC84-5 à une profondeur de 82 à 120 m. Le cadre noir représente une zone alertée du massif rocheux et les cadres rouges représentent quelques position des discontinuités. .... | 155 |
| Figure 5 - 16 : Images optiques (a) et acoustiques (b) de trois discontinuités sélectionnées. ....   | 160 |
| Figure 5 - 17 : Schéma de détermination des propriétés du milieu discontinu (ligne rouge) et homogène (ligne bleu) pour les trois discontinuités. ....   | 162 |



## Liste des tableaux

|  |     |
|--|-----|
| Tableau 2 - 1 : Masse volumique et porosité de quelques types de roches, (Peng et Zhang, 2007).....  | 29  |
| Tableau 2 - 2 : Résumé des principaux modes d'ondes dans le forage ( $V_P > V_S > V_f$ ) (Chabot, 2003 ; Rajabi et al., 2010).....   | 44  |
| Tableau 2 - 3 : Synthèse des deux techniques de mesure diagraphiques (Fullwave sonic, et de résistivité). ....   | 52  |
|  |     |
| Tableau 3 - 1 : Propriétés mécaniques des matériaux supposées lors de la vérification du modèle acoustique. ....   | 62  |
| Tableau 3 - 2 : Propriétés mécaniques et géométriques de la discontinuité simulée.....   | 65  |
| Tableau 3 - 3 : Les différentes valeurs choisies pour l'étude paramétrique pour les propriétés géométriques et mécaniques de la discontinuité. Les caractères gras représentent les propriétés du cas de référence. ....   | 67  |
| Tableau 3 - 4 : Les propriétés mécaniques des différents cas de la matrice rocheuse.....   | 67  |
| Tableau 3 - 5 : Incertitude de sélection du temps d'arrivée des ondes P et S au niveau des trois récepteurs.....   | 70  |
| Tableau 3 - 6 : Incertitude des amplitudes déterminées pour les ondes P et S au niveau des trois récepteurs.....   | 71  |
| Tableau 3 - 7 : Propriétés électriques des matériaux supposées lors de la vérification du modèle électrique.....   | 84  |
| Tableau 3 - 8 : Calculs d'erreur pour différentes positions de $M_x$ avec prise en compte du mandrin de la sonde.....  | 84  |
| Tableau 3 - 9 : Propriétés électriques et géométriques de la discontinuité simulée. ....   | 85  |
| Tableau 3 - 10 : Propriétés électriques des différents éléments constituant le modèle (sonde, électrodes, fluide de forage et matrice rocheuse). ....  | 86  |
| Tableau 3 - 11 : Différentes valeurs choisies pour l'étude paramétrique pour les propriétés géométriques et électriques de la discontinuité. ....  | 87  |
| Tableau 3 - 12 : Hypothèses de modélisation.....   | 93  |
|  |     |
| Tableau 4 - 1 : Plages des propriétés de la discontinuité utilisées dans la base de données, et statistiques descriptives. ....  | 98  |
| Tableau 4 - 2 : Coefficient de corrélation de Spearman entre les différents facteurs de pertes (acoustique : $VVP$ ; $VVS$ ; $\gamma'P$ ; $\gamma'S$ et électrique : $Vr$ ) au niveau des différents récepteurs (acoustique : R1 ; R2 ; R3 et électrique : M8 ; M16 ; M32 ; M64) et les différentes propriétés de la discontinuité ( $e$ ; $L$ ; $\rho F$ ; $VPF$ ; $VSF$ ), les différentes couleurs rouge $\geq 0.4 \leq rs$ , orange $0.2 \leq rs < 0.4$ , bleu $0.1 \leq rs < 0.2$ , et noir $rs < 0.1$ représentent respectivement une forte corrélation, une corrélation moyenne, une faible corrélation et pas de corrélation. .... | 100 |
| Tableau 4 - 3 : Le coefficient de corrélation de Spearman entre les différents facteurs de pertes au niveau des différents récepteurs. Chaque couleur représente un facteur de perte pour les différents récepteurs.....   | 102 |
| Tableau 4 - 4 : Effet de la prise en compte de $RV$ sur les coefficients de corrélation entre $VV$ et les différentes propriétés de la discontinuité au niveau du premier récepteur. La couleur rouge représente un coefficient de corrélation ( $rs$ ) plus important que dans le cas initial. ....   | 103 |
| Tableau 4 - 5 : Influence de la prise en compte de l'impédance acoustique de la matrice rocheuse entourant $Z$ sur les coefficients de corrélation ( $rs$ ) entre $VV$ et les différentes  |     |



|   |     |
|---|-----|
| propriétés de la discontinuité au niveau du premier récepteur. La couleur rouge représente un coefficient de corrélation plus important que dans le cas initial. ....   | 104 |
| Tableau 4 - 6 : Coefficient de corrélation ( $r_s$ ) entre les rapports des différents facteurs de pertes acoustiques subies par les différents récepteurs et les propriétés géométriques et mécaniques d'une discontinuité remplie. La couleur rouge représente un coefficient de corrélation important. ....  | 106 |
| Tableau 4 - 7 : Coefficient de corrélation ( $r_s$ ) entre le rapport de facteur de perte de résistivité ( $rM32VrM16$ ) et les propriétés géométriques et électriques d'une discontinuité remplie. La couleur rouge représente un coefficient de corrélation important. ....   | 106 |
| Tableau 4 - 8 : Variables d'entrées pour chaque propriété de la discontinuité remplie. ...  | 107 |
| Tableau 4 - 9 : Coefficient de détermination $R^2$ de la regression simple entre l'ouverture de la discontinuité est les différentes variables d'entrées ( $VVP1/RV; VVS1; \gamma'P1; \gamma'S1; R VVP; R VVS; VrM16$ ) pour différents types de fonction. ....   | 110 |
| Tableau 4 - 10 : Valeurs de $R^2$ et $RMSE$ de formation et de validation pour trois modèles polynomiaux de prédiction pour les différentes propriétés géométrique, mécanique et électrique d'une discontinuité remplie. ....   | 114 |
| Tableau 4 - 11 : Équations générées par la régression multiple non linéaire pour les différentes propriétés de la discontinuité remplie. ....   | 115 |
| Tableau 4 - 12 : Comparaison entre les deux modèles de prédiction RMNL et RNA au niveau de $R^2$ et $RMSE$ de formation et de validation. ....  | 123 |
| Tableau 4 - 13 : Erreur moyenne et résidu moyen des modèles de prédiction RMNL et RNA, pour différents intervalles pour les différentes propriétés d'une discontinuité remplie. ...   | 125 |
|   |     |
| Tableau 5 - 1 : Coordonnées et élévations des forages basées sur des mesures GPS différentielles enregistrées entre 2019 et 2021. La référence horizontale est NAD83 (The North American Datum of 1983) et la référence verticale pour les élévations (hauteur orthométrique) est CGVD28(HTv2.0) (The Canadian Geodetic Vertical Datum of 1928). sns= sous le niveau de sol (Crow et al., 2021). .... | 134 |
| Tableau 5 - 2 : Les différents outils de diagraphie réalisée dans le forage BC84-5 avec les détails de l'acquisition. ....  | 136 |
| Tableau 5 - 3 : Différentes configurations acoustiques faites le 26 avril 2022 pour le forage BC84-5 à Bells corner, Ottawa. ....   | 140 |
| Tableau 5 - 4 : Coefficients de variation pour l'étude de l'amplitude de la première ondelette et des temps d'arrivée des ondes P et S, au niveau de trois récepteurs de la sonde acoustique. ....  | 147 |
| Tableau 5 - 5 : Différentes configurations électriques faites le 27 avril 2022 pour le forage BC84-5 à Bells corner, Ottawa. ....   | 148 |
| Tableau 5 - 6 : Coefficients de variation pour les quatre espacements de la sonde électrique. ....  | 151 |
| Tableau 5 - 7 : Propriétés des milieux discontinus et homogènes ainsi que les facteurs de perte liés à la présence des discontinuités D1, D2 et D3. ....  | 161 |
| Tableau 5 - 8 : Valeurs d'ouvertures réelles et prédites pour les trois discontinuités, et l'écart entre les deux valeurs. ....   | 163 |
| Tableau 5 - 9 : Tableau de synthèse des données sur les discontinuités issus de modèle de prédiction développé. ....  | 165 |
|   |     |
| Tableau 6 - 1 : Sensibilités des facteurs de perte acoustique aux propriétés géométriques et mécaniques d'une discontinuité remplie. (+ représente que les facteurs sont sensibles, - représente qu'il n'y a pas de sensibilité). ....  | 170 |

## Liste des symboles

|              |   |                   |
|--------------|---|-------------------|
| $\rho$       | Masse volumique globale du massif rocheux                     | kg/m <sup>3</sup> |
| $\rho_{ma}$  | Masse volumique de la matrice rocheuse                        | kg/m <sup>3</sup> |
| $\rho_f$     | Masse volumique du fluide                                     | kg/m <sup>3</sup> |
| $V_v$        | Volume des vides  | m <sup>3</sup>    |
| $V_t$        | Volume total  | m <sup>3</sup>    |
| $f_v$        | Fraction du volume de pores contenue dans les fractures       | -                 |
| $\phi_t$     | Porosité totale   | -                 |
| $\phi_o$     | Porosité de la matrice  | -                 |
| $\phi_f$     | Porosité de la fissure  | -                 |
| $\phi$       | Porosité effective  | -                 |
| $\nu$        | Coefficient de poisson  | -                 |
| $E$          | Module d'Young  | Pa                |
| $K$          | Module d'élasticité   | Pa                |
| $K_p$        | Perméabilité d'une roche                                      | Da                |
| $I_p$        | Gradient de charge hydraulique                                | Pa/m              |
| $V_{ff}$     | Vitesse de filtration du fluide                               | m/s               |
| $S$          | Degré de saturation de la roche                               | %                 |
| $a$          | Facteur de lithologie   | -                 |
| $m$          | Facteur de cimentation  | -                 |
| $n$          | Facteur de saturation   | -                 |
| $V$          | Vitesse de propagation d'onde                                 | m/s               |
| $V_p$        | Vitesse de l'onde de compression (P)                          | m/s               |
| $V_s$        | Vitesse de l'onde de cisaillement (S)                         | m/s               |
| $V_{fluide}$ | Vitesse de propagation d'onde dans le fluide de forage        | m/s               |
| $\theta$     | Angle critique  | °                 |
| $f_c$        | Fréquence centrale de l'ondelette                             | Hz                |
| $t_{forage}$ | Temps nécessaire aux ondes pour traverser le fluide du forage | s                 |
| $d_{forage}$ | Diamètre du forage  | m                 |
| $d_{sonde}$  | Diamètre de la sonde  | m                 |
| $dt$         | Temps d'arrivée d'onde  | s                 |
| $VV$         | Variation de la vitesse                                       | %                 |
| $VV_P$       | Variation de la vitesse pour l'onde P                         | %                 |
| $VV_S$       | Variation de la vitesse pour l'onde S                         | %                 |
| $V_H$        | Vitesse de propagation d'onde dans un milieu homogène         | m/s               |
| $V_D$        | Vitesse de propagation d'onde dans un milieu discontinu       | m/s               |
| $\gamma'$    | Paramètre d'atténuation d'amplitude                           | dB                |
| $\gamma'_p$  | Paramètre d'atténuation d'amplitude pour l'onde P             | dB                |
| $\gamma'_s$  | Paramètre d'atténuation d'amplitude pour l'onde S             | dB                |
| $A_H$        | Amplitude maximale du signal dans un le milieu homogène       | Pa                |
| $A_D$        | Amplitude maximale du signal dans un milieu discontinu        | Pa                |
| $R_t$        | Résistivité du milieu   | Ohm.m             |
| $R_w$        | Résistivité du fluide de saturation                           | Ohm.m             |
| $R_a$        | Résistivité apparente du milieu                               | Ohm.m             |
| $R_D$        | Résistivité apparente corrigée pour un milieu discontinu      | Ohm.m             |
| $R_H$        | Résistivité apparente corrigée pour un milieu homogène        | Ohm.m             |
| $V_r$        | Facteur de perte électrique                                   | %                 |
| $I$          | Intensité du courant  | A                 |
| $V_M$        | Potentiel électrique  | V                 |

|               |  |                   |
|---------------|--|-------------------|
| $K_s$         | Coefficient de sonde (facteur géométrique)                           | -                 |
| $AM$          | Distance entre l'électrode d'injection et l'électrode de mesure      | m                 |
| $\Delta_x$    | Distance entre l'émetteur et le récepteur acoustique                 | m                 |
| $e$           | Ouverture de la discontinuité  | cm                |
| $L$           | Extension de la discontinuité  | cm                |
| $VP_F$        | Vitesse de compression du remplissage de la discontinuité            | m/s               |
| $VS_F$        | Vitesse de cisaillement du remplissage de la discontinuité           | m/s               |
| $\rho_F$      | Masse volumique du remplissage de la discontinuité                   | kg/m <sup>3</sup> |
| $R_{DF}$      | Résistivité du remplissage de la discontinuité                       | Ohm.m             |
| $C_{(RM/DF)}$ | Contraste de résistivité entre le massif rocheux et la discontinuité | -                 |
| $\vec{J}$     | Densité volumique de courant électrique                              | A/m <sup>3</sup>  |
| $\vec{E}$     | Champ électrique   | V/m               |
| $\sigma$      | Conductivité électrique  | S/m               |
| $p$           | Pression   | Pa                |
| $u$           | Déplacement  | m                 |
| $\sigma$      | Tenseur de contrainte de Cauchy                                      | Pa                |
| $\varepsilon$ | Tenseur de déformation linéaire                                      | -                 |
| $C$           | Tenseur élastique  | 1/Pa              |
| $k$           | Nombre d'ondes   | 1/m               |
| $\omega$      | Fréquence angulaire  | Rad/s             |

# Chapitre 1 : Introduction

## 1.1. Mise en contexte

Les massifs rocheux peuvent être considérés comme un assemblage de blocs de roches délimités par des discontinuités constituées des limites stratigraphiques, de fissures, de fractures ou de failles. A l'échelle de l'ingénieur, ils sont discontinus, inhomogènes, anisotropes et non linéairement élastiques (Durville et Héraud, 1997 ; Chalhoub, 2006 ; Jaber 2020). Une connaissance globale du sous-sol comporte la détermination des propriétés mécaniques de la roche intacte, ainsi que les caractéristiques des discontinuités présentes : ouverture, direction et pendage des discontinuités, localisation et identification du matériau de remplissage. Toutes ces informations servent à bien identifier les paramètres de base de dimensionnement des ouvrages en génie civil comme la capacité portante du massif rocheux et leur module de déformation. Soulignons également que la caractérisation des fractures et la détermination de leur comportement hydromécanique sont des tâches importantes en vue de nombreuses applications comme l'exploitation des réservoirs du pétrole et du gaz, la production d'énergie géothermique et le stockage géologique du CO<sub>2</sub> (Barborsa et al., 2019).

La caractérisation des massifs rocheux est généralement obtenue à partir des mesures sur carottes extraites à l'aide d'un forage, ou par des mesures sur terrain. Ces méthodes présentent toujours des inconvénients et des limites en laboratoire ou in situ : D'une part, les carottes sont très localisées (petit volume de prélèvement) et ne peuvent pas représenter la totalité du massif rocheux, notamment leur hétérogénéité, d'où la nécessité de retirer plusieurs échantillons. De plus, les mesures en laboratoire sur carottes sont généralement destructives, coûteuses et longues, elles demandent en général le conditionnement des échantillons et du temps de préparation (Lagabrielle, 2007). D'autre part, il y a des problèmes de transport et de stockage des échantillons, et l'impossibilité de pouvoir réitérer les essais dans le cadre du suivi de l'évolution du massif. En outre, cette méthode ne nous permet pas de bien distinguer ou de caractériser les discontinuités dans le massif rocheux. C'est l'ensemble de ces éléments qui a engagé les chercheurs à développer d'autres méthodes et outils, tels que les outils non destructifs.

Les approches développées en géologie appliquée avec les outils de diagraphies (géophysique de forage) présentent un grand potentiel afin de mieux exploiter ces forages (Lagabrielle, 2007 ; Thivierge, 2011 ; Lataste, 2011 ; Taillet, 2013). Les diagraphies sont des techniques d'auscultation géophysiques mises en œuvre à l'intérieur d'un forage. Elles désignent tout enregistrement continu d'un paramètre lié à des caractéristiques de la formation rocheuse traversée par un sondage, en fonction de la profondeur (Lagabrielle, 2007 ; Caritg et al., 2016).

## 1.2. Problématique et objectif

Chaque technique d'exploration du forage (acoustique sonique, électrique) a ses propres sensibilités, avantages et désavantages. En effet, chaque sonde est sensible à une propriété physique spécifique et se caractérise par une résolution et un volume d'investigation différents. Les informations fournies individuellement par les différentes techniques diagraphiques peuvent parfois être insuffisantes pour constituer une évaluation complète du massif rocheux. Cependant, la combinaison de ces résultats peut permettre de limiter les hypothèses et d'affiner l'interprétation du milieu (Lataste, 2011).

Le travail développé dans le cadre de ces recherches vise à exploiter la complémentarité de deux physiques différentes (électrique et acoustique), en s'appuyant respectivement sur les sondes électriques normale et soniques *Full waveform*.

La sonde électrique a montré sa sensibilité face à certains facteurs indicateurs d'une altération dans le béton (variation de la porosité primaire, présence de discontinuités, etc.) (Taillet, 2013). Elle permettrait d'accéder à des informations essentielles concernant les discontinuités (par exemple des éléments sur leur géométrie telles que l'ouverture et l'extension, ainsi que le remplissage). La possibilité de travailler avec plusieurs espacements avec ce type de sonde (permettant de faire varier les rayons d'investigations de quelques centimètres jusqu'au mètre) est un élément important de ces travaux pour échantillonner à différentes échelles les effets d'une discontinuité sur les propriétés électriques du massif.

La sonde sonique (*Full waveform*) en s'appuyant sur l'analyse des vitesses et des amplitudes des ondes de compression et de cisaillement, vise à l'évaluation des propriétés mécaniques des roches et de leur porosité. Elle permet également la détection et la caractérisation partielle des discontinuités par l'étude des signaux propagés (et altérés) dans leur voisinage.

Bien que des études récentes aient été menées pour développer chacune des méthodes (par exemple, Taillet, 2013 pour les méthodes électriques et Barbosa et al., 2019 pour les méthodes acoustiques), il semble que leur utilisation combinée pourrait permettre d'explorer de nouvelles perspectives en termes de caractérisation des discontinuités.

L'idée générale de ces travaux est de déterminer les caractéristiques géométriques (l'ouverture  $[e]$ , l'extension  $[L]$ ), mécaniques (vitesse de compression  $[VP_F]$ , vitesse de cisaillement  $[VS_F]$ , masse volumique  $[\rho_F]$ ) et électrique (résistivité  $[R_{DF}]$ ), de la discontinuité et son remplissage en combinant les informations issues de deux techniques de diagraphies : la sonde Fullwave sonic (FWS) pour la diagraphie acoustique et le dispositif normal (DN) pour la diagraphie électrique.

### 1.3. Organisation du travail

Ce travail porte sur la caractérisation des discontinuités dans le massif rocheux par le développement d'une nouvelle méthodologie de combinaison des facteurs de perte de transmission reçus des deux outils diagraphiques (acoustique, électrique). La stratégie adoptée dans cette thèse, est basée sur une évaluation et une quantification de la sensibilité des réponses diagraphiques (acoustique et électrique) aux propriétés géométriques, mécaniques et électriques d'une discontinuité remplie. Cette stratégie repose sur une approche numérique (éléments finis) en 2D-axisymétrie. Plusieurs facteurs de perte acoustiques et électriques étaient identifiés tout en comparant les réponses des milieux discontinus et homogènes. Nous avons évalué l'impact correspondant de la présence d'une discontinuité sur les facteurs de perte de transmission pour une large gamme de propriétés géométriques, mécaniques et électriques de la discontinuité et de son remplissage, ainsi que pour différentes propriétés de la masse matrice rocheuse. En addition, un travail d'analyse et de combinaison de données (régression multiple non linéaire et réseaux de neurones) étaient réalisés pour corréler les propriétés d'une discontinuité aux facteurs de perte identifiées.

Cette thèse se compose de six chapitres. Le premier chapitre présente la problématique et l'organisation de mon travail de recherche.

Le chapitre deux représente un état de l'art sur divers sujets touchant la problématique. Cette revue des connaissances fait état des différentes propriétés du massif rocheux et de ces constituants (matrice rocheuse, discontinuités) et des deux techniques de diagrapie acoustique et électrique, (résistivité électrique) et de la complémentarité entre ces deux outils.

Dans le chapitre trois nous présentons les concepts de modélisation numérique adoptés des deux outils diagrapiques pour simuler le problème direct des effets d'une discontinuité singulière et orthogonale au forage sur les mesures issues de chacune des techniques, ainsi que pour comprendre leur réponse face aux différentes propriétés d'une discontinuité remplie. Nous décrivons ensuite une méthodologie permettant d'identifier des facteurs de perte de transmission acoustique et électrique tout en comparant les réponses des milieux discontinus et homogènes. L'impact correspondant de la présence d'une discontinuité sur les facteurs de perte de transmission a été évalué pour une large gamme d'ouvertures et de longueurs de discontinuité, de vitesse des ondes P et S, de masse volumique et de résistivité du matériau de remplissage, ainsi que pour différentes propriétés mécaniques de la matrice rocheuse.

Le chapitre quatre présente une analyse des résultats obtenus par méthodes relatives à chacune des propriétés des discontinuités. Ces données sont ensuite exploitées afin d'effectuer un travail sur la combinaison des résultats électriques et acoustiques. Différentes méthodes de combinaison sont considérées, telles que la régression multiple non linéaire et les réseaux de neurones, afin de proposer un outil de diagnostic des caractéristiques des discontinuités.

Le chapitre cinq représente une validation expérimentale réalisé sur un cas d'ouvrage réel à Bells corner, Ottawa, Ontario, Canada. Ce chapitre permet de pointer le potentiel et les limites de notre méthodologie de travail proposée dans cette thèse. Le dernier chapitre de cette thèse représente la conclusion de mes travaux de recherche.

## Chapitre 2 : Revue de connaissances

Le chapitre présente une revue de la littérature pour contextualiser le projet de recherche. Les sujets abordés comprennent les propriétés du massif rocheux, les discontinuités, les techniques de mesure diagraphiques géophysiques, la diagraphie acoustique et électrique. Le chapitre est divisé en trois parties pour mieux comprendre les objectifs de ce travail. La première partie se concentre sur les différentes propriétés du massif rocheux et l'impact des discontinuités sur ces propriétés. La deuxième partie présente les méthodes d'auscultations utilisées, notamment la diagraphie acoustique (Sonique FWS) et la diagraphie électrique (dispositif normal), en abordant leur complémentarité. La troisième partie décrit l'approche méthodologique mise en place pour le travail de thèse.

### 2.1. Les massifs rocheux

Les roches sont des matériaux naturels formés par un assemblage de minéraux ayant des liaisons plus ou moins fortes. Elles sont assimilées à un assemblage de blocs solides délimités par des discontinuités constituées par les limites stratigraphiques, les fissures, les fractures ou les failles. On identifie plusieurs paramètres pour la description d'un massif rocheux : Citons la couleur, la dureté et le type de la matrice rocheuse, l'altération. Le remplissage, l'ouverture et la profondeur des discontinuités peuvent être aussi considérées (CLC-SAS-AEG, 1976). En effet, la caractérisation des discontinuités est essentielle pour de nombreuses applications, notamment l'exploitation de réservoirs de pétrole et de gaz, la production d'énergie géothermique et le stockage géologique du CO<sub>2</sub> (Bakku et al., 2013 ; Gudmundsson, 2011 ; Zimmerman & Main, 2004).

#### 2.1.1. Propriétés physiques des roches

Les caractéristiques physiques des roches sont des paramètres mesurables qui décrivent les propriétés intrinsèques des roches, telles que la masse volumique, la porosité, la perméabilité, les propriétés acoustiques et les propriétés électriques. Ces caractéristiques sont essentielles pour caractériser les roches et comprendre leur comportement dans différents contextes géologiques et géotechniques (Peng et Zhang, 2007).



### 2.1.1.1. La masse volumique

La masse volumique de roche ( $\rho$ ) est une mesure de la masse de roche contenue dans un volume donné (masse volumique = masse/volume). Elle est généralement exprimée en  $\text{g/cm}^3$ .

La masse volumique de roche est également appelée masse volumique globale. Étant donné que la plupart des roches sont des milieux poreux, la masse volumique globale des roches poreuses dépend non seulement de la masse volumique du matériau de la matrice solide, mais aussi de la masse volumique des fluides de pores ainsi que de la saturation, tel qu'indiqué dans l'équation suivante :

$$\rho_b = (1 - \phi_t)\rho_{ma} + \phi_t\rho_f \quad \text{Éq 2-1}$$

Où,  $\rho_b$ ,  $\rho_{ma}$ ,  $\rho_f$ ,  $\phi_t$  représentent respectivement la masse volumique globale du massif rocheux, la masse volumique de la matrice rocheuse, la masse volumique du fluide et la porosité (Peng et Zhang, 2007).

### 2.1.1.2. Porosité

La porosité représente la proportion de vide dans le massif rocheux. C'est la fraction du volume d'une roche non occupée par des éléments solides. Donc, c'est le rapport du volume des vides ( $Vv$ ) sur le volume total ( $Vt$ ) :

$$\phi_t = \frac{Vv}{Vt} \quad \text{Éq 2-2}$$

Où,  $Vv$  est le volume des vides, et  $Vt$  est le volume total.

La porosité est décrite de plusieurs manières, mais les deux plus courantes sont la porosité totale (définie ci-dessus) et la porosité effective. La porosité effective représente le rapport de l'espace poreux interconnecté sur le volume total de la roche. Par conséquent, la porosité effective est également appelée porosité interconnectée. Les fluides dans les pores interconnectés contribuent à l'écoulement des fluides, ce qui est important pour la compréhension de la perméabilité des roches et des propriétés hydrodynamiques des formations géologiques. De plus, on constate que la forme, la taille, la répartition, les liaisons des vides influent sur le comportement mécanique du massif rocheux (CFMR-MMR, 2000 ;

Peng et Zhang, 2007). Le Tableau 2 - 1 présente quelques ordres de grandeur de masses volumiques et de porosités pour certains types de roche.

*Tableau 2 - 1 : Masse volumique et porosité de quelques types de roches, (Peng et Zhang, 2007).*

| Type de roche         | Masse volumique $\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Porosité $\phi$ (%) |
|-----------------------|---|---------------------|
| Granite               | 2.5-2.8                                       | 0.5-1.5             |
| Dolérite              | 3.0-3.1                                       | 0.1-0.5             |
| Calcaire              | 2.5-2.8                                       | 5-20                |
| Dolomite              | 2.5-2.6                                       | 1-5                 |
| Quartzite             | 2.65  | 0.1-0.5             |
| Grès                  | 2.0-2.6                                       | 5-25                |
| Schiste               | 2.0-2.7                                       | 10-30               |
| Charbon anthraciteux  | 1.3-1.6                                       |                     |
| Charbon bitumineux    | 1.1-1.4                                       |                     |
| Sédiments             | 1.7-2.3                                       |                     |
| Roches métamorphiques | 2.6-3.0                                       |                     |

Outre la porosité de la matrice (les pores), on distingue la porosité de fissuration : celle liée aux vides créés par une fracture, ce concept de double porosité a été développé pour étudier les fractures naturelles des réservoirs de pétrole (Pirson, 1967 ; Aguilera, 1979) et pour l'analyse d'un aquifère (Tselentis, 1985). Il existe ainsi deux systèmes de porosité différents connectés en parallèle, un à travers les fissures et l'autre à travers les pores saturés de la matrice.

Tselentis (1985) a introduit un nouveau paramètre qui permet d'établir une mesure quantitative de la répartition totale de la porosité entre porosité de la matrice et porosité de la fracture (Tselentis, 1985). Ce paramètre  $f$  est la fraction du volume de pores contenue dans les fractures.

$$f_V = \frac{\phi_f}{\phi_t} = \frac{(\phi_t - \phi_o)}{[(1 - \phi_o) \cdot \phi_t]} \quad \text{Éq 2-3}$$

Avec :

- $\phi_f$  est la porosité de la fissure : représente le rapport entre la section transversale fissurale et la section transversale moyenne ;
- $\phi_t$  est la porosité totale : représente le rapport du volume des vides et du volume du matériau ;
- $\phi_o$  est la porosité de la matrice : représente la porosité de la roche sans prendre en compte la porosité des fractures.

### 2.1.1.3. Perméabilité

La perméabilité désigne la capacité d'un matériau à se laisser traverser par un fluide. Elle est liée aux propriétés intrinsèques du matériau poreux, à la nature du fluide, et aux conditions extérieures comme le gradient de pression (Scheidegger, 1974 ; David, 1991 ; CFMR-MMR, 2000). Elle fournit des indications sur l'organisation du réseau poreux, notamment en termes de tortuosité. Habituellement, les zones endommagées constituent des zones d'échanges privilégiées. Les phénomènes de transfert hydrauliques et d'altération sont liés directement à la perméabilité des différentes structures.

La perméabilité  $K_p$  d'une roche peut être évaluée sur éprouvette en laboratoire, à l'aide de la formule suivante :

$$K_p = \frac{V_{ff}}{I_p} \quad \text{Éq 2-4}$$

Où,  $V_{ff}$  et  $I_p$ , sont respectivement la vitesse de filtration du fluide, et le gradient de charge hydraulique imposée.

Dans un massif rocheux, le fluide circule principalement dans les fractures et les fissures plus ou moins interconnectées. À l'échelle du massif, on peut souvent admettre la présence d'une perméabilité équivalente, définit comme la perméabilité du massif que l'on peut estimer par des essais in situ. La perméabilité du massif est souvent anisotrope et peut atteindre des valeurs d'environ  $10^{-5}$  m/s pour des roches très fracturées.

#### 2.1.1.4. Propriétés acoustiques

Les propriétés acoustiques des roches se réfèrent à la manière dont les ondes sonores se propagent à travers les formations géologiques. Les principales propriétés acoustiques des roches comprennent la vitesse de propagation, l'atténuation, la réflexion et la polarisation des ondes acoustiques (Telford et al., 1990 ; Avseth et al., 2005 ; Eitzenberger, 2012).

Dans un milieu élastique et isotrope, le déplacement ( $u$ ) du milieu dû au passage d'une onde acoustique est décrit par l'équation suivante :

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = K \nabla^2 u \quad \text{Éq 2-5}$$

Où,  $\rho$  est la masse volumique du milieu et  $K$  est le module d'élasticité associé à l'onde considérée. D'après cette équation, on obtient la vitesse de propagation d'une onde dans ce milieu :

$$V = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad \text{Éq 2-6}$$

Une connaissance des différents types d'ondes et de leurs propriétés est essentielle. Citons les principaux types d'ondes en sismique (Figure 2 - 1) (Bjørlykke, 2015 ; Mari et Vergniault, 2018) :

- Les ondes de volume sont l'onde P et S, qui se caractérisent par une propagation dans le volume ;
  - Les ondes « P » sont les ondes les plus rapides, ces ondes se propagent dans tous les états de la matière, et ils représentent le mouvement de compression et de dilatation dans le sens de la propagation (ondes longitudinales).
  - Les ondes « S » représentent les ondes de cisaillement transversal, pour lesquelles les particules oscillent dans un plan orthogonal au plan de propagation d'onde. Elles se propagent seulement dans les solides.
- Les ondes de surface sont des ondes qui ne traversent pas les volumes et se propagent aux interfaces. Elles peuvent avoir différentes formes. On compte les ondes de Rayleigh et les ondes de Love ;
  - Les ondes de Rayleigh résultent de l'interaction entre les ondes P et S. Elles sont assimilées à une vague, à cause du déplacement des particules de sol sous forme d'ellipse et sont les ondes les plus lentes.

- Les ondes de Love sont des ondes de cisaillement qui oscillent dans un plan horizontal en surface. Elles se propagent en imprimant dans le sol un mouvement de vibration latéral relativement au sens de propagation.

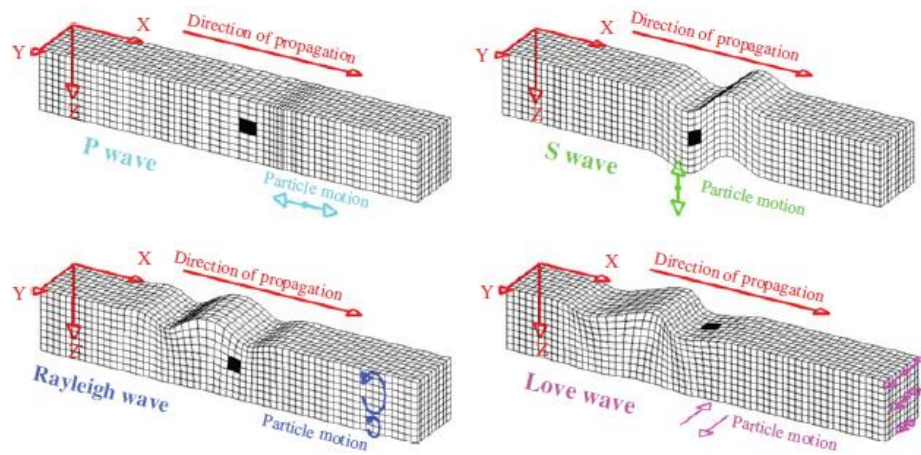


Figure 2 - 1 : Les ondes de volume et de surface (Bjørlykke, 2015).

L'étude de la propagation des ondes  $P$  et  $S$  dans un milieu sec ou saturé permet de déterminer ses propriétés élastiques (module d'Young  $E$ , coefficient de Poisson  $\nu$ ), selon les équations suivantes (CFMR-MMR, 2000).

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2}{1 - \left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2} \quad \text{Éq 2-7}$$

$$E = \rho \frac{V_P^2(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad \text{Éq 2-8}$$

Où,  $V_P$  et  $V_S$ , sont respectivement la vitesse de l'onde de compression ( $P$ ) et la vitesse de l'onde de cisaillement ( $S$ ).

Le lien entre les vitesses des ondes  $P$  et  $S$  et les propriétés mécaniques de la roche sont souvent exploités. La Figure 2 - 2, par exemple, illustre les relations entre  $V_P$  et  $V_S$  relativement aux valeurs du coefficient de poisson pour les roches sédimentaires les plus courantes. Chaque point représente les vitesses acoustiques des roches rapportées par divers auteurs (Paillet et Cheng, 1991). Les lignes rouges pleines indiquent différentes valeurs du coefficient de Poisson.

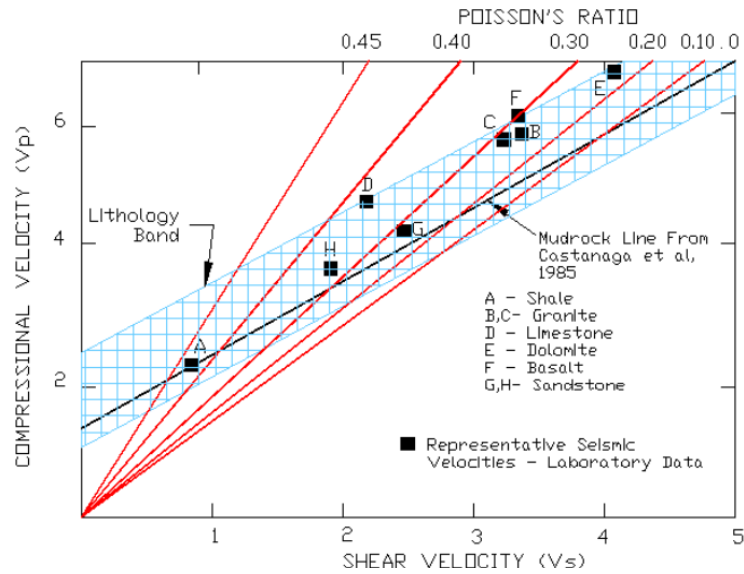


Figure 2 - 2 : Bande de lithologie dans l'espace  $V_p$ - $V_s$  (km/s) (citée par Mount Sopris Instruments co., 2009).

L'étude des ondes P et S est également exploitée pour étudier d'autres propriétés physiques. Par exemple, la porosité de pore  $\phi_o$  est déterminée à partir de l'équation de moyenne temporelle (Wyllie et al., 1956) ( q 2-9).

$$\phi_o = \frac{(\Delta t_{mat} - \Delta t_{mes})}{(\Delta t_{mat} - \Delta t_{fl})} \quad \text{ q 2-9}$$

Où,  $\Delta t_{mes}$ ,  $\Delta t_{mat}$ ,  $\Delta t_{fl}$  sont respectivement l'intervalle de temps de parcours ( $\mu s$ ), mesuré de l'onde P, l'intervalle de temps de parcours dans la matrice et l'intervalle de temps de parcours dans le fluide de saturation.

L'atténuation du signal, autre indicateur acoustique est également retenu pour les approches mécaniques. Les mécanismes d'atténuation du signal sont associés notamment à des interactions entre l'onde et le milieu de propagation (Eitzenberger, 2012). Il faut distinguer l'atténuation due à la présence d'un fluide et l'atténuation due à la présence des discontinuités. L'atténuation se caractérise préférentiellement aux hautes fréquences, par une diminution de l'amplitude de l'onde et un retard au niveau de l'arrivée de l'onde (CFMR-MMR, 2000).

### 2.1.1.5. Propriétés électriques

En géophysique, les propriétés électriques d'un matériau définissent sa réaction à un champ électrique appliqué. Les roches possèdent plusieurs propriétés électriques, notamment la résistivité, la conductivité électrique, la charge électrique, la capacité diélectrique et la polarisation électrique (Serra, 1979 ; Telford et al., 1990). Notre étude se concentre sur la résistivité électrique des roches.

La connectivité et la tortuosité de la porosité ainsi que la nature du fluide et le degré de saturation du matériau influencent la circulation du courant électrique. Archie (1942) a développé une relation empirique entre la résistivité de la roche consolidée et non consolidée saturée  $R_t$  (Ohm.m), la résistivité du fluide de saturation,  $R_w$  (Ohm.m), la porosité,  $\phi$  et le degré de saturation de la roche,  $S$  [Archie, 1942], lors d'études sur des roches sédimentaires saturées. Cette relation est exprimée par l'Éq 2-10 :

$$R_t = R_w a \phi^{-m} S^{-n} \quad \text{Éq 2-10}$$

Où,  $a$ ,  $m$  et  $n$  représentent respectivement le facteur de lithologie, le facteur de cimentation et le facteur de saturation. Le facteur de lithologie varie entre 0.6 pour les roches à porosité intergranulaire et 2 pour les roches qui ont également 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 de la roche, et il est considéré être égal à 2 [selon Von Gonten et Osoba, 1969 ; Gomez-Rivero, 1976].

De plus, la résistivité va se modifier lorsqu'une partie des pores de la roche est remplie par de l'air, du gaz, ou des hydrocarbures ou d'huile.

La Figure 2 - 3 présente les intervalles de résistivités pour les différents types de roche. On distingue que pour un seul type de roche un large intervalle de résistivité.

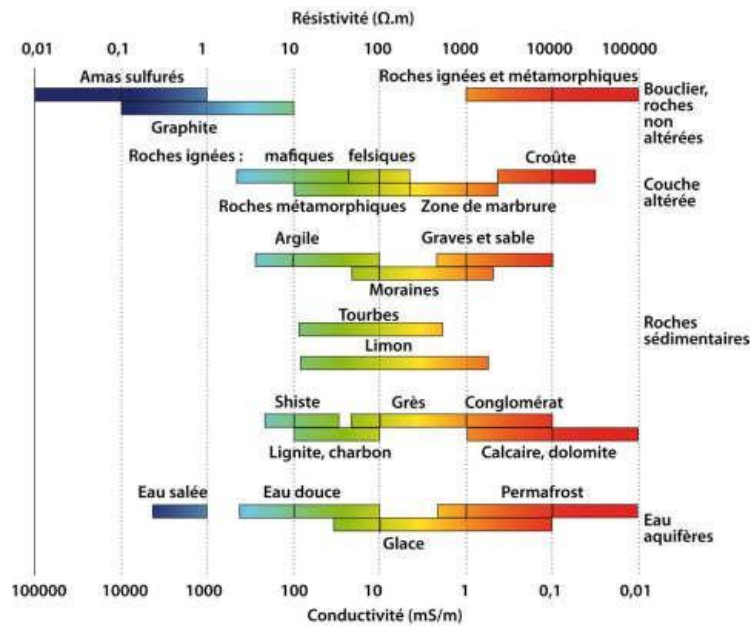


Figure 2 - 3: Résistivité et conductivité électrique de divers types de roche (Palacky, 1987).

### 2.1.2. Discontinuité de la matrice rocheuse

Une discontinuité est une surface qui interrompt la continuité physique d'un massif rocheux. Son identification est indispensable pour étudier le comportement du massif au niveau géologique, géométrique et mécanique.

Leurs présences influencent d'une façon significative le comportement du massif, car elles mènent à (Gasc-Barbier, 2011) :

- Faciliter l'écoulement d'eau et créer des réseaux d'écoulement ;
- Changer la distribution et l'orientation des contraintes ;
- Couper la roche en plaques, blocs et coins ;
- Créer des plans de faiblesse pour le glissement ;
- Entraîner de grandes déformations.

Les caractéristiques géométriques des discontinuités influencent clairement le comportement du massif rocheux (Tahiri, 1992). Parmi ces caractéristiques on note l'orientation, l'extension, l'espacement et la densité, la rugosité, la persistance, l'ouverture et les matériaux de remplissage. A ce jour, l'objectif principal d'une étude géométrique des discontinuités est de déterminer :

- S'il est possible de les classer en familles (orientations voisines) ;



- Si elles décomposent le massif rocheux en blocs (continuité et connectivité importantes).

Les autres propriétés géométriques telles que l'extension, la rugosité, ou l'ouverture dans le massif sont encore inaccessibles.

#### *2.1.2.1. Effet des discontinuités sur les propriétés acoustiques et électriques*

Il est crucial de prendre en compte les effets des discontinuités dans les études géotechniques et géophysiques d'un massif rocheux car leur présence peut avoir des impacts significatifs sur ses propriétés physiques (SSGm, 2009). Les discontinuités dans un massif rocheux peuvent être orientées de manière aléatoire ou avec des orientations dominantes, créant des ensembles de discontinuités. Le massif rocheux est généralement considéré comme continu, et l'effet des discontinuités est pris en compte par la réduction du module de Young, à l'aide de RMR (Rock Mass Rating) (Bieniawski, 1978) ou de l'indice NGI (Norwegian Geotechnical Institute) du système Q (Barton et al., 1974).

Les ondes acoustiques peuvent être altérées par les discontinuités, entraînant des modifications de leur vitesse de propagation, de leur amplitude et de leur direction. Comme mentionné précédemment, les ondes propagées sont atténuées en raison des pertes d'énergie (friction) dans le matériau dans lequel elles se propagent. Dans une masse rocheuse, une atténuation supplémentaire des ondes se produit en raison de la présence de discontinuités. Au niveau d'une discontinuité ou d'une interface entre les régions, les ondes propagées sont soumises à une réflexion et à une réfraction. (Eitzenberger, 2012).

Plusieurs modèles analytiques prenant en compte l'effet des discontinuités individuelles et multiples sur la propagation des ondes ont été développés par différents chercheurs, tels que Pyrak-Nolte et al. (1990a, 1990b), Zhao et al. (2006) et Cai et Zhao (2000).

En ce qui concerne les propriétés électriques, la présence de discontinuités peut modifier la résistivité électrique du massif rocheux, créant ainsi des zones de conductivité différente. Pour exprimer la dépendance entre la résistivité mesurée par un outil géophysique de forage et la double porosité (résistivités de formation et de fracture), la résistivité apparente du milieu peut s'écrire selon l'Éq 2-11 (Tselentis, 1985) :

$$R_a = \frac{1}{f\phi \frac{1}{R_w} + (1 - f\phi) \frac{1}{R_t}} \quad \text{Éq 2-11}$$

Où,  $R_a$  est la résistivité apparente du milieu.

Ainsi, pour un faible indice de fracturation, la résistivité apparente dépend fortement de la résistivité de la matrice rocheuse. La résistivité du fluide est également un paramètre important, car elle contribue à travers la porosité des fissures, qui est exclusivement influencée par la résistivité du fluide.

### 2.1.3. Synthèse

On conclut que les propriétés acoustiques (vitesses des ondes de compression et de cisaillement) d'une roche dépendent largement des conditions de contacts entre ses éléments constitutifs, tandis que celles électriques sont plus sensibles à l'architecture du réseau poreux (connectivité, tortuosité) et à la géométrie des pores (David, 1998). Par ailleurs, les propriétés physiques du massif rocheux (notamment les propriétés acoustiques et les propriétés électriques) dépendent de son état de fracturation. Donc, elles sont sensibles à la présence des discontinuités et même affectées par leur présence.

## 2.2. Diagraphies

Les diagraphies sont des techniques mises en œuvre à l'intérieur d'un forage permettant la caractérisation de la formation dans le voisinage immédiat du forage. Elles désignent tout enregistrement continu d'un paramètre lié à des caractéristiques de la formation rocheuse traversée par un sondage, en fonction de la profondeur. Le résultat obtenu d'une diagraphie se présente sous la forme d'une courbe dans un système de coordonnées où la mesure (résistivité, densité, vitesse d'enregistrement, profondeur, etc.) est indiquée sur un axe horizontal et la profondeur est indiquée sur un axe vertical orienté vers le bas. On distingue deux types de diagraphies, les diagraphies instantanées et les diagraphies différées (Lagabrielle, 2007).

- **Diagraphies instantanées (Logging While Drilling)**

Les enregistrements se font durant le forage, d'où l'appellation instantanée par l'ajout de capteurs dans l'outil de forage. Les informations enregistrées sont principalement la vitesse

d'avancement, la vitesse de rotation, le couple de force, etc. Ils transmettent les mesures acquises en fond de puits jusqu'à la surface par l'intermédiaire d'un générateur d'impulsions qui à leur tour sont transmises par la boue de forage ou par d'autres techniques (Serra, 1982 ; Lagabrielle, 2007 ; Caritg et al., 2016).

- **Diagraphie différée (Wireline Logging)**

Les diagraphies différées servent à déterminer les caractéristiques de la formation une fois les équipements de forage du puits retirés. Elles consistent à descendre des sondes dans le trou de forage afin de mesurer différents paramètres physiques qui sont ensuite reliés aux propriétés dynamiques, géométriques ou autres du milieu. Le principe de fonctionnement dépend des propriétés recherchées électriques, électromagnétiques, diélectriques ou acoustiques de la formation entourant le trou de forage. Les outils de mesure sont connectés à un câble électrique (wireline logging) qui s'enroule autour d'un treuil. Ce câble supporte le poids de la sonde, transporte l'énergie nécessaire pour l'alimentation des circuits électroniques situés dans la sonde et il assure le transport de l'information en surface. (Lagabrielle, 2007 ; Caritg et al., 2016).

Les diagraphies différées peuvent servir à déterminer d'une part la nature minéralogique et le pourcentage des éléments solides majeurs (matrice, ciment, grain) constituant la roche, et d'autre part la nature et le pourcentage des fluides remplissant les pores (Serra, 1982). Les diagraphies différées présentent les avantages suivants (Caritg et al., 2016) :

- Elles ne nécessitent aucun changement du programme de forage au contraire des diagraphies instantanées ;
- Elles permettent de diminuer les temps d'immobilisation de l'appareil de forage ;
- Les coûts de mesure sont moins chers que pour les diagraphies instantanées ;
- La phase de diagraphie est indépendante de l'opération de forage ;
- La décision d'interrompre la descente des sondes de diagraphies différées peut être prise rapidement en cas de risque d'instabilité de la paroi du forage non tubé.

Les géophysiciens utilisent différents outils de diagraphies différées en raison des principes de mesure, des vitesses d'enregistrement, des combinaisons d'outils, des résolutions verticales et de la profondeur d'investigation. Parmi ces outils, on peut citer la diagraphie sonore, la diagraphie de résistivité, l'imagerie de paroi, le rayonnement gamma, le diamètre, la porosité neutron compensée, la photodensité et la résonance magnétique nucléaire...

### 2.2.1. Méthodes de diagraphies utilisées pour caractériser les discontinuités.

La variété et la diversité des méthodes de diagraphie sont extrêmement vastes. La plupart des outils ont été principalement développés pour la caractérisation des réservoirs et cherchent à évaluer les propriétés du matériau environnant le forage (Serra, 1982 ; Desbrandes, 1985). Peu d'entre eux ont pour objectif d'étudier la structure géométrique de la géologie, tels que les contacts entre les formations ou les anomalies singulières comme les discontinuités. Cependant, certains outils permettent de déduire ces éléments grâce à leurs mesures : soit parce que leurs volumes d'investigation offrent une grande finesse dans la détection des variations de propriétés (comme c'est le cas des micro-dispositifs) ; soit parce que leur sensibilité aux singularités peut être exploitée (Serra, 1979 ; Serra, 1982).

Parmi ces méthodes, on peut donc lister un certain nombre de techniques pouvant s'avérer intéressantes pour l'étude des discontinuités. Les méthodes électriques sont sans doute une grande famille qui présente une plus forte sensibilité aux discontinuités (Taillet, 2013 ; 2014). Parmi la variété des méthodes, on peut distinguer la sonde normale qui a été utilisée notamment lors des travaux de Taillet (2013) dans le cadre de la caractérisation des fissures dans les massifs. C'est l'outil qui a également été retenu pour ces travaux de recherche. La méthode est présentée plus en détail dans la partie 2.2.3 de ce document. Outre cette technique, mentionnons également la technique du laterolog, initialement développée pour l'étude des bancs fins. Cette technique diffère de la sonde normale par le fait qu'un dispositif de confinement des lignes de courant permet de mieux maîtriser le volume d'investigation (Doll, 1951 ; Deng et al., 2015). Cette approche a aussi l'avantage de rendre la mesure moins sensible aux caractéristiques du forage (diamètre et résistivités du fluide de forage). Le dispositif sonde normale est également une approche qui s'avère intéressante par sa grande sensibilité aux singularités. Cette technique, utilisée notamment pour l'étude des bancs fins et très fins dans le cadre de l'établissement des logs stratigraphiques, par exemple (Roy et Dhar, 1971 ; Lagabrielle, 2007 ; Zhang et al., 2013 ; Yang et al., 2013), ne permet qu'une détection des anomalies. En effet, cette approche est très sujette à la qualité des contacts et notamment à la position des électrodes (celle en surface fixant le potentiel de référence pour la mesure) et est donc exploitée en termes de variations relatives de résistance électrique. Elle est également assez pénalisée en termes de profondeur d'investigation et limitée dans les possibilités d'inversion des résultats. Les micro-dispositifs peuvent également être évoqués (Serra, 1979 ; Serra, 1982) en raison de leur forte sensibilité aux bancs fins

débouchant dans le forage. Ces techniques visent à caractériser finement les propriétés du forage sur sa surface interne. Les volumes d'investigation extrêmement réduits permettent d'avoir une réponse très sensible à la présence des discontinuités, mais cela implique également qu'il n'est pas envisageable de se projeter au-delà de la surface auscultée, et peut donc conduire à mal distinguer des anomalies de parois liées à la réalisation du forage et des discontinuités géologiques se prolongeant au-delà.

On trouve également les techniques de diagraphie acoustique qui présentent une sensibilité à la présence des discontinuités. La technique en champ total (Full waveform) consiste à enregistrer un spectre acoustique, ce qui permet l'analyse de différentes parties du signal, que ce soit en amplitude ou en temps. Cette approche est utilisée par la suite et est donc présentée plus en détail dans la partie 2.2.2.

Plusieurs études ont démontré la présence d'ondes de compression et de cisaillement en présence de discontinuités dans un massif rocheux (Morris et al., 1964 ; Goldberg et Gant, 1988 ; Tang et al., 2017 ; Barbosa et al., 2021). De plus, les ondes de Stoneley présentent une forte sensibilité à l'endommagement des parois, ce qui les rend très utilisées pour l'identification des milieux fracturés (Brie et al., 2000). Par ailleurs, l'utilisation de sources dipolaires peut également fournir des informations précieuses sur l'anisotropie induite par les fractures (Talebi, 1987).

C'est vers les diagraphies d'imagerie que se tournent plus particulièrement les ingénieurs dans le cadre de la recherche et de la caractérisation des interfaces. Il s'agit d'imager la surface interne du forage avec une résolution extrêmement fine, ce qui permet de détecter et de caractériser en partie les discontinuités. On peut utiliser soit l'imagerie optique, qui enregistre dans le domaine visible et permet la caractérisation des textures des roches pour leur identification, avec une résolution de l'ordre du grain, soit la technique de l'imagerie acoustique, qui travaille avec les retours des signaux acoustiques générés par la sonde d'émission. Cette technique permet d'obtenir une image "mécanique" des roches traversées, avec une résolution similaire à celle de l'imagerie optique (Paillet et al., 1990 ; Williams et al., 2004 ; Li et al., 2012).

Ces méthodes sont très intéressantes pour la détection et la description des caractéristiques de surface. Les mesures azimutales, qui indiquent l'orientation dans le forage, peuvent même fournir des informations sur l'inclinaison des interfaces repérées (section 5.3.1). Cependant, ces méthodes sont limitées à la surface du forage et ne fournissent pas d'informations sur leur extension. De plus, elles sont très dépendantes de l'état de la surface interne du forage, ce qui peut poser des problèmes en cas de dépôts de surface sur les forages plus anciens ou

encore actifs en circulation. Ces outils seront utilisés comme méthodes de validation dans mes travaux, et nous y reviendrons dans le dernier chapitre.

Il existe d'autres méthodes sensibles aux discontinuités considérées comme des bancs très fins, mais qui ne semblent pas présenter d'intérêt pour leur caractérisation (méthodes de polarisation spontanée, méthodes nucléaires, etc.). Nous limiterons donc la liste à ces principales approches.

Dans le cadre de ces travaux, le choix des méthodes a également été lié aux aspects pratiques et à la disponibilité des méthodes au laboratoire ainsi que sur les sites. J'ai donc travaillé avec les méthodes électriques en sonde normale (DN) et avec la technique acoustique en champ total (FW). Nous avons également utilisé les techniques d'imagerie pour la détection des interfaces, puis pour la validation des ouvertures estimées par notre approche.

### 2.2.2. Diagraphie acoustique

La diagraphie acoustique Sonique (Fullwave Sonic log) est une excellente méthode pour l'étude détaillée des massifs rocheux. Elle vise à mesurer la vitesse de propagation du son dans les formations géologiques, tout en utilisant un outil acoustique formé d'un système émetteur et d'un système récepteur. Cette technique permet d'obtenir des informations lithologiques et mécaniques et de déterminer les vitesses de propagation des différentes ondes (Arditty et al., 1984 ; Morris et al., 1984 ; Paillet et Turpening, 1984 ; Mari et al., 1992 ; Mari et al., 1998 ; Mari et al., 2011).

La diagraphie acoustique sonique repose sur l'analyse et le traitement des différents types d'ondes enregistrés par l'outil, et qui se propageant dans un forage rempli de fluide. Notons que la présence de la boue de forage (pouvant être remplacée par un fluide, dans le cas des forages vides) est essentielle, car elle fournit le couplage acoustique entre la formation rocheuse et l'outil de diagraphie.

Il y a deux types d'outils acoustiques utilisés (Figure 2 - 4) : les outils de type monopôle ou de type dipôle. Les outils monopôles sont les plus utilisés, ils se caractérisent par des émetteurs et des récepteurs multidirectionnels. Les émetteurs génèrent dans le fluide une onde de compression P, qui génère dans la formation aux angles limites de la réfraction deux types d'ondes : une onde de compression P et une onde de cisaillement S. Des ondes guidées apparaissent également, comme l'onde de Stoneley pour l'interface solide-fluide et l'onde de Rayleigh pour l'interface solide-air. Les outils acoustiques de type dipôle sont équipés

d'émetteurs et de récepteurs polarisés et ils sont utilisés pour accéder aux paramètres S des formations lentes ( $V_S$  formation  $< V_P$  fluide). Ils génèrent des ondes de compression polarisées perpendiculairement à l'axe du forage, qui créent à la paroi du puits des ondes de flexion. Ces dernières produisent des pseudo-ondes de cisaillement qui se propagent dans la formation parallèlement à l'axe du puits et qui nous aide à déterminer la vitesse de cisaillement dans toutes les conditions (Mari et Vergniault, 2018).

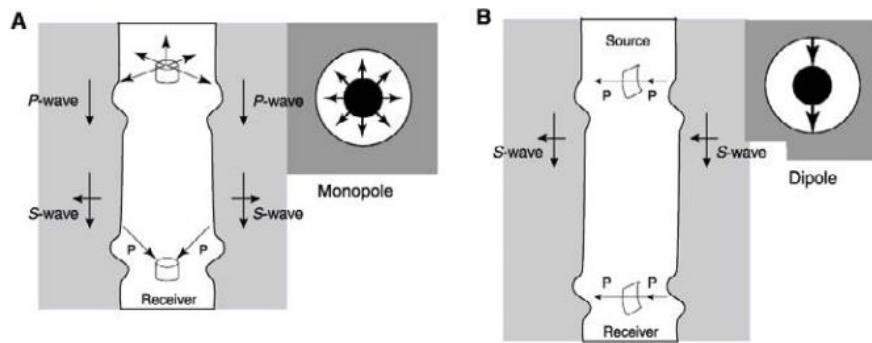


Figure 2 - 4 : Types d'émetteurs Array sonore. A : monopole émetteur donnant une impulsion multidirectionnelle. B : dipôle émetteur donnant une impulsion dirigée. (Cité par Mari et Vergniault, 2018).

Dans le cas typique d'un forage rempli de fluide, la formation rocheuse est caractérisée par une vitesse de compression  $V_P$ , supérieure à la vitesse de cisaillement  $V_S$ , qui à son tour est plus importante que la vitesse de compression du fluide  $V_f$  (Figure 2 - 5). Lorsqu'une source monopôle, émet une impulsion de compression dans un forage rempli de fluide, elle génère tout d'abord une onde dans le fluide. Cette onde fluide se propage à une vitesse de  $V_f$  et atteint la paroi du trou de forage, où elle excite à la fois des ondes de compression et de cisaillement dans la formation. À ce stade, une part de l'énergie est réfléchiée dans le trou de forage et une part est réfractée et transmise avec un angle critique. Les ondes de compression et de cisaillement réfractées constituent les ondes de tête et se propagent dans le trou de forage à des vitesses de  $V_P$ , et de  $V_S$ , respectivement. De plus, ces ondes transmises sont confrontées aux contrastes d'impédance acoustique de la formation, qui servent à leur tour à disperser l'énergie vers le trou de forage où se trouvent les récepteurs de l'outil de diagraphie. Les propriétés géométriques du forage rempli de fluide captent également des modes d'ondes supplémentaires tels que les ondes pseudo-Rayleigh et Stoneley (Mari et Vergniault, 2018).

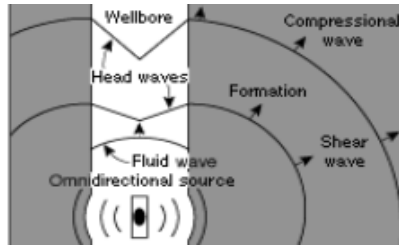


Figure 2 - 5 : Coupe transversale du trou de forage illustrant la propagation des ondes acoustiques dans le fluide de forage et dans la formation autour du trou de forage (pour  $V_p > V_s > V_f$ ) (Schlumberger, 1997).

Donc, les outils monopoles permettent d'enregistrer cinq modes de propagation (Mari et Vergniault, 2018) :

- Onde de compression réfractée ;
- Onde de cisaillement réfractée, uniquement en formation rapide ( $V_s > V_p$  fluide) ;
- Onde de fluide ;
- Deux ondes guidées dispersives ;
  - Les ondes de Stoneley ;
  - Les ondes de pseudo-Rayleigh.

Chaque mode d'onde se caractérise par un comportement spécifique. Le Tableau 2 - 2 présente un résumé des différentes propriétés de chaque type d'onde.



Tableau 2 - 2 : Résumé des principaux modes d'ondes dans le forage ( $V_P > V_S > V_f$ ) (Chabot, 2003 ; Rajabi et al., 2010).

|  | <b>P</b>  | <b>S</b>  | <b>Rayleigh</b>  | <b>Fluide</b>                        | <b>Stoneley</b>   |
|--|---|---|--|--------------------------------------|---|
| Type                                     | Onde de volume  | Onde de volume  | Guidé par le puits de forage   | Onde de volume                       | Guidé par le puits de forage  |
| Force                                    | Faible amplitude  | Amplitude modérée   | Amplitude élevée   | Faible amplitude                     | Amplitude élevée  |
| Amplitude                                | Répartition géométrique et facteur de qualité de la roche Q | Répartition géométrique et facteur de qualité de la roche Q et une vitesse de cisaillement supérieure à la vitesse de compression du fluide | Décroit de façon exponentielle avec la distance tout en éloignant de la paroi du trou de forage et oscillatoire dans le fluide |                                      | Décroit de façon exponentielle avec la distance tout en éloignant de la paroi du trou de forage Diminue lentement avec la distance axiale |
| Vitesse (phase et groupe)                | Vitesse indépendante de la fréquence                        | Vitesse indépendante de la fréquence  | Vitesse dépendante de la fréquence   | Vitesse indépendante de la fréquence | Vitesse légèrement dépendante de la fréquence   |
| Vitesse                                  | $V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$                  | $V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$   | Approche la vitesse S à faible f   | $V_{fluide}$                         | $V_{st} \approx 0.8 - 0.9 V_f$  |
| $\lambda ; \mu$ : coefficients de Lamé ; |   |   |  |                                      |   |

Les différents modes d'ondes enregistrés par les récepteurs situés le long de l'axe du forage, dépendent également de la source d'onde, des caractéristiques de l'outil de diagraphie, du diamètre du trou de forage, des propriétés des fluides ainsi que des propriétés de formation (Chabot, 2003). Le forage peut être un trou ouvert, un trou tubé cimenté ou un trou tubé (acier et/ou PVC) (Lagabrielle, 2007).

La profondeur d'investigation de la diagraphie sonore dépend des longueurs d'onde dominantes, ce qui implique que la pénétration est plus importante pour les formations à basse fréquence et à vitesse plus élevée (Rider, 1996).

En diagraphie acoustique, les ondes P et S sont utilisées pour identifier la lithologie d'une formation rocheuse en calculant le rapport  $V_P/V_S$ , ainsi que pour déterminer ses propriétés mécaniques, comme le coefficient de Poisson. Par ailleurs, les ondes de Stoneley peuvent être employées pour estimer la perméabilité de la formation le long du puits, selon les travaux de Brie et al. (2000).

Plusieurs études ont été menées pour évaluer l'impact des discontinuités dans les massifs rocheux sur la réponse des ondes P et S. Ces recherches ont été menées à partir de simulations numériques (Matuszyk et al., 2013 ; Yan et al, 2020 ; Pardo et al., 2021 ; Xu et al., 2021 ; Barbosa et al., 2021), de données de site (Morris et al., 1964 ; Goldberg et Gant, 1988 ; Tang et al., 2017 ; Barbosa et al., 2021) ou d'échantillons de laboratoire (Zlatev et al., 1988 ; Pan et al., 2017). Bien que la plupart des recherches se soient concentrées sur la réponse des ondes P, il est important de noter que les ondes S sont également sensibles à la présence de discontinuités (Goldberg et Gant, 1988 ; Yan et al., 2020).

Barbosa et al. (2019) ont proposé une méthode efficace pour estimer la compliance (la capacité d'un matériau à se déformer en réponse à une force externe) des fractures à partir de l'analyse d'atténuation et de vitesse des données de diagraphie sonore de forme d'onde complète. Cependant, cette méthode ne permet pas de caractériser la géométrie ou l'orientation des fractures. En revanche, les ondes S sont particulièrement utiles pour caractériser ces paramètres. En effet, Qinghua (2022) a signalé que les ondes de cisaillement étaient plus atténuées que les ondes P dans le régime de propagation. Il est donc important d'exploiter la réponse des ondes S pour une meilleure caractérisation des discontinuités.

En utilisant des échantillons de laboratoire, Pan et al. (2017) ont proposé des équations qui relient l'ouverture des fractures (d'ordre millimétrique) à l'atténuation de la vitesse et de l'amplitude des ondes P et S, séparément. Ils ont également suggéré que la combinaison des mesures de vitesse acoustique et d'atténuation d'amplitudes pourrait être bénéfique pour une meilleure caractérisation des fractures.

### 2.2.3. Diagraphie électrique

En génie civil, la diagraphie de résistivité sert principalement à identifier la lithologie du terrain traversé par un forage, et à étudier le degré de fracturation d'un massif rocheux (Lagabrielle, 2007). La résistivité est un paramètre très discriminant des matériaux du sous-sol, car elle présente une forte étendue de variations et des contrastes importants. Elle représente la capacité du milieu à s'opposer au passage du courant électrique. La résistivité apparente est obtenue par la formule suivante (Serra, 1979) (Éq 2-12):

$$R_a = K_s \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Éq 2-12}$$

Où,  $K_s$  et le coefficient géométrique de sonde, il représente un facteur géométrique qui dépend du dispositif utilisé.  $\Delta V$  Représente la différence de potentiel et  $I$  représente le courant.

Pour chaque outil utilisé, la distance entre électrode de mesure de potentiel et électrode d'injection du courant est représentée par le terme d'espacement  $L$ . La relation entre  $L$  et la profondeur d'investigation de l'outil est proportionnelle : Plus  $L$  est grand, plus la profondeur d'investigation sera grande, influencée également par les résistivités dans le volume et leur arrangement.

Il faut s'assurer que le couplage électrique entre le terrain et les électrodes portées par la sonde soit d'une bonne qualité. Donc, il est défavorable d'avoir des tubages métalliques ou plastiques continus dans le trou de forage. Si le forage est tubé avec un tubage plastique, ce dernier doit être crépiné (Lagabrielle, 2007). Notons qu'il est impossible de prendre des mesures électriques dans un forage sec, car c'est le fluide (eau, boue ou mousse conductrice) contenu dans le forage qui assure le couplage électrique (Lagabrielle, 2007).

- **Dispositif normal**

Historiquement, la sonde normale est utilisée depuis les années 50 en prospection pétrolière. Le dispositif normal (DN) est la technique la plus classique pour mesurer la résistivité de la formation. Son utilisation est variée. Il est utilisé pour l'optimisation de l'hydro fracturation de terrains accidentés (M. Beck et al., 2001 ; Jamtlid et al., 1984), de plus dans la détermination de discontinuités dans l'encaissant et de leurs paramètres physiques (Luthi et Souhaité, 1990 ; Tselentis, 1986), et dans la caractérisation de la dynamique de karst (Angulo et al., 2011).

La Figure 2 - 6 montre l'implantation des électrodes de l'outil. Ce dispositif possède une électrode de courant A qui injecte dans le forage un courant de basse fréquence et d'intensité  $I$ . La seconde électrode, nécessaire à l'injection, est implantée à la surface (électrode B). Une électrode de potentiel M est dans le forage à une distance de l'électrode A appelée espacement. La seconde électrode de potentiel permettant d'avoir le potentiel de référence, est notée N est située en surface. Il faut s'assurer que les électrodes de surface B et N soient suffisamment éloignées pour éviter tout phénomène d'inductance.

L'espacement AM conditionne la mesure de résistivité (Schlumberger, 1950). Deux espacements AM sont fixés dans la pratique, tels que, la petite normale, (N 16 pouces), (AM = 40 cm) et la grande normale, (N64 pouces), (AM = 160 cm). Mais, il existe d'autres sondes

où l'espacement peut correspondre à très petite normale, (N8 pouces), ( $AM = 20$  cm), et à la moyenne normale, (N32 pouces), ( $AM = 80$  cm), les quatre dispositifs pouvant être portés sur la même sonde pour des mesures simultanées. Il faut bien noter que, l'augmentation de l'espacement permet d'augmenter le rayon d'investigation autour du forage. Le point de mesure de la résistivité est porté au milieu O de la distance entre la source de courant (A) et l'électrode de mesure du potentiel (M) (Serra, 1979 ; Anderson, 2001 ; Lagabrielle, 2007 ; Taillet, 2013).

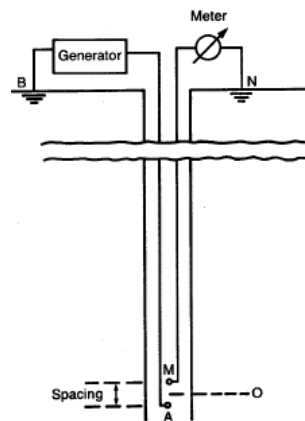


Figure 2 - 6 : Configuration d'électrode schématisée pour l'outil normal (Anderson, 2001).

Dans un milieu isotrope homogène, les lignes de courant se répartissent de manière uniforme dans toutes les directions. Les équipotentielles entourant l'électrode d'injection de courant A sont sphériques avec un diamètre qui augmente en s'éloignant de A (Figure 2 - 7). D'après l'équation de Poisson le potentiel  $V_M$  s'écrit selon l'Éq 2-13 :

$$V_M = \frac{R_t}{4\pi AM} I \quad \text{Éq 2-13}$$

Où,  $R_t$  est la résistivité du milieu (Ohm.m),  $I$  est l'intensité du courant (A) et  $AM$  la distance entre A et M(m).

La résistivité apparente mesurée correspond à la combinaison de contribution de chaque élément du matériau compris dans le volume d'investigation défini par un rayon dépendant de l'espacement  $AM$ . De plus, le calcul de la résistivité apparente  $R_a$ , dépend du potentiel  $V_M$ , de l'intensité du courant  $I$  (Éq 2-14).

$$R_a = 4\pi AM \frac{V_M}{I} \quad \text{Éq 2-14}$$

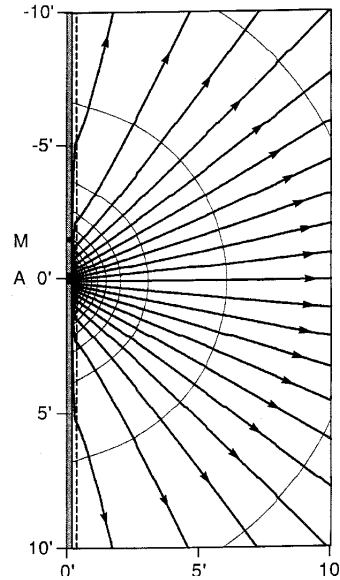


Figure 2 - 7 : Répartition des lignes de courant (lignes sombres avec des flèches) et des équipotentielles (lignes lumineuses orthogonales) (Anderson, 2001).

Le rayon d'investigation est une notion similaire à la profondeur d'investigation lors de mesures en surface. En effet, la densité de courant décroît avec l'éloignement de la source, il est souvent difficile de définir la profondeur du signal en termes de pénétration ou de distribution du courant dans les cas réels. De plus, il est difficile d'estimer le volume d'investigation dans la configuration de forage en raison de la géométrie de l'ouvrage, y compris le forage lui-même, les surfaces du trou et les interfaces des formations. En théorie, le volume d'investigation est estimé en fonction de la différence de potentiel entre deux sphères dans un milieu infini et homogène (Figure 2 - 8) (Taillet, 2013), selon l'équation 2-15.

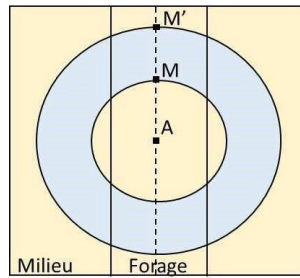


Figure 2 - 8 : Représentation du volume d'investigation (Taillet, 2013).

$$dV = \frac{R I}{4\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AM'} \right) \quad \text{Éq 2-15}$$

Dans les travaux de Roy et Dhar, 1971, le rayon d'investigation est estimé par convention pour une chute de 50% du potentiel :  $V_{AM'} = 0.5 V_{AM}$ . Pour une sonde normale, le rayon d'investigation est égal à  $2AM$ , donc  $AM' = 2AM$ . Cependant, plusieurs limites contrôlent la détermination du volume d'investigation (Roy et Dhar, 1971) :

- Le concept établi par Schlumberger recommande que la mesure de résistivité soit définie par les informations récupérées du matériau qui existent entre la sphère de rayon  $AM'$  et la sphère de rayon  $AM$ . Tout en indiquant que le matériau qui se trouve à l'extérieur du rayon  $AM'$  et à l'intérieur du rayon  $AM$  n'influe pas sur les mesures, ce qui n'est pas juste. Car, si on prend en compte la présence du forage et de ses caractéristiques, il est clair que les informations en dehors des limites fixées vont affecter d'une façon significative les mesures de résistivités. (Roy et Apparao, 1971) vérifient que toutes les contributions du sol proche ou lointain, interne ou externe au rayon  $AM$  influent sur le signal enregistré.
- Dans un milieu homogène, le courant circule dans toutes les directions suivant une sphère centrée en A, mais il faut souligner l'effet du fluide conducteur de forage. Ce dernier modifie la répartition et la distribution de la densité du courant. Donc, il paraît plus évident de présenter ce volume comme un cylindre centré en A, coaxial avec le trou de forage et dont la section cylindrique plane est perpendiculaire à l'axe du trou (Taillet, 2013). De plus le diamètre de forage influe sur la détermination du volume d'investigation et par la suite sur le signal enregistré (Serra, 1979 ; Hallenburg, 1984 ; B. I. Anderson, 2001). Enfin, il existe pour chaque outil, un diamètre de forage maximal d'utilisation (Serra, 1982).

L'allure des résultats enregistrés est affectée directement par l'épaisseur des couches, leurs propriétés physiques et leur composition (Serra, 1979). Il est difficile de détecter une couche mince située entre deux couches résistantes ou conductrices. Cette difficulté est liée principalement à la résolution verticale de l'outil, qui joue un rôle essentiel sur l'identification des différentes composantes et caractéristiques du milieu. La résolution diminue avec l'augmentation de l'espacement AM. Lorsque le modèle fait intervenir des couches fines ou des couches très résistantes, on distingue la présence d'un écart important entre la résistivité vraie et la résistivité apparente. En général, lorsque l'épaisseur d'une couche résistive est 10 fois plus grande que l'espacement entre les électrodes dans une mesure de résistivité, la résistivité apparente sera proche de la résistivité réelle du matériau. En revanche, si l'épaisseur de la couche résistive est 6 fois plus petite que l'espacement des électrodes, il y aura une différence significative entre la résistivité apparente et la résistivité réelle du matériau mesuré.

Notons que le volume d'investigation est sensible à la présence du forage. La résistivité reçue sur le matériau est plus pertinente lorsque le diamètre du forage est réduit. Pour chaque outil il existe un diamètre maximal d'utilisation (Serra, 1982). Dans le cas où le diamètre du forage est important et la résistivité du fluide est faible, on constate des modifications au niveau des mesures et du volume d'investigation (Serra, 1979 ; Hallenburg, 1984; Anderson, 2001).

La Figure 2 - 9 illustre quelques réponses diagraphiques, qui présentent la sensibilité du dispositif normal aux propriétés physiques et géométriques des couches, (Serra, 1979) :

- a) Réponse diagraphique d'une couche épaisse et résistante. L'épaisseur de cette couche est représentée par les deux points d'inflexion se trouvant de part et d'autre de la courbe. L'erreur de sous-estimation de l'épaisseur est égale à l'espacement du dispositif.
- b) Réponse diagraphique d'une couche résistante et mince. L'épaisseur de la couche ( $e$ ) est déterminée en soustrayant l'espacement de la distance entre les deux maxima. On note également que la couche apparaît conductrice alors que la couche est plus résistive. On parle dans ce cas d'inversion de la résistivité pour la couche fine résistante.

- c) Réponse diagraphique d'une couche conductrice. L'erreur de surestimation de l'épaisseur est égale à l'espacement AM.
- d) Réponse diagraphique d'une couche conductrice et mince. Leur réponse est représentée par une baisse de la résistivité. L'erreur de surestimation de l'épaisseur est égale à l'espacement AM.

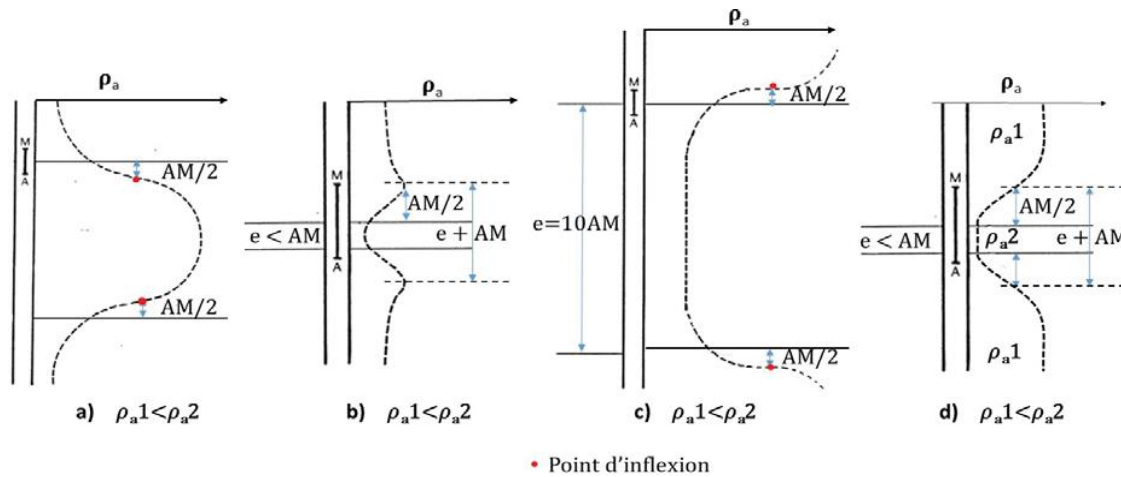


Figure 2 - 9 : Influence de l'épaisseur des bancs et de la résistivité, (Serra, 1979).

En 2013, Taillet a mené une étude sur la détection des fissures dans les ouvrages en béton massif en utilisant la diagraphie électrique de résistivité. Les résultats ont montré que cette technique était sensible. Cependant, il y a une incertitude quant à la capacité de la sonde électrique à détecter les discontinuités fines, et les résultats peuvent être sensibles au contraste entre la résistivité du béton et celle de la fissure équivalente : la détection est nette quand la fissure est plus conductrice que la matrice rocheuse

#### 2.2.4. Discussion : Complémentarité des méthodes de diagraphies

Les diagraphies différées peuvent être utilisées à la fois comme un outil visuel qualitatif pour identifier les principaux types de roches et aussi pour déterminer leurs propriétés mécaniques.

Notons qu'un seul outil ne peut pas effectuer une évaluation complète du massif rocheux, car chaque outil est sensible à une propriété physique spécifique et se caractérise par une résolution et une profondeur d'investigation différente (Figure 2 - 10). De même chaque outil a ses propres intérêts et ses propres inconvénients (Tableau 2 - 3).



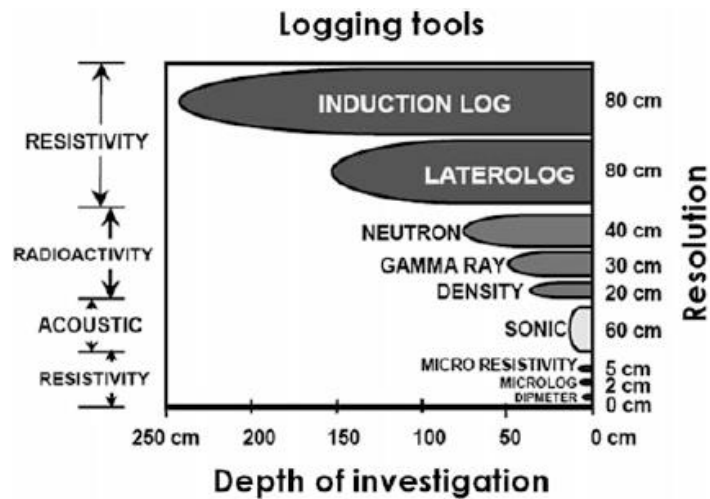


Figure 2 - 10 : Profondeur d'investigation et résolution des outils d'investigation (Bjørlykke, 2015).

Tableau 2 - 3 : Synthèse des deux techniques de mesure diagaphiques (Fullwave sonic, et de résistivité).

| Outil | Rayon d'investigation                       | Intérêt  | Inconvénients   |
|-------|---|--|---|
| FWS   | Dépend de la longueur d'onde<br>0.1 - 0.4 m | Propriétés mécaniques  | Complexité de l'interprétation des données acoustiques reçues                           |
| DN    | 0.4 - 1.3 m                                 | - Propriétés électriques/de transfert<br>- Rayon d'investigation | Incertitude à détecter les fines discontinuités<br>Sensibilités au contraste (Mat/disc) |

L'outil FWS est largement utilisé pour la détection in situ des discontinuités, en raison de l'impact significatif de leur présence sur la propagation des ondes sismiques (diminution de la vitesse de propagation et de l'amplitude des ondes). La profondeur d'investigation de la diagraphie sonique est généralement de l'ordre du décimètre et dépend des longueurs d'onde dominantes. Barbosa et al., (2019), ont proposé une méthode pour relier l'élasticité des fractures aux paramètres d'atténuation d'amplitude et de changement de vitesse de l'onde P, car les ondes acoustiques présentent une forte sensibilité aux propriétés mécaniques du milieu. De plus, comme indiqué précédemment, les ondes S sont plus sensibles à la présence de discontinuités, ce qui souligne l'intérêt d'étudier les réponses des ondes P et S pour caractériser efficacement les propriétés d'une discontinuité.

La diagraphie de résistivité normale DN est une technique électrique couramment utilisée pour étudier les propriétés pétrophysiques, telles que la porosité et la saturation. Cependant,

elle est sensible aux hétérogénéités du milieu, ce qui peut rendre difficile la détection et la caractérisation des discontinuités dans un massif rocheux. Bien que cette technique permette d'identifier les discontinuités les plus profondes jusqu'à un rayon d'investigation important d'environ 1 mètre, elle ne permet pas de déterminer les propriétés mécaniques du milieu.

Les travaux récents de Taillet (2013) ont exploité la résistivité normale pour diagnostiquer les propriétés géométriques et électriques des interfaces dans des ouvrages massifs. Cependant, bien que la méthode ait montré son efficacité, certaines limites ont été identifiées. Parmi celles-ci, la complexité de la géométrie des discontinuités et des inhomogénéités du milieu environnant est un facteur important. Si la fracture est épaisse et peu conductrice, elle peut être difficile à détecter, donnant une valeur de résistivité similaire à celle d'un matériau homogène et conducteur. En revanche, si la fracture est fine et très conductrice, elle peut être détectée de manière excessive, ce qui peut fausser les résultats. Par conséquent, pour une caractérisation précise des propriétés d'une discontinuité, Taillet a recommandé d'utiliser la diagraphie électrique de résistivité en combinaison avec d'autres techniques.

Cependant, Day-Lewis et al. (2017), ont recommandé l'utilisation combinée de plusieurs techniques géophysiques pour améliorer la précision et la résolution spatiale de la caractérisation des sites de roches fracturées. Les deux outils, DN et FWS, sont tous deux influencés par les discontinuités dans les formations rocheuses, mais chacun avec une sensibilité différente en termes de profondeur d'investigation et de propriétés physiques. Dans nos travaux, nous nous sommes intéressés à évaluer le potentiel de la combinaison des réponses de ces deux outils pour surmonter les limites de chaque méthode et bénéficier de la spécificité de chacune, afin de caractériser avec précision les propriétés des discontinuités géométriques, mécaniques et électriques présentes dans un massif.

De nombreuses études ont mis en avant les avantages de la combinaison des données provenant de différentes techniques géophysiques pour caractériser plus précisément les propriétés physiques et mécaniques de la matrice rocheuse (Chang et al., 2005 ; Abdi et al., 2018 ; Baouche et al., 2017 ; Almalikee, 2019 ; Wood, 2020). Par exemple, Abdi et al. (2018) ont prédit les paramètres de résistance (compression uniaxiale et module d'élasticité) des roches sédimentaires à partir de propriétés physiques mesurables telles que la vitesse d'onde P, la densité, la porosité et l'absorption d'eau, en utilisant deux approches : les réseaux de neurones artificiels (RNA) et l'analyse de régression multiple (RM). Baouche et al. (2017)

ont également appliqué ces mêmes approches pour prédire la perméabilité et la porosité du massif rocheux en utilisant des données diagraphiques. Ces outils (RNA et RM) ont été largement utilisés par les scientifiques et les ingénieurs dans divers domaines tels que le génie civil, la physique, les statistiques, etc. (Huang et He, 2022). Par exemple, ils ont été utilisés pour prédire les performances du tunnelier en fonction des propriétés de la roche et de la machine (Yagiz et al., 2009) ou encore pour prédire la résistance à la compression uniaxiale (UCS) à partir du module élastique des roches (Yang et al., 2013) ou en utilisant trois tests non destructifs (vitesse des ondes P, marteau de Schmidt et densité) (Liu et al., 2022).

Aucune étude antérieure n'a examiné la combinaison des données acoustiques et électriques pour caractériser les discontinuités dans un massif rocheux. On peut toutefois mentionner les travaux réalisés dans le domaine du Contrôle Non Destructif sur les ouvrages en béton, où la combinaison acoustique/électrique a été étudiée pour la caractérisation des fissures (Goueygou et al 2008, Lataste et al. 2003). Pour les mesures en forage dans les roches, nous cherchons à améliorer cette compréhension en combinant les ondes P et S en termes de retard et d'atténuation associés à ces discontinuités, suivant les recommandations de Pan et al. (2017). Bien que cette approche ait été développée pour l'onde P (Barbosa et al., 2019), nous explorons son potentiel pour les ondes P et S. Nous poursuivons également les travaux de thèse de Taillet (2013) en combinant les mesures acoustiques et électriques pour caractériser les propriétés géométriques, mécaniques et électriques des discontinuités, en utilisant des approches de combinaison de données telles que le RNA et le RM. Ces trois aspects de mon travail constituent l'originalité de ma thèse.

## 2.3. Approche méthodologique

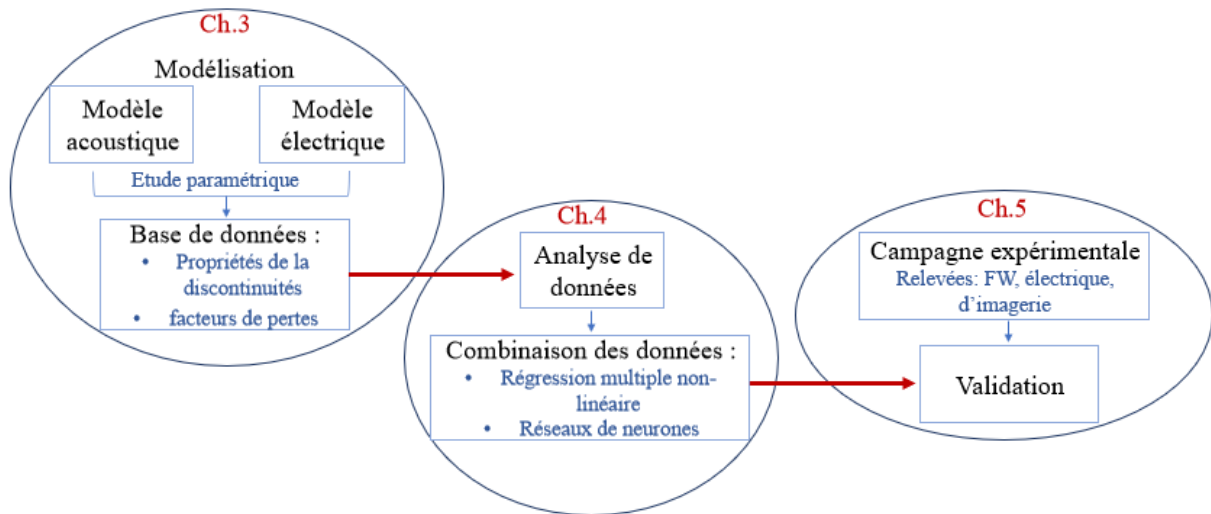


Figure 2 - 11 : Schéma qui montre la méthodologie de travail.

La Figure 2 - 11 illustre l'approche du travail pour répondre à la problématique de ce projet de recherche : la caractérisation par la combinaison de données reçues des deux techniques de diagraphie (FWS, DN) des propriétés d'une discontinuité dans une masse rocheuse. Cette thèse est divisée en trois parties : travail de modélisation, analyse de données et campagnes expérimentales. Le travail initial dans le Chapitre 3 a été mené sur la simulation numérique des réponses de deux techniques de diagraphie (acoustique et électrique). Il s'agit d'une étude paramétrique portant sur les propriétés géométriques, mécaniques et électriques des différents éléments constituant le modèle (discontinuités, matrice rocheuse). De plus, cette partie vise à proposer une méthode de travail pour quantifier la perte acoustique et électrique face à la présence d'une discontinuité dans un massif rocheux. Ce travail a servi à constituer une large base de données formée par les différentes propriétés géométriques, mécaniques et électriques de la discontinuité (grandeur observable), et les différents facteurs de pertes acoustique et électrique déterminés (grandeurs indicatives). Par la suite, le Chapitre 4 a été consacré à l'analyse et à la combinaison de données. D'abord, une analyse de données a été nécessaire pour déterminer la dépendance entre les grandeurs observables et les grandeurs indicatives pour bien identifier les poids des relations entre les différents facteurs de perte et les différentes propriétés de la discontinuité. Une fois ces relations identifiées, deux techniques de combinaison des données (régression multiple non linéaire et réseaux de neurones) ont été appliquées pour corréliser les paramètres observables et les paramètres de

jeu. Le chapitre 5 présente des relevés (acoustique FWS, électrique DN et d'imagerie) effectués sur un site de calibration au Canada. Ces relevés servent à valider notre approche de travail sur des données réelles, le diagnostic visant à déterminer l'ouverture de la discontinuité.

## Chapitre 3 : Modélisation des réponses diagraphiques

Le chapitre 3 de cette thèse expose les travaux réalisés en vue de modéliser la réponse de deux outils diagraphiques (FWS, DN) dans un contexte de forage. Nous commençons par aborder la définition du modèle d'éléments finis, en mettant en évidence les spécificités communes et propres à chacune des deux techniques. Ensuite, nous décrivons l'élaboration des paramètres d'étude, désignés comme des facteurs de perte, qui seront utilisés dans l'étude paramétrique présentée par la suite. L'objectif de ce chapitre est donc d'identifier des indicateurs (facteurs de pertes) acoustiques et électriques, puis d'étudier leur sensibilité aux différentes propriétés géométriques, mécaniques et électriques d'une discontinuité remplie.

La modélisation de la réponse de la sonde FWS vise à étudier la réponse en termes de vitesse et d'amplitude des ondes P et S. Pour la sonde électrique normale ce sera en termes de résistivités apparentes. Ces modèles visent également à quantifier la sensibilité des mesures tout en réalisant une étude paramétrique. Pour cela, la méthode des éléments finis a été utilisée avec le logiciel Comsol Multiphysics 6.0. Les modélisations des sondes FWS et DN ont été réalisées indépendamment. Pour simuler la réponse de la sonde FWS, le module de mécanique des structures et d'acoustique a été utilisé, tandis que le module AC/DC a été utilisé pour simuler la réponse de la sonde DN. Il convient de noter que pour réduire le temps de calcul des modèles, les dimensions des deux modèles sont différentes. En effet, le modèle électrique est plus grand en raison de la présence de la bride située à 7 mètres au-dessus de la sonde (Chapitre 5).

Plusieurs hypothèses ont été prises en compte pour les deux modèles, notamment : (1) la modélisation est menée en 2D axisymétrique. Étant donné que l'investigation est réalisée en forage, les modèles ont été simplifiés en un modèle 2D en axisymétrie pour réduire le temps de conception et de calcul. (2) Les discontinuités sont horizontales perpendiculaires à l'axe de forage, ce qui a limité l'étude aux modèles simples. (3) Le diamètre du forage est maintenu à 7.62 cm et de l'eau est utilisée comme fluide de forage. (4) Les propriétés du milieu environnant sont désignées comme étant de la roche ignée pour choisir les valeurs des caractéristiques de l'encaissant. Ces conditions de forage (diamètre, fluide de forage, milieu environnant) ont été respectées pour refléter les conditions réelles du site de validation, site national de calibration Bells corners à Ottawa, Ontario, Canada, (un site pour le développement et la calibration d'instruments et de techniques géophysiques de forage au

Canada), telles que décrites dans le chapitre 5. Les simulations de chaque modèle sont décrites en détail dans les paragraphes suivants.

### 3.1. Modèle acoustique

Nous simulons la réponse d'une sonde sonore FWS 2SAA-1000-F de 3.05 mètres de longueur, équipée de récepteurs situés à différentes distances de l'émetteur (R1 à 0.9 m, R a à 1.2 m, R3 à 1.5 m) (Figure 3 - 1). L'émetteur simule le signal émis par la sonde, tandis que les récepteurs enregistrent un signal acoustique complet à une fréquence d'échantillonnage temporelle fixe (4  $\mu$ s) pour une durée donnée.

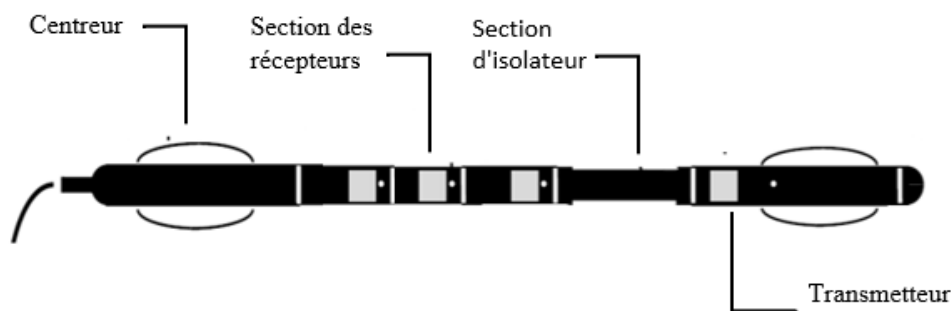


Figure 3 - 1 : Outils acoustiques : outil monopôle (Mount Sopris Instruments co., 2009).

#### 3.1.1. Présentation du modèle acoustique sonore

- **Domaine d'étude**

Toutes les simulations ont été réalisées dans le domaine fréquentiel. Ce choix résulte du fait que la résolution du problème dans le domaine fréquentiel présente des avantages par rapport à une résolution directe dans le domaine temporel : Une étude dans le domaine temporel nécessite souvent des simplifications supplémentaires du modèle telles que des réductions des interactions physiques, qui ne sont valables que dans la limite des basses fréquences (Dupuy et al., 2011). En outre, lors de la modélisation de problèmes couplés complexes, une telle simplification peut conduire à des résultats non physiques.

Une simulation dans le domaine fréquentiel découple le problème en un ensemble de sous-problèmes indépendants (un par fréquence). Les méthodes du domaine fréquentiel évitent le contrôle fastidieux du temps pour assurer la stabilité des résultats, simplifient la modélisation

des propriétés des roches dépendantes de la fréquence telles que l'atténuation et facilitent la mise en œuvre d'une couche limite absorbante technique telle que la couche parfaitement adaptée (PML : Perfectly Matched Layers) (Michler et al., 2008). Cette couche assure la réduction des réflexions non physiques d'onde par une troncature du domaine de calcul.

- **Mise en équation du problème**

Dans ce qui suit, nous décrivons le cadre mathématique utilisé pour résoudre le problème de propagation des ondes sismiques dans un modèle composé d'un domaine acoustique ( $\Omega_A$ ), représentant un forage rempli de fluide entouré d'un domaine élastique ( $\Omega_E$ ), et représentant une roche hétérogène. La propagation des ondes acoustiques dans ( $\Omega_A$ ) est décrite par l'équation de Helmholtz pour la pression du fluide  $p$  (domaine fréquentiel) :

$$-\Delta p - k^2 p = 0, \quad \text{Éq 3-1}$$

Où  $\Delta$  représente l'opérateur de Laplace,  $p$ , est la transformée de Fourier de la pression et  $k = \omega / V_{fluide}$ , le nombre d'ondes avec  $\omega$ , la fréquence angulaire et  $V_{fluide}$ , la vitesse du son dans le fluide. D'autre part, la propagation des ondes dans le domaine élastique ( $\Omega_E$ ) est décrite par les équations de l'élasticité linéaire. Ces équations représentent les équations d'équilibre, de la quantité de mouvement linéaire et, la loi de Hooke, qui dans le domaine fréquentiel ont la forme suivante :

$$\begin{cases} -\nabla; \sigma - \rho_f \omega^2 u = 0 \\ \sigma = C; \varepsilon \\ \varepsilon(u) = \frac{1}{2} (\nabla u + \nabla^T u), \end{cases} \quad \text{Éq 3-2}$$

Où  $u$  représente la transformée de Fourier du déplacement,  $\rho_f$  la densité du fluide,  $\sigma$  et  $\varepsilon$  sont respectivement le tenseur de contrainte de Cauchy et le tenseur de déformation linéaire, et  $C$  est le tenseur élastique du quatrième ordre (Matuszyk et al., 2013).

Les équations ci-dessus sont complétées par les conditions de couplage au niveau de l'interface solide-fluide ( $\Gamma_1$ ), tout en imposant la continuité des tractions et des déplacements normaux :



$$\begin{cases} \sigma; n_s = -n_s p \\ n_f; \nabla p = \rho_f \omega^2 n_f; u \end{cases} \quad \text{Éq3-3}$$

Où  $n_f$  et  $n_s$  représentent respectivement les vecteurs unitaires normaux dans les domaines acoustiques (fluide) et élastiques (solide).

- **Bandes extérieures PML**

Le modèle comprend des couches parfaitement adaptées (PML) aux limites latérales, supérieures et inférieures du modèle pour imposer des conditions de rayonnement Sommerfeld (Figure 3 - 2). Une couche parfaitement adaptée (PML) est une couche absorbante artificielle utilisée pour simuler des problèmes avec des frontières ouvertes. Cette couche permet d'assurer la réduction des réflexions d'ondes non physiques au niveau des frontières limites (Michler et al., 2008 ; Matuszyk et al., 2013).

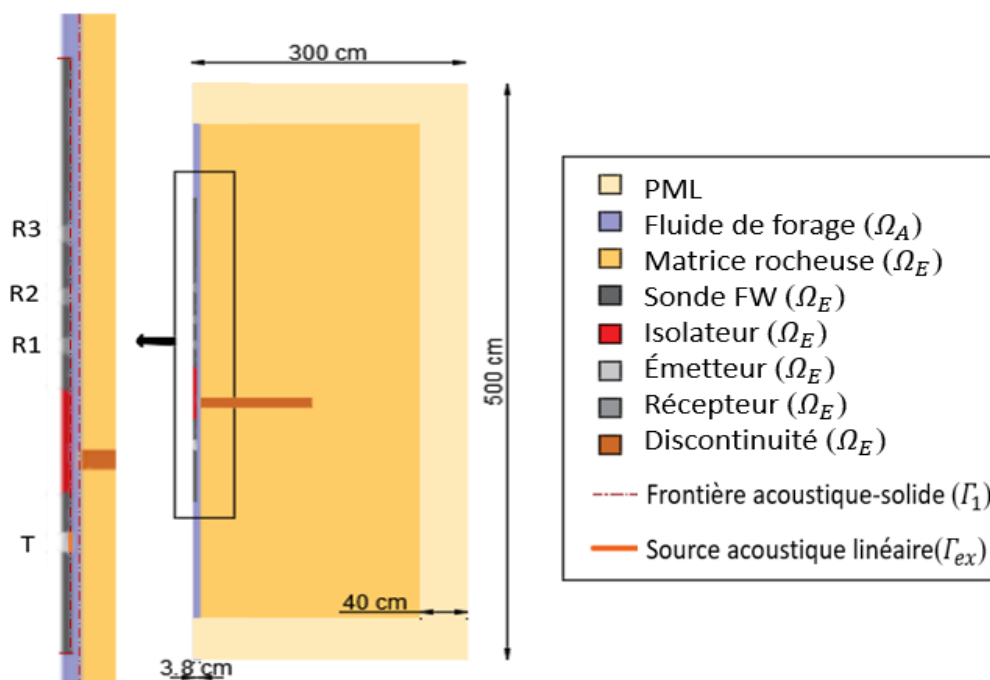


Figure 3 - 2 : Graphe qui représente les différents éléments (Domaine, Frontière) qui constituent notre modèle acoustique.

- **Interface acoustique-solide**

Des frontières acoustique-solide ont également été appliquées pour assurer le couplage multiphysique (acoustique, mécaniques des solides) (Figure 3 - 3). L'eau est représentée par

un domaine acoustique, et la sonde et le massif rocheux sont présentés par un domaine de mécanique des solides.

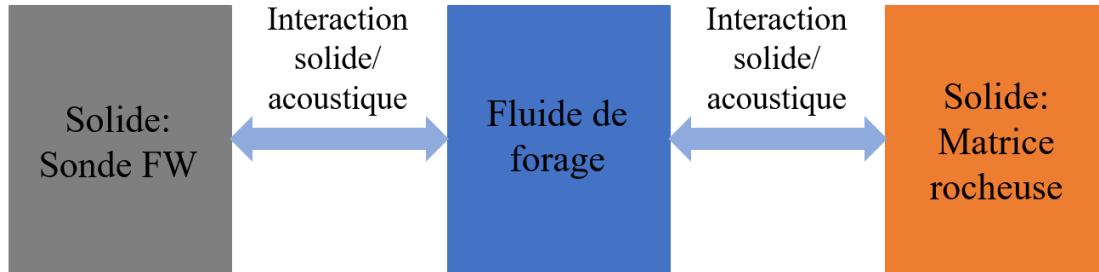


Figure 3 - 3 : Couplage bidirectionnel à l'interface fluide-solide.

- **Sonde**

Afin de se rapprocher de mesure réelle, la sonde FWS a été modélisée comme un cylindre élastique infini avec un rayon de 2.54 cm, centré dans le trou de forage, où le rayon du trou de forage est égal à 3.81 cm. L'outil comporte un réseau de trois récepteurs également espacés au-dessus de l'émetteur (Figure 3 - 2). De plus, le modèle comporte une couche absorbante entre le transmetteur et les récepteurs, dont la longueur est de 55 cm. Cet élément simule la présence d'un amortisseur au niveau de la sonde pour assurer que l'onde ne propage pas dans la sonde elle-même. On applique l'amortissement de Rayleigh au niveau de cette couche (Annexe 2A).

- **Source**

Au niveau de l'émetteur, une source de pression monopolaire linéaire est appliquée, égale à  $A \cdot F(f)$  avec  $A$  égal à 246 (Pa), et  $F(f)$  est la fonction de l'ondelette de Ricker dans le domaine des fréquences :

$$F(f) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{f^2}{f_c^3} e^{-\frac{f^2}{f_c^2}} \quad \text{Éq 3-4}$$

où  $f_c$  représente la fréquence centrale de l'ondelette, qui était égale à 20 kHz dans notre expérience. Le calcul a été effectué pour 600 fréquences également espacées entre 100 et 60000 Hz pour assurer des enregistrements de signaux temporels sur 3 ms avec une fréquence d'échantillonnage temporelle de 4  $\mu$ s.

- **Maillage**

Le maillage est défini en fonction de la vitesse, de la fréquence et de la taille des hétérogénéités à l'aide d'éléments triangulaires dont la taille varie de 1 mm à 1 cm.

- **Discontinuité**

Les discontinuités ont été simulées comme une couche mince moins rigide que le milieu encaissant, en supposant que les longueurs d'onde (P et S) dominantes sont beaucoup plus grandes que l'ouverture de la discontinuité.

### 3.1.2. Validation du modèle numérique

Pour valider notre modèle numérique, nous avons simulé la propagation des ondes à travers une formation intacte puis nous avons comparé les résultats de la modélisation avec ceux obtenus à l'aide du modèle numérique de Sidler et al. (2013). Le Tableau 3 - 1 présente les propriétés mécaniques du fluide de forage, de la sonde et de la masse rocheuse environnante utilisées pour le modèle de vérification. Nous considérons les mêmes dimensions de modèle, propriétés mécaniques et fréquence centrale de la source dans les deux modèles numériques. Notamment, le modèle de Sidler et al. (2013) simule la présence de la sonde comme une condition de limite. La source est définie dans le temps et elle représente une ondelette de Ricker avec une fréquence centrale de 20 kHz.

Tableau 3 - 1 : Propriétés mécaniques des matériaux supposées lors de la vérification du modèle acoustique.

|                  | $VP \left(\frac{m}{s}\right)$ | $VS \left(\frac{m}{s}\right)$ | $\rho \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Matrice rocheuse | 5580                          | 3320                          | 3030                               |
| Fluide           | 1500                          | -                             | 1000                               |
| Sonde            | 5000                          | 3100                          | 7900                               |

Pour effectuer des analyses de vitesse et d'atténuation d'amplitude pour les ondes P et S, nous avons séparé les premières arrivées des ondes P et S des autres arrivées en appliquant une fenêtre temporelle (demi-cosinus) aux deux extrémités de la première ondelette. Nous avons appliqué une transformée de Fourier aux ondelettes du premier cycle séparées des ondes P et S pour déterminer l'amplitude maximale dans le domaine fréquentiel. Ensuite, nous avons calculé les déphasages et le rapport d'amplitude entre les arrivées des deux récepteurs (Barbosa et al., 2019). Ces résultats sont sensibles à la taille de la fenêtre temporelle utilisée (Parra et al., 2007). Pour une fenêtre temporelle centrée sur le premier cycle de la première

arrivée de l'onde P, les amplitudes devraient être moins affectées par les arrivées ultérieures (Dasios et al., 2001). Les ondes S sont plutôt affectées par les arrivées tardives, mais nous avons appliqué la même stratégie que pour l'onde P. Ensuite, en suivant l'approche de Molyneux et Schmitt (2000), les vitesses de phase des ondes P et S (i) ont été calculées à partir de la différence des spectres de phase  $\Delta\varphi$  des signaux enregistrés aux deux récepteurs :

$$V_i(\omega) = \frac{\omega \Delta r}{\Delta\varphi_i(\omega)}; \quad \text{Éq 3-5}$$

Pour valider le modèle numérique, nous avons comparé les résultats de la vitesse de phase et l'atténuation d'amplitude du premier cycle de la première arrivée pour les ondes P et S des deux modèles.

La Figure 3 - 4 montre que les erreurs associées à notre modèle numérique lors du calcul de la vitesse de phase sont du même ordre que celles du modèle numérique de Sidler et al. (2013), soit environ 2 %. De plus, les rapports d'amplitude, qui sont principalement affectés par l'étalement géométrique lors de la propagation le long de la paroi du forage, sont similaires pour les deux modèles numériques. Nous pouvons donc considérer le modèle comme validé. Dans ce qui suit, nous utilisons notre modèle numérique validé pour effectuer une étude paramétrique.

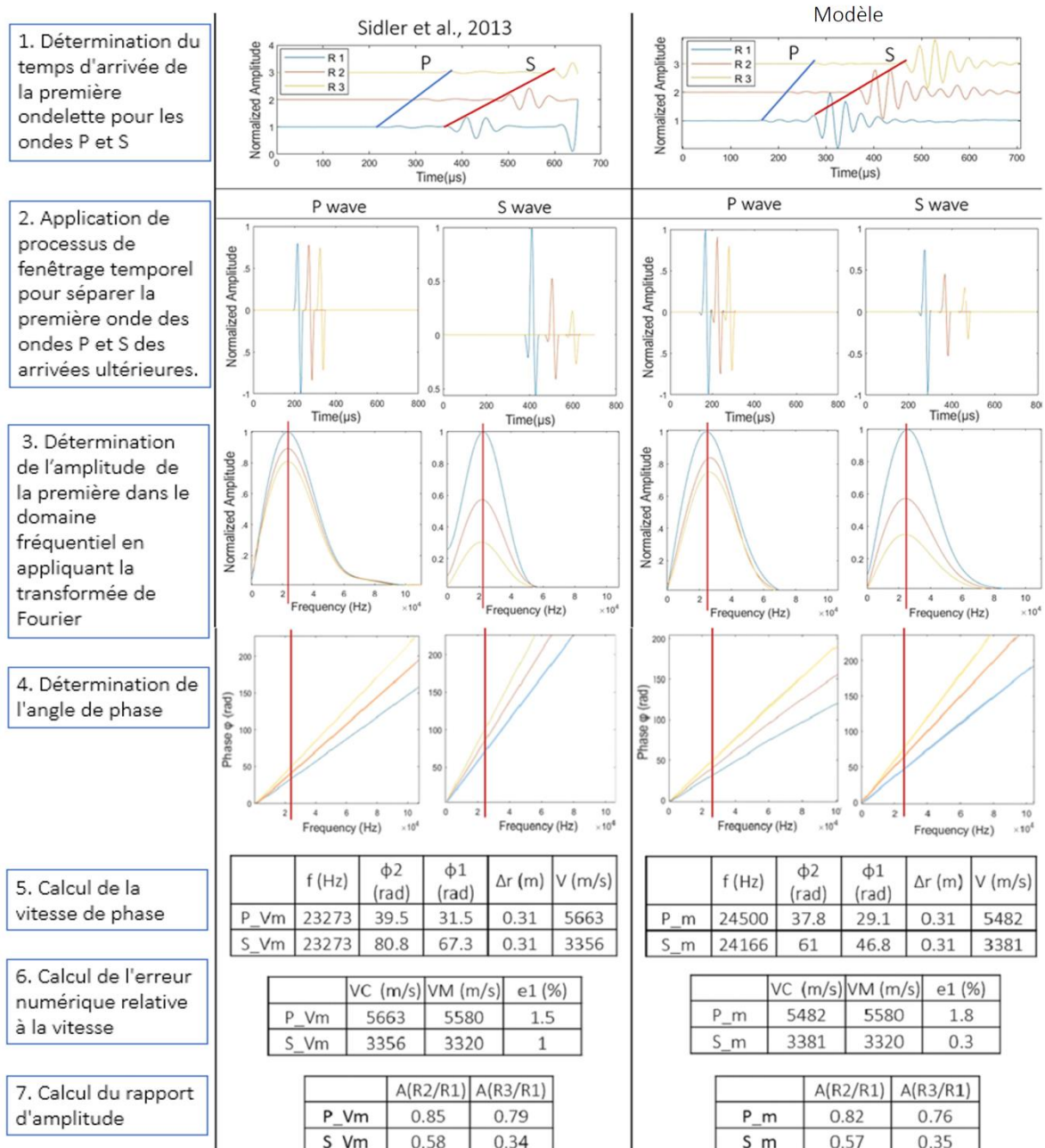


Figure 3 - 4 : Schéma représentant le processus de validation du modèle numérique.

### 3.1.3. Position de la discontinuité

Dans le cas d'un milieu contenant une discontinuité, la réponse du signal de réception (la réponse des ondes P et S) dépend fortement de la position de la discontinuité par rapport à la source et au récepteur (Barbosa et al., 2019). Lorsque le récepteur s'approche de l'emplacement de la discontinuité, l'interférence des ondes affecte les arrivées observées. Pour l'étude paramétrique, nous avons considéré une position pour la discontinuité pour laquelle le signal est moins perturbé, afin de nous concentrer sur les effets des changements

des propriétés mécaniques et géométriques de la couche mince (la discontinuité). Pour définir un emplacement optimal pour la couche mince, nous avons modélisé la propagation des ondes acoustiques à travers un modèle contenant une seule discontinuité et nous avons déplacé la discontinuité entre -20 cm à 160 cm de la position de l'émetteur, par pas de 20 cm. Ceci a été réalisé en fixant l'emplacement de la source et les trois récepteurs, respectivement, à 0, 0.9 m, 1.2 m et 1.5 m et tout en plaçant la discontinuité à différentes profondeurs. Le Tableau 3 - 2 présente les propriétés mécaniques et géométriques des discontinuités simulées.

Tableau 3 - 2 : Propriétés mécaniques et géométriques de la discontinuité simulée.

|               | $VP_F \left(\frac{m}{s}\right)$ | $VS_F \left(\frac{m}{s}\right)$ | $\rho_F \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ | $e \text{ (cm)}$ | $L \text{ (cm)}$ |
|---------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|------------------|------------------|
| Discontinuité | 2000                            | 750                             | 1600                                 | 5                | 200              |

La Figure 3 - 5 représente les multiples signaux capturés au niveau du premier récepteur (R1) pour les différentes positions de la discontinuité entre (-20 cm à 160 cm de l'émetteur). Lorsque la discontinuité atteint le niveau du récepteur, on constate une perturbation au niveau du signal enregistré. Lorsque la discontinuité se situe entre le niveau de l'émetteur et le premier récepteur, nous distinguons l'atténuation et le retard des arrivées des ondes P et S.

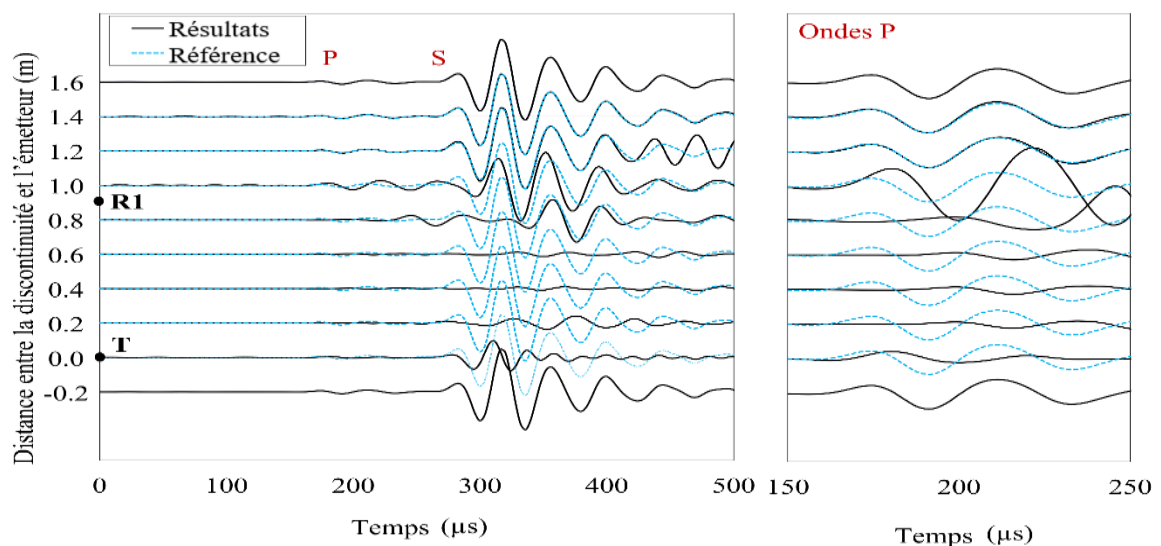


Figure 3 - 5 : (a) Dix signaux enregistrés par le premier récepteur pour les différentes positions de discontinuité et (b) une fenêtre zoomée sur les arrivées d'ondes P. Les traces en pointillés bleus correspondent au signal de référence pour un milieu homogène.

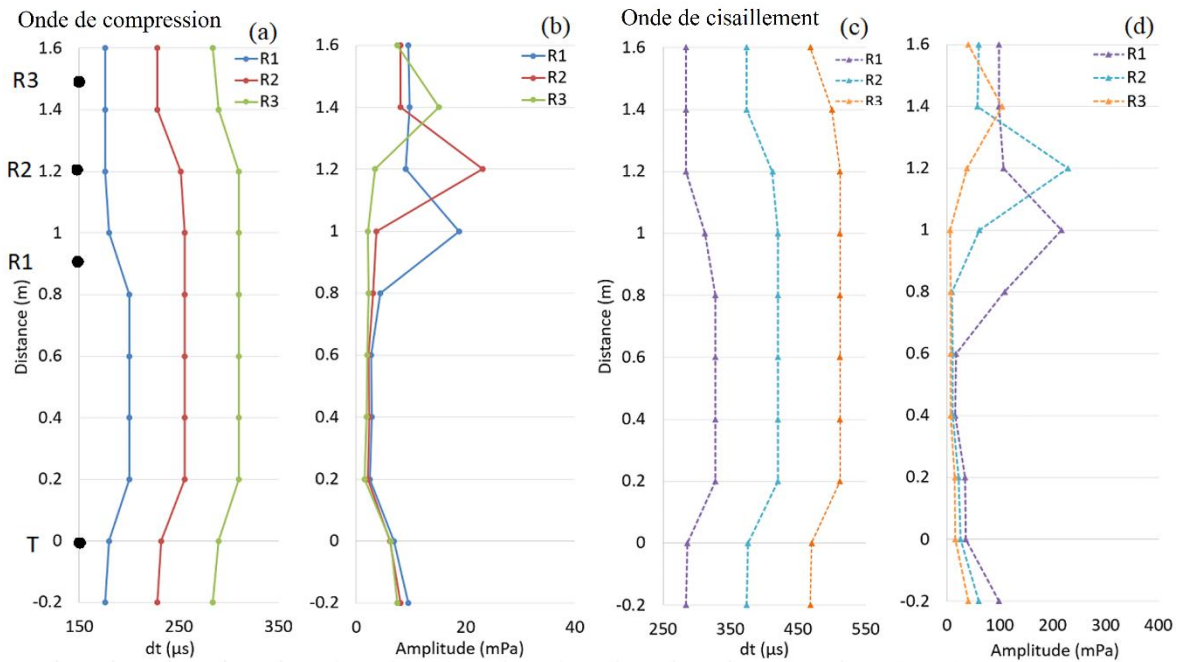


Figure 3 - 6 : (a) et (c) représentent, respectivement, les temps d'arrivée ( $dt$ ) des ondes P et S pour les dix positions de la discontinuité entre (-0.2 m et 1.6 m). (b) et (d) montrent, respectivement, l'amplitude de l'atténuation par ondelette du premier cycle des ondes P et S pour les dix positions. Les points noirs représentent les positions de l'émetteur (T), du récepteur 1 (R1), du récepteur 2 (R2) et du récepteur 3 (R3).

La Figure 3 - 6 montre le temps d'arrivée ( $dt$ ) et l'amplitude de l'ondelette du premier cycle pour les ondes P et S enregistrées au niveau de trois récepteurs différents. Nous avons observé que les diminutions d'amplitude et les retards aux trois récepteurs deviennent stables quand la discontinuité se situe entre 20 et 60 cm de l'émetteur. Les effets liés à l'interférence des ondes (par exemple, les augmentations d'amplitude) se produisent à 1 m, 1.2 m et 1.4 m respectivement pour les récepteurs R1, R2 et R3, lorsque la position de la discontinuité est proche du récepteur correspondant. Par conséquent, pour la suite, nous avons fixé la position de la discontinuité à 40 cm au-dessus de l'émetteur. La Figure 3 - 6 illustre clairement les pertes de transmission causées par la présence de la discontinuité, qui sont exprimées par les délais et la décroissance d'amplitude pour les trois récepteurs. Dans la section suivante, nous proposons une méthodologie pour quantifier les pertes de transmission

### 3.1.4. Étude paramétrique

Nous nous sommes concentrés sur la quantification des pertes de transmission causées par la présence d'une discontinuité remplie dans une formation rapide. Pour analyser les effets des propriétés de la discontinuité sur les ondes acoustiques propagées, nous avons réalisé une étude paramétrique faisant évoluer les caractéristiques géométriques et mécaniques de la discontinuité (Tableau 3 - 3). Dans les sections suivantes, toutes les propriétés mécaniques

de la matrice rocheuse représentent la roche ignée. De plus, les valeurs de propriétés mécaniques de la matrice rocheuse et de fluide de forage, même le diamètre du forage, ont été choisies suivant le site de validation (site national de calibration Bells corners à Ottawa, Ontario, Canada). Les propriétés de la discontinuité présentées dans le Tableau 3 - 2 représentent les propriétés du cas de référence, et son rappelés en gras dans le Tableau 3 - 3.

Tableau 3 - 3 : Les différentes valeurs choisies pour l'étude paramétrique pour les propriétés géométriques et mécaniques de la discontinuité. Les caractères gras représentent les propriétés du cas de référence.

| Propriétés de la discontinuité | $VP_F \left(\frac{m}{s}\right)$ | $VS_F \left(\frac{m}{s}\right)$ | $\rho_F \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ | $e \text{ (cm)}$  | $L \text{ (cm)}$                  |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Valeurs                        | 1000- <b>2000</b> -3000         | 500- <b>750</b> -1250           | 1000- <b>1600</b> -2200              | 0.5-1- <b>2-5</b> | 1.5-10-15-20-40-60-80- <b>200</b> |

Pour analyser les propriétés de la formation environnante, nous avons considéré différentes combinaisons de propriétés élastiques, qui sont représentées dans le Tableau 3 - 4. Nous avons modifié les valeurs de la vitesse de compression ( $VP$ ) et de la vitesse de cisaillement ( $VS$ ) dans le premier et le deuxième cas tout en conservant le même rapport  $VP/VS$  ( $R_V$ ) (égal à 1.6). Pour le troisième cas, nous avons modifié la valeur de la vitesse de cisaillement pour obtenir un  $R_V$  égal à 2. Finalement, nous avons changé les valeurs de la vitesse de cisaillement et la masse volumique ( $\rho$ ) pour le cas 4. Nous avons donc une longueur d'onde de compression ( $VP / f_c$ ) qui varie entre (28 cm et 31 cm) et une longueur d'onde de cisaillement ( $VS / f_c$ ) qui varie entre (16 cm et 19 cm).

Tableau 3 - 4 : Les propriétés mécaniques des différents cas de la matrice rocheuse.

| Matrice rocheuse | $VP \left(\frac{m}{s}\right)$ | $VS \left(\frac{m}{s}\right)$ | $\rho \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ | $R_V$ |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------|
| Cas 1            | 5500                          | 3300                          | 3000                               | 1.6   |
| Cas 2            | 6250                          | 3700                          | 3000                               | 1.6   |
| Cas 3            | 6250                          | 3150                          | 3000                               | 2     |
| Cas 4            | 6250                          | 3150                          | 2500                               | 2     |

### 3.1.5. Quantification de la perte de transmission acoustique

La présence d'une discontinuité dans un massif rocheux produit un retard et une atténuation au niveau du signal se propageant. Dans cette section, nous explorons la relation entre les



changements d'amplitude et de vitesse des ondes P et S appelés "facteurs de perte de transmission acoustique" et les propriétés géométriques et mécaniques de la couche mince et de la formation environnante. Pour ce faire, nous avons comparé les arrivées de la première ondelette des ondes P et S associées à deux modèles : un milieu discontinu (matrice rocheuse séparée par une discontinuité horizontale) et un milieu homogène.

Deux paramètres de perte de transmission acoustique sont définis :

1- La variation de vitesse (VV) pour l'onde P ( $VV_P$ ) et pour l'onde S ( $VV_S$ ).

Dans un premier temps, nous avons calculé les vitesses (P et S) des milieux discontinu et homogène en fonction du temps d'arrivée de chaque type d'onde en utilisant la formule suivante :

$$V = \frac{\Delta x}{dt - t_{forage}} \quad \text{Éq 3-7}$$

où  $\Delta x$  est la distance entre l'émetteur et le récepteur,  $dt$  est le temps d'arrivée de l'onde.  $t_{forage}$  représente le temps nécessaire aux ondes pour traverser le fluide du forage, il dépend de l'angle critique ( $\theta$ ) à la paroi du forage  $t_{forage} = (d_{forage} - d_{sonde}) / V_{fluide} * \cos(\theta)$ ;

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{V_{fluide}}{V_{roche}} \right)$$

La variation de la vitesse est calculée à l'aide de cette équation :

$$VV = \frac{(V_H - V_D) \cdot 100}{V_H} \quad \text{Éq 3-8}$$

où  $V_H$  est la vitesse de compression ou de cisaillement du milieu homogène et  $V_D$  est la même pour le milieu discontinu.

2- Le paramètre d'atténuation ( $\gamma'$ ) pour l'onde P ( $\gamma'_P$ ) et pour l'onde S ( $\gamma'_S$ ) en dB est donné par :

$$\gamma' = -20 \text{ LOG} \left( \frac{A_D}{A_H} \right) \quad \text{Éq 3-9}$$

où  $A_D$  est l'amplitude maximale des signaux (P et S) dans le domaine des fréquences pour le milieu discontinu et  $A_H$  est la même chose pour le milieu intact homogène.

Après avoir extrait les signaux au niveau du récepteur pour les deux modèles, nous avons déterminé la première arrivée des ondes P et S, puis calculé les vitesses propagation de l'onde de compression et de cisaillement à l'aide de l'équation (Éq 3-7). L'équation (Éq 3-7) a été

utilisée plutôt que l'Éq 3-5 de la technique de Molyneux et Schmitt (2000), car nous ne sommes pas intéressés par le calcul de la vitesse du milieu, mais plutôt par la quantification des retards des ondes P et S produits indépendamment par la présence d'une discontinuité au niveau de chaque récepteur. Les amplitudes de l'ondelette de premier cycle pour les ondes P et S des milieux inhomogènes et homogènes ont été calculées en suivant la méthodologie détaillée dans la section 3.1.2. Après avoir obtenu les vitesses et les amplitudes des ondes P et S pour les modèles homogènes et discontinus, respectivement, nous avons utilisé les équations (Éq 3-8) et (Éq 3-9) pour quantifier les pertes de transmission dues à la présence de la discontinuité. La Figure 3 - 7 représente le processus appliqué pour quantifier la perte de transmission acoustique au niveau des ondes P et S.

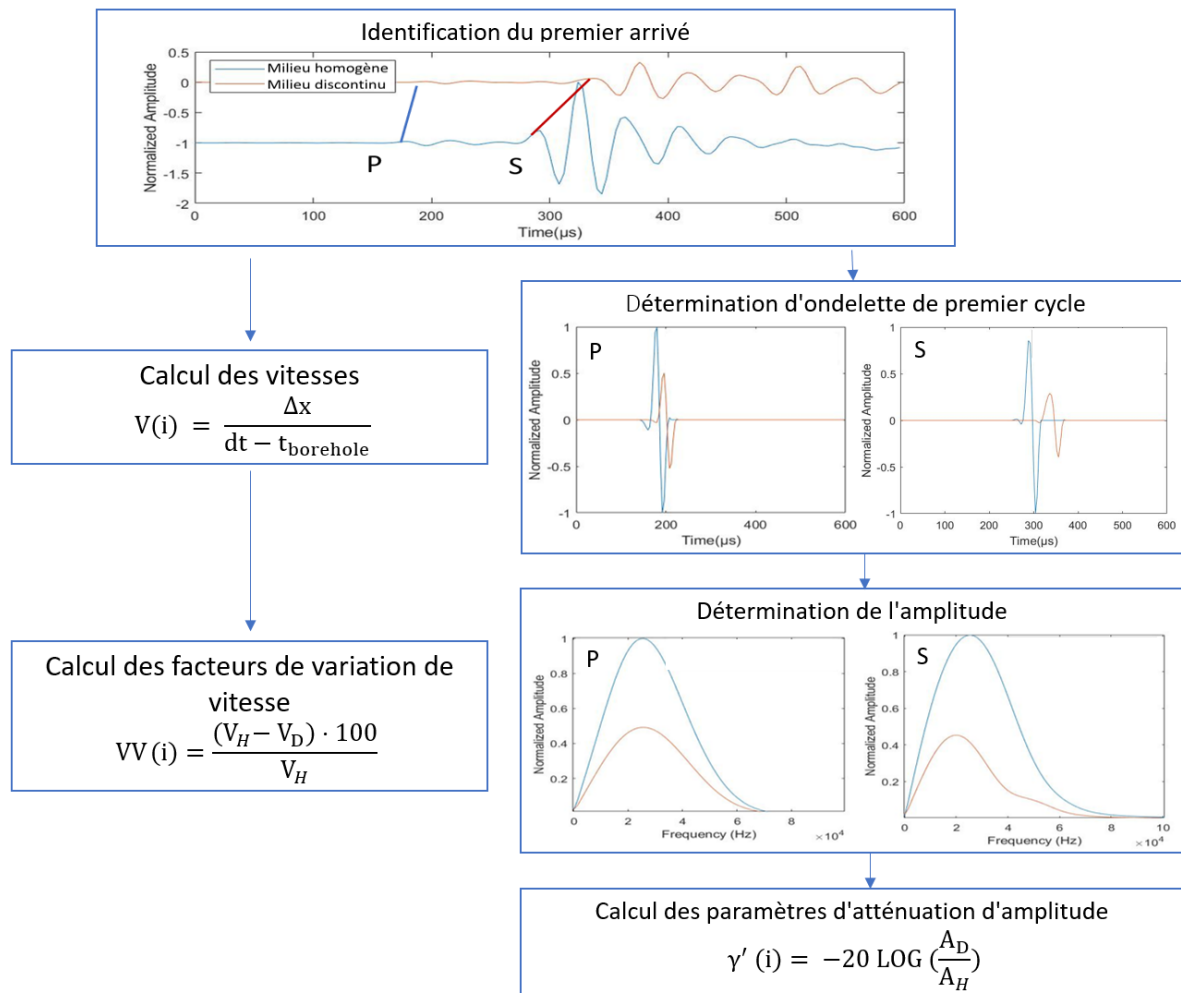


Figure 3 - 7 : Diagramme illustrant le processus appliqué pour quantifier la perte de transmission à partir des modèles discontinus et homogènes. (i) représente les ondes P ou S respectivement.

### 3.1.6. Incertitude du traitement des données acoustique

- **Incertitude au niveau de la vitesse :**

Les données sont échantillonnées tous les 4  $\mu\text{s}$  afin de réduire la taille des données et le temps de calcul. Nous avons calculé l'incertitude liée à l'échantillonnage temporel pour quatre cas d'étude (pour les différentes combinaisons des propriétés élastiques de la matrice rocheuse) en réduisant l'échantillonnage temporel numérique  $\Delta t$  de 4  $\mu\text{s}$  à 1  $\mu\text{s}$  (Figure 3 - 8).

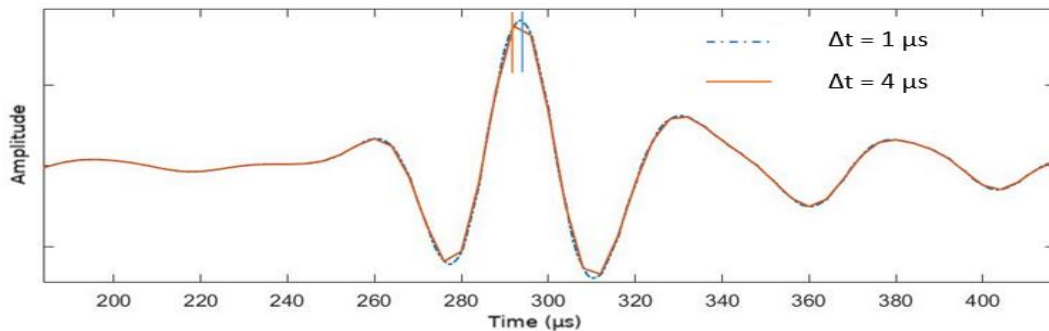


Figure 3 - 8 : Différence entre un signal échantillonné tous les 1  $\mu\text{s}$  et un autre tous les 4  $\mu\text{s}$ .

Pour définir l'incertitude du traitement des données associée au temps d'arrivée des ondes, nous avons utilisé l'Éq 3-10 :

$$U_{AT} = 100 \left( \frac{dt_4 - dt_1}{dt_4} \right); \quad \text{Éq 3-10}$$

où  $U_{AT}$  est l'incertitude du détermination de temps d'arrivée des ondes.  $dt_4$  et  $dt_1$  représentent les temps d'arrivée pour  $\Delta t = 4 \mu\text{s}$  et  $\Delta t = 1 \mu\text{s}$ , respectivement.

Le Tableau 3 - 5 présente les valeurs d'incertitude de sélection du temps d'arrivée pour les ondes P et S et au niveau des trois récepteurs. Alors  $U_{AT}$  est inférieur à 2 %. L'incertitude au niveau du facteur de variation de vitesse est alors d'environ 4 %, car les incertitudes s'ajoutent pour  $V_H$  et  $V_D$ .

Tableau 3 - 5 : Incertitude de sélection du temps d'arrivée des ondes P et S au niveau des trois récepteurs.

| Incertitude Med (%) | R1  |     | R2  |     | R3  |     |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                     | P   | S   | P   | S   | P   | S   |
|                     | 1.8 | 1.0 | 1.4 | 0.8 | 1.2 | 0.7 |

- **Incertitude au niveau de l'amplitude :**

La détermination du centre et de la taille de la fenêtre de l'ondelette de premier cycle est liée à l'échantillonnage temporel. Pour calculer l'incertitude associée à l'identification de la fenêtre, nous avons décalé la fenêtre de 4  $\mu$ s (taux d'échantillonnage) dans les directions positives et négatives. La valeur de l'amplitude de la fenêtre décalée dans le domaine fréquentiel a été recalculée.

Nous avons calculé l'incertitude relative de l'amplitude en comparant l'amplitude des fenêtres décalées et non décalées. En se référant au Tableau 3 - 6, on peut remarquer que l'incertitude reste inférieure à 2%. En conséquence, nous avons décidé de fixer l'incertitude à 2%. Par conséquent, l'incertitude associée au facteur d'atténuation de l'amplitude est de 4 %.

Tableau 3 - 6 : Incertitude des amplitudes déterminées pour les ondes P et S au niveau des trois récepteurs.

| Incertitude<br>Med (%) | R1  |     | R2  |     | R3  |     |
|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                        | P   | S   | P   | S   | P   | S   |
|                        | 1.2 | 1.4 | 1.9 | 1.3 | 1.2 | 1.5 |

### 3.1.7. Résultats et discussion

Nous avons étudié l'impact des propriétés mécaniques et géométriques de la discontinuité, ainsi que des propriétés mécaniques de la matrice rocheuse, sur les quatre facteurs de perte de transmission acoustique ( $VV_P$ ;  $VV_S$ ;  $\gamma'_P$ ;  $\gamma'_S$ ).

La Figure 3 - 9 (a, c, e, g, i) indique que le rapport  $VP/VS$  ( $R_V$ ) influence le facteur  $VV_P$ , les résultats des cas 1 et 2 et des cas 3 et 4 sont proches. Nous avons observé que  $VV_P$  est plus faible quand la matrice rocheuse est plus rigide. Donc, l'influence de la couche compliant (couche ayant une faible rigidité) est moins remarquable pour un milieu plus rigide. D'autre part,  $VV_S$  n'a pas présenté une dépendance avec la rigidité de la formation (Figure 3 - 9 b, d, f, h, j). En général, les ondes S sont plus sensibles que les ondes P aux variations des propriétés géométriques d'une discontinuité.  $VV_S$  est plus important que  $VV_P$  lorsque les propriétés géométriques de la discontinuité ( $e$ ,  $L$ ) augmentent pour  $L > 60$  cm (Figure 3 - 9 a, b, c, d). On constate que  $e$  et  $VV_{P,S}$  présentent une relation quasi-linéaire (Figure 3 - 9 a, b) dans laquelle  $VV_{P,S}$  augmente avec l'augmentation de  $e$ . La rigidité effective de la discontinuité tend également à diminuer linéairement quand son épaisseur augmente montré par Schoenberg, 1980. La Figure 3 - 9 (c) montre que  $VV_P$  augmente jusqu'à ce que  $L$  s'approche de la longueur d'onde de compression ( $\sim 30$  cm), puis se stabilise lorsque  $L$  est supérieur à deux fois la longueur d'onde de compression ( $\sim 60$  cm). La Figure 3 - 9 (d) montre

que  $VV_S$  augmente jusqu'à ce que  $L$  atteigne la longueur d'onde de compression ( $\sim 30$  cm), puis se stabilise à des valeurs de  $L$  similaires à celles de  $VV_P$ . Par conséquent, nous concluons que, comme indiqué précédemment, le rayon d'investigation de la sonde dépend de la longueur d'onde du signal dans la formation entourant. Dans nos cas, le rayon d'investigation est inférieur à 1m.

La Figure 3 - 9 (e, f, g, h) montre qu'un matériau de remplissage de discontinuité plus rigide entraîne une diminution de  $VV_P$  et de  $VV_S$ . En outre, lorsque  $VP_F$  change, il affecte faiblement  $VV_S$ , de l'ordre de 7%. Cependant, lorsque  $VP_F$  varie, il n'y a aucune influence sur la réponse de l'onde P. Cet effet est probablement lié à l'interférence entre les ondes S et les autres modes d'ondes arrivant après l'onde P, ce qui rend l'identification des ondes S moins robuste que celle des ondes P. Enfin, lorsque  $\rho_F$  change,  $VV_{P;S}$  reste constant (Figure 3 - 9 i et j).

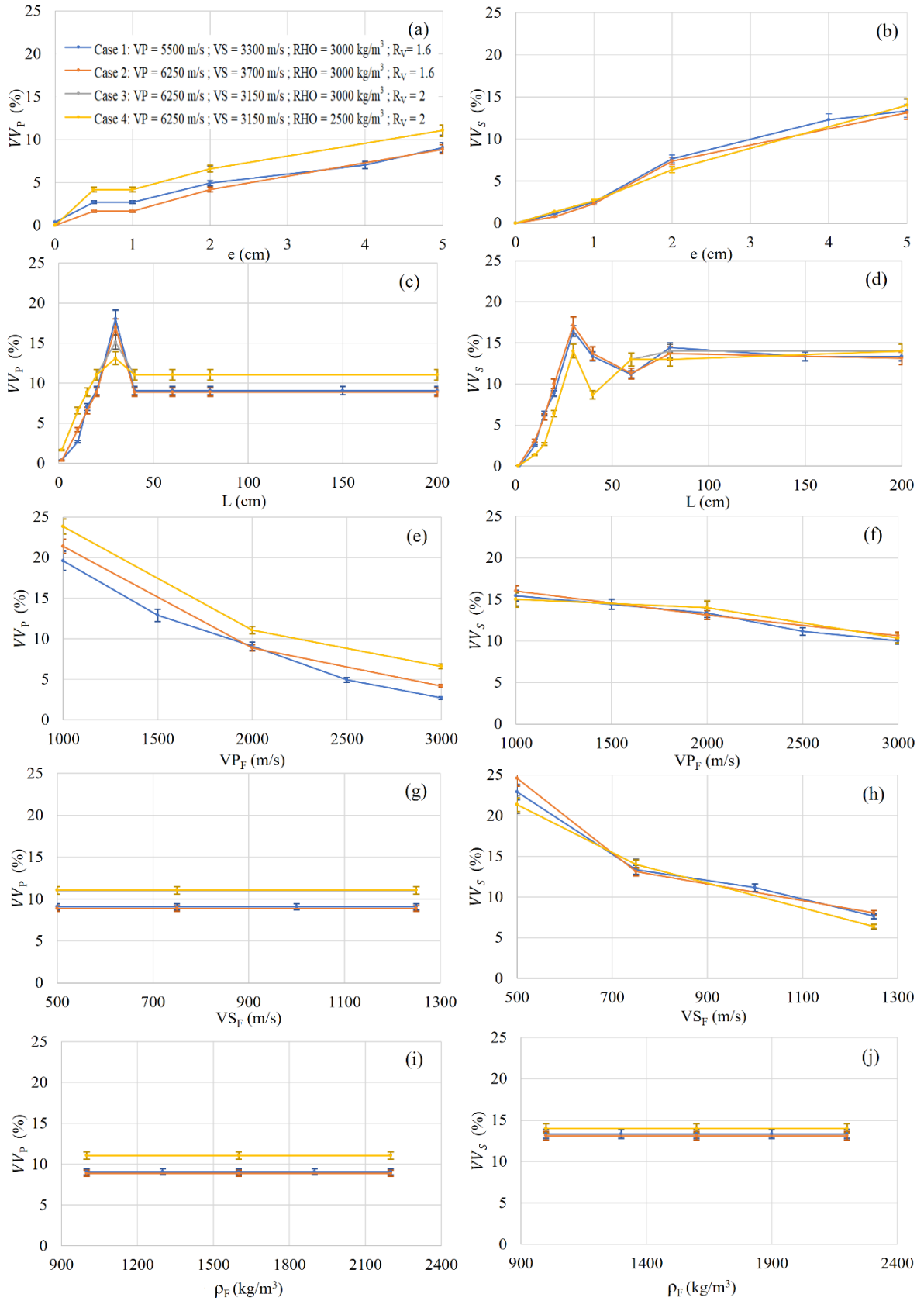


Figure 3 - 9 : Étude paramétrique sur les facteurs de variation de la vitesse des ondes P et S pour les quatre cas d'étude. La forme I représente la barre d'incertitude (+/-4%).

La Figure 3 - 10 indique que le paramètre d'atténuation d'amplitude  $\gamma'$  de l'onde S est supérieur à celui de l'onde P, quel que soit le paramètre considéré (environ 1.5 fois à 2 fois le facteur d'atténuation d'amplitude des ondes P).

On constate que  $\gamma'_S$  est quasi-constant autour de 8 à 10 dB, pour  $e$  compris entre 0.5 cm et 5 cm (Figure 3 - 10 b). En revanche,  $\gamma'_P$  augmente fortement jusqu'à une ouverture d'une discontinuité inférieure à 1 cm, pour  $e > 1$  cm la sensibilité de  $\gamma'_P$  aux changements de  $e$  n'est plus observable. (Figure 3 - 10 a). La Figure 3 - 10 c montre que lorsque  $L$  augmente,  $\gamma'_P$  diminue jusqu'à atteindre une valeur comparable à la longueur d'onde de compression ( $\sim 30$  cm). On observe une augmentation de  $\gamma'_P$  jusqu'à ce que  $L$  soit égale à deux fois la longueur d'onde de compression (62 cm), ensuite la réponse de  $\gamma'_P$  reste stable. De plus, on remarque l'impact de  $R_V$  sur la réponse de  $\gamma'_P$ , pour  $R_V$  plus important élevé  $\gamma'_P$ , est plus élevée pour  $L$  inférieur à deux fois la longueur d'onde de compression. Par conséquent, pour un massif rocheux rigide avec une discontinuité dont  $e > L$  (ce qui ressemble plus à un vide dans la paroi du forage qu'à une discontinuité), l'effet de diffusion peut entraîner une augmentation apparente de l'amplitude de l'onde P. La Figure 3 - 10 d montre que la réponse  $\gamma'_S$ , dépend de la longueur de la discontinuité pour les différents cas d'études. Nous observons que pour tous les cas d'études la réponse de  $\gamma'_S$ , suit une forme de courbe similaire, qui peut être expliquée par la relation entre  $R_V$  et les propriétés mécaniques de la matrice rocheuse. Nous observons un effet similaire pour les ondes P avec une stabilité pour  $L$  égale à deux fois la longueur d'onde P.

La Figure 3 - 10 e illustre que  $VP_F$  impact la réponse de  $\gamma'_P$ . De plus,  $\gamma'_P$  est plus élevée pour une matrice rocheuse plus rigide. Cependant, lorsque  $VP_F$  augmente,  $\gamma'_P$  diminue et devient moins sensible aux caractéristiques mécaniques de la matrice rocheuse.

La Figure 3 - 10 f montre que  $\gamma'_S$  reste quasi-constant (environ 9 à 10 dB pour tous les scénarios étudiés) lorsque  $VP_F$  augmente, car cette amplitude décroît en fonction du module de cisaillement du matériau de remplissage de la discontinuité. Cependant, une augmentation de  $VS_F$  a un impact négligeable sur  $\gamma'_P$  (Figure 3 - 10 g) et produit une diminution au niveau de  $\gamma'_S$  (Figure 3 - 10 e).

Enfin, lorsque  $\rho_F$  augmente,  $\gamma'_{P,S}$  diminue. Nous trouvons une relation linéaire entre  $\rho_F$  et  $\gamma'_P$  et  $\gamma'_S$ . Nous avons également détecté l'influence des propriétés de la matrice rocheuse sur la réponse de  $\gamma'$ , où  $\gamma'$  est plus élevé pour une matrice rocheuse plus rigide. Par exemple,

lorsque la masse volumique de remplissage des discontinuités augmente,  $\gamma'_S$  est plus sensible à la masse volumique de la matrice que  $\gamma'_P$  (Figure 3 - 10 i, j).

La Figure 3 - 10 montre que l'impédance acoustique de la matrice rocheuse ( $Z = \text{masse volumique} \times \text{vitesse acoustique}$ ) influence les facteurs d'atténuation d'amplitude ( $\gamma'_{P;S}$ ).  $\gamma'$  est plus faible pour un impédance acoustique plus faible. Cela implique également que, pour une matrice rocheuse rigide, la présence d'une discontinuité atténue considérablement les ondes propagées. Le cas 4 présente la valeur du  $\gamma'$  le moins important, notamment pour  $\gamma'_P$  (Figure 3 - 10 a, c, e, g, h, i, j).



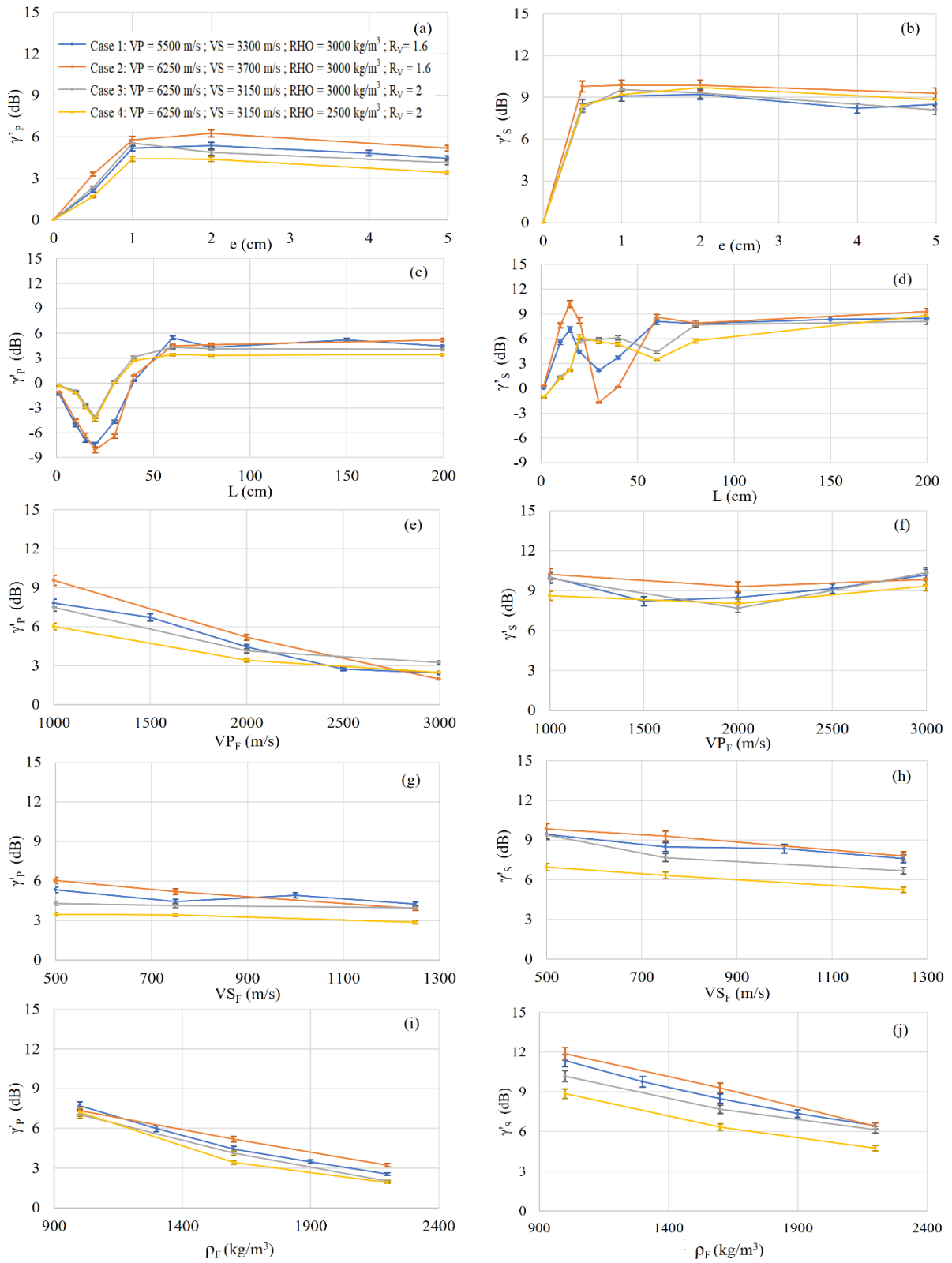


Figure 3 - 10 : Étude paramétrique des facteurs d'atténuation de l'amplitude des ondes P et S pour les quatre cas d'études. La forme I représente la barre d'incertitude (+/-4%).

Jusqu'à présent, nous avons présenté que les réponses des facteurs de perte de transmission obtenus au niveau de R1. La Figure 3 - 11 souligne l'importance des réponses des autres récepteurs, notamment pour les ondes S. En termes de vitesse, le premier récepteur présente des valeurs de facteur de perte de transmission ( $VV_P$  et  $VV_S$ ) plus élevées que les deux autres récepteurs. Cela peut s'expliquer par la longueur du chemin de propagation d'ondes, qui se traduit par des effets relativement plus importants pour le chemin le plus court (R1). Et en termes d'amplitude, le troisième récepteur présente des facteurs de perte de transmission les plus élevés ( $\gamma'_P$  et  $\gamma'_S$ ). Ceci peut être expliqué par l'effet de diffusion géométrique (l'atténuation due à l'effet de propagation des ondes dans le sol) sur la propagation des ondes. La Figure 3 - 11 (a, c) illustre comment la différence de réponse entre le premier et le deuxième récepteur, ainsi qu'entre le premier et le troisième récepteur pour  $VV$  augmente lorsque  $e$  et  $L$  augmentent (pour  $L$  plus petit que la longueur d'onde de compression  $\sim 30$  cm). En outre, les réponses  $VV$  et  $\gamma'$  des trois récepteurs restent constantes lorsque la masse volumique de remplissage de la discontinuité varie (Figure 3 - 11 i, j). La Figure 3 - 11 (e) et (g) montre que la différence entre les réponses des trois récepteurs pour ( $VV_P$  et  $VV_S$ ) diminue lorsque les vitesses de compression et de cisaillement du remplissage augmentent. Nous observons que  $VP_F$  et  $VS_F$  ont un impact sur la différence entre les réponses des trois récepteurs  $\gamma'_P$  et  $\gamma'_S$  respectivement. De plus, lorsque le remplissage de la discontinuité devient plus rigide,  $\gamma'_P$  et  $\gamma'_S$  diminuent au niveau des trois récepteurs (Figure 3 - 11 f, h).

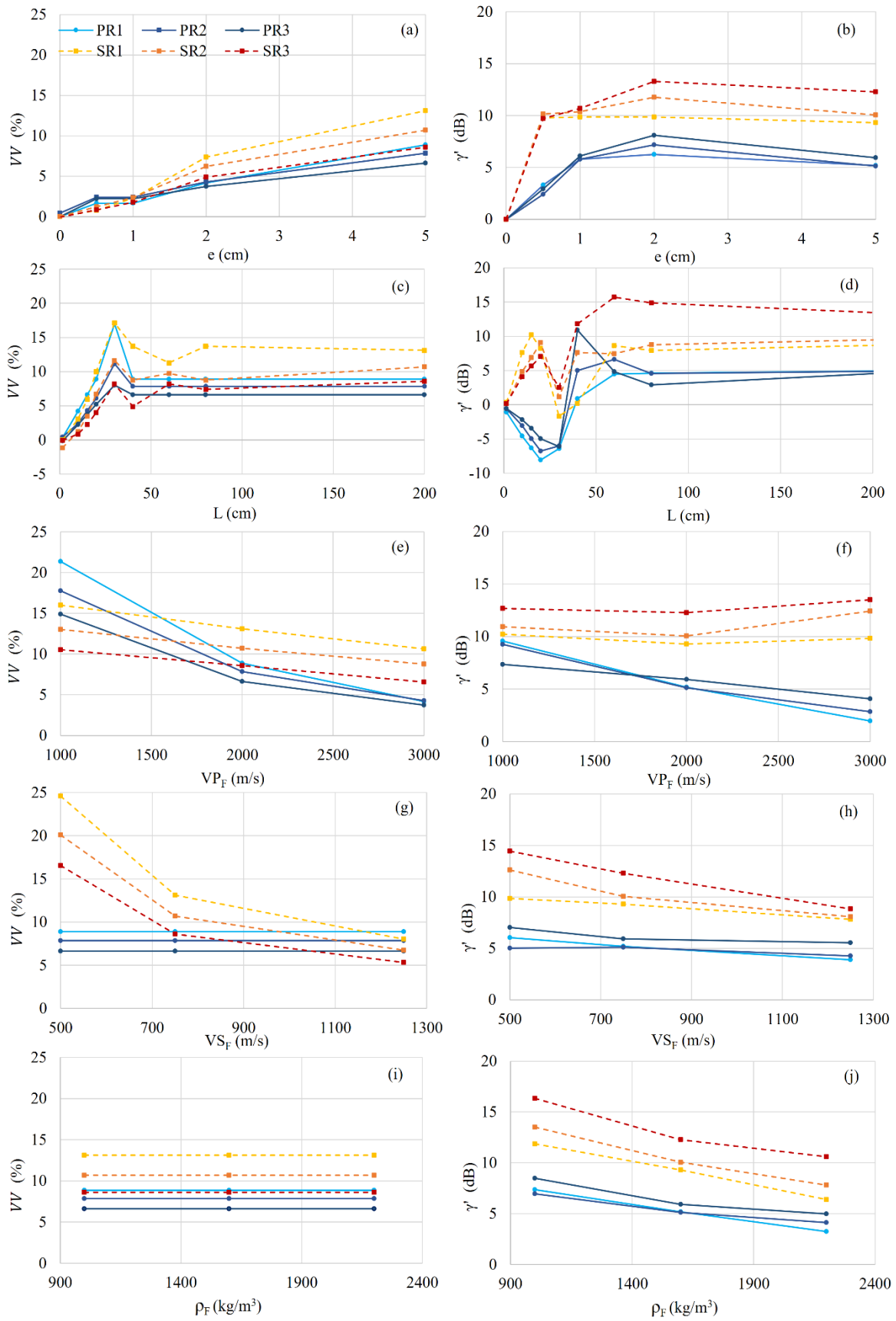


Figure 3 - 11 : Étude paramétrique des facteurs de perte de transmission acoustique pour les ondes P et S pour le premier cas d'étude et au niveau des trois récepteurs R1, R2 et R3.

La Figure 3 - 12 résume l'impact de chaque propriétés géométriques ou mécaniques d'une discontinuité remplie sur les quatre facteurs de perte de transmission acoustique. Il convient de noter que chaque facteur de perte de transmission est plus sensible à une propriété spécifique de la discontinuité.  $VV_P$  et  $\gamma'_P$  sont considérablement affectés par la vitesse de compression de remplissage de la discontinuité de 5 à 20% et de 2 à 10 dB, respectivement. D'autre part,  $VS_F$  impact le plus  $VV_S$  d'environ 7 à 25%. De 7 à 12 dB, la masse volumique de remplissage de la discontinuité a un impact le plus significatif sur  $\gamma'_S$ . Notamment, la longueur de la discontinuité a une influence considérable sur les quatre facteurs de pertes de transmission, tandis que l'ouverture de la discontinuité a un effet plus représentatif sur les facteurs de variation de la vitesse que sur les facteurs d'atténuation de l'amplitude. Ces résultats impliquent que l'utilisation de ces quatre facteurs de perte acoustique peut conduire à une meilleure caractérisation des propriétés géomécaniques de la discontinuité.

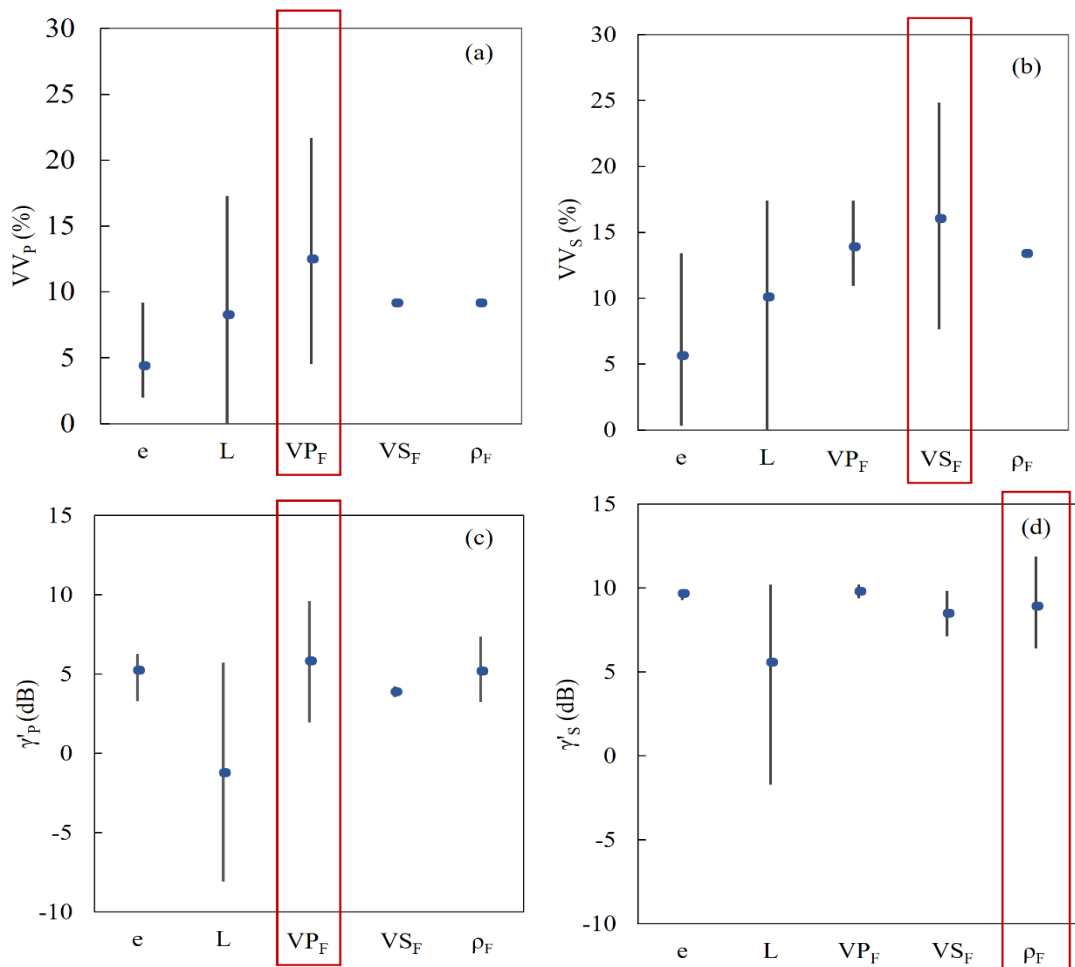


Figure 3 - 12 : Intervalle d'influence de chaque paramètre de discontinuité dans l'étude paramétrique sur quatre facteurs de perte de transmission. Les points bleus représentent la valeur moyenne des intervalles d'influence. Les rectangles rouges représentent la propriété qui affecte le plus le facteur de perte de transmission.

### 3.1.8. Synthèse

Dans cette section, nous avons étudié l'influence de différentes caractéristiques géométriques et mécaniques d'une discontinuité remplie sur la réponse de la sonde FWS. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics pour simuler la réponse de la sonde dans un environnement de forage contenant une discontinuité horizontale remplie. Nous avons effectué une analyse paramétrique en faisant varier plusieurs facteurs, notamment l'ouverture, la longueur, la vitesse de compression, la vitesse de cisaillement et la masse volumique des discontinuités remplies. Nous avons également exposé une méthode pour quantifier quatre facteurs de perte de transmission, dont deux sont associés à la diminution de la vitesse, tandis que les deux autres sont liés à l'atténuation des ondes P et S, résultant de la présence d'une discontinuité. Cette approche nous a permis d'analyser l'impact des propriétés de la discontinuité sur la réponse des ondes P et S enregistrées. En outre, nous avons examiné l'impact des propriétés de la matrice rocheuse sur la valeur de ces facteurs de perte de transmission.

Plusieurs conclusions ont été tirées de l'étude paramétrique :

- Lorsque la rigidité de la matrice rocheuse augmente, la présence d'une discontinuité a un impact plus important sur les ondes enregistrées, notamment sur les facteurs d'atténuation d'amplitude des ondes P et S (augmentation de l'impédance acoustique de la matrice  $\gamma'_{(P)}$  et  $\gamma'_{(S)}$ ). De plus, les ondes S sont plus sensibles à la présence et aux propriétés d'une discontinuité remplie (environ 1.5 à 2 fois le facteur d'atténuation d'amplitude des ondes P).
- Le facteur de variation de la vitesse de compression est plus influencé par le rapport  $V_P/V_S$  de la matrice rocheuse que le facteur de variation de la vitesse de cisaillement (lorsque le rapport  $V_P/V_S$  diminue à environ 1.2,  $V_{V(P)}$  augmente à environ 1.3). De plus, la largeur de la discontinuité et  $V_V$  présentent une relation quasi-linéaire lorsque la largeur de la discontinuité augmente et  $V_V$  augmente.
- Pour une ouverture de discontinuité supérieure à 1 cm, il est difficile de déterminer la largeur de la discontinuité à partir du paramètre d'atténuation des ondes de cisaillement et de compression seuls, car les facteurs d'atténuation d'amplitude sont quasi-constants. Le facteur de variation de la vitesse était plus sensible à l'ouverture de la discontinuité.

- Les facteurs de transmission sont affectés par la longueur de la discontinuité. Nous perdons la sensibilité à la longueur de la discontinuité pour une longueur supérieure à deux fois la longueur d'onde prédominante.

### 3.2. Modèle de résistivité

Pour le modèle de résistivité simulant la réponse de la sonde électrique normale 2PEA-1000 (Figure 3 - 13), nous nous appuyons sur les travaux de Taillet (2013). L'électrode N est plongée à l'intérieur du forage et se situe sur la bride à 9 m de l'électrode A. Cela ne représente pas un dispositif pôle-pôle, mais un dispositif pôle-dipôle (Taillet, 2013). Notons que la différence entre les résultats des deux configurations est négligeable. Dans nos travaux de modélisation, la configuration réelle du dispositif est utilisée. Les résistivités apparentes se calculent avec l'Éq 3-11 :

$$R_a = 4\pi \cdot \frac{1}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN}} \cdot \frac{dV}{I} \quad \text{Éq 3-11}$$

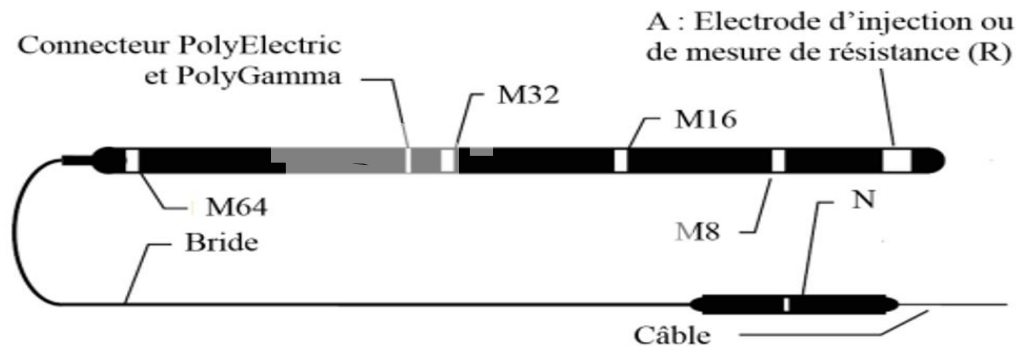


Figure 3 - 13 : Sonde électrique normale 2PEA-1000 (Mount Sopris Instruments co., 2009).

#### 3.2.1. Présentation du modèle électrique

- **Mise en équation du problème**

Les équations de Maxwell (Éq 3-12) gouvernent la distribution du potentiel électrique pour un milieu isotrope et homogène.

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \sigma \vec{E} &= -\vec{\nabla} \cdot \vec{j} \\ \vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{\nabla} v) &= 0 \end{aligned} \quad \text{Éq 3-12}$$

Où  $\sigma$ ,  $\vec{E}$ , et  $\vec{j}$  représentent, respectivement la conductivité électrique (S/m), le champ électrique (V/m), et la densité volumique de courant électrique extérieure ( $A/m^2$ ). Les opérateurs  $\vec{\nabla} \cdot$  et  $\vec{\nabla}$  représentent respectivement la divergence et le gradient. Le champ électrique dérive du potentiel scalaire ( $-\nabla v$ ).

Lorsqu'on effectue des mesures dans un forage, l'équation différentielle est calculée dans un système de coordonnées cylindriques. Si le milieu est isotrope, homogène et infiniment étendu, on peut se placer dans une configuration en axisymétrie avec l'axe de symétrie centré sur le forage. Le potentiel électrique peut alors être exprimé en fonction de  $r$  ( $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ) et  $z$  (Éq 3-13).

$$\nabla \cdot (\sigma(r, z) \nabla v(r, z)) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \cdot \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \sigma \frac{\partial v}{\partial r} \right) = 0 \quad \text{Éq 3-13}$$

- **Bandes extérieures**

Une couche de type élément infini (Comsol, 2012) a été appliquée aux limites de notre modèle qui consiste à élargir artificiellement le domaine physique de calcul. Cela signifie que toutes les conditions aux limites à l'extérieur de la couche d'éléments infinis sont effectivement appliquées à une très grande distance (Figure 3 - 14).

- **Interface**

Pour bien simuler la réponse physique, il existe des familles de frontières radiales et horizontales sur lesquelles et entre lesquelles on applique des conditions physiques afin de conserver le courant et la continuité du potentiel sur l'ensemble du domaine d'étude. Une condition à flux nul a été imposée sur les limites physiques de la sonde à l'exception de la surface des électrodes, du contact air/massif et le long de l'axe de symétrie. De plus, des conditions de conservation du courant et de la continuité potentielle ont été appliquées sur l'interface intérieure du forage et celles des discontinuités. Enfin, une condition de potentiel nul,  $V = 0$  a été appliquée sur les limites du modèle à l'infini (Figure 3 - 14).

- **Sonde**

Nous avons utilisé un modèle de dispositif normal cylindrique comportant des anneaux conducteurs (électrodes) et des parties isolantes (le mandrin), avec un rayon de 2.54 cm, placé au centre d'un trou de forage de 3.81 cm de rayon (correspondant au site de validation). L'outil est équipé d'un réseau de quatre électrodes de mesure de potentiel, situées à des distances de 0.2 m (M8), 0.4 m (M16), 0.8 m (M32) et 1.6 m (M64) de la source d'injection A. Les dimensions détaillées de la sonde 2PEA-1000 sont présentées dans l'Annexe 4B.

- **Source**

En ce qui concerne la source, un courant surfacique de  $142 \text{ A/m}^2$  a été appliqué à la frontière de l'électrode de plus grande longueur, ce qui permet d'avoir une intensité égale à  $1 \text{ A}$  pour l'injection. La modélisation est menée en régime stationnaire, sans notion de temps. Cela correspond à une injection de courant continu.

- **Maillage**

L'ensemble du domaine est défini par des éléments triangulaires de côté variant de  $1 \text{ mm}$  à  $5 \text{ cm}$ . Au niveau de la sonde, de la frontière (fluide/massif rocheux) et au niveau de la discontinuité on garde un maillage de taille d'ordre  $1 \text{ mm}$ .

- **Discontinuité**

En ce qui concerne les discontinuités, des simulations ont été effectuées pour des discontinuités horizontales centrées par rapport au forage, qui sont plus conductrices que la formation environnante.

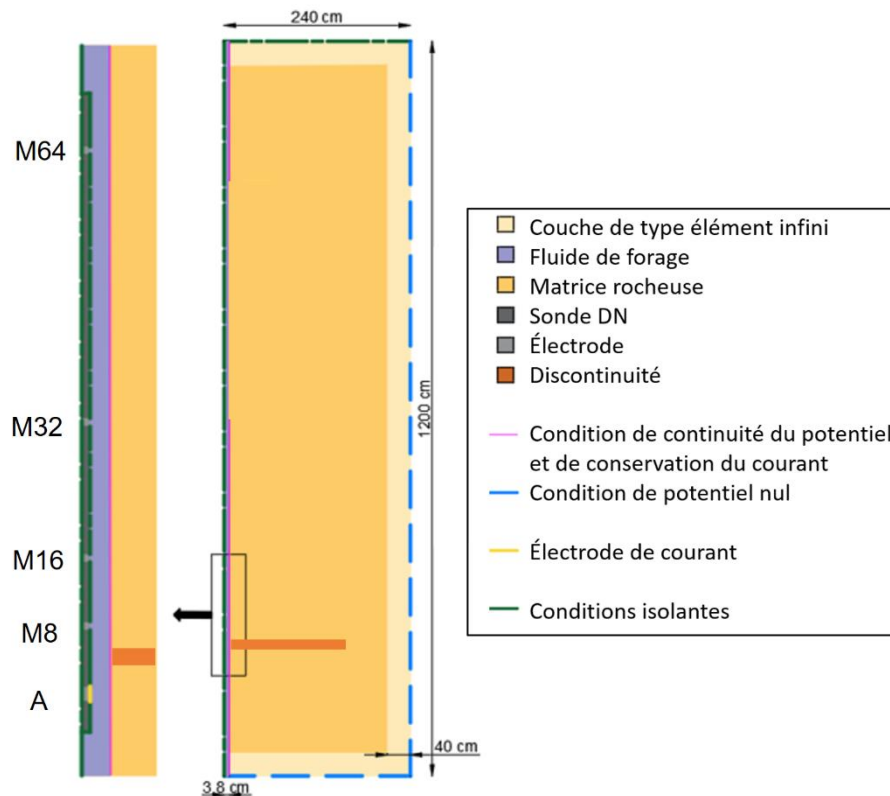


Figure 3 - 14 : Graphe qui représente les différents éléments (Domaine, Frontière) qui constituent notre modèle électrique.



### 3.2.2. Validation du modèle numérique

Afin de valider le modèle numérique une comparaison entre la résistivité apparente [ $R_a$ ] (calculée) pour un milieu homogène (non discontinu) et la résistivité vraie du matériau (simulée) [ $R_t$ ] est effectuée. On considère aussi que la résistivité du fluide du forage est identique à la résistivité du massif rocheux afin d'écartier l'effet de forage dans le calcul d'erreur lié à la modélisation. Les propriétés électriques des différents éléments constituant le modèle sont représentées dans le Tableau 3 - 7 :

Tableau 3 - 7 : Propriétés électriques des matériaux supposées lors de la vérification du modèle électrique.

| Propriété              | Unité | Sonde               | Electrodes          | Fluide de forage | Massif rocheux |
|------------------------|-------|---------------------|---------------------|------------------|----------------|
| Résistivité électrique | Ohm.m | 1x 10 <sup>12</sup> | 1x 10 <sup>-5</sup> | 10000            | 10000          |

Les pourcentages d'erreur sont calculés à l'aide de l'équation Éq 3-14. On a étudié l'erreur au niveau des différentes électrodes de réceptions.

$$Er (\%) = \frac{R_t - R_a}{R_t} \cdot 100 \quad \text{Éq 3-14}$$

Le Tableau 3 - 8 Le présente les calculs d'erreur pour chaque espacement entre le point d'injection A et le point de mesure M. Les niveaux d'erreur sont relativement faibles (inférieurs à 3%). L'erreur diminue lorsqu'on augmente la distance entre l'émetteur et l'électrode. Cette erreur est plus élevée au niveau du premier récepteur. Ces résultats ont permis de valider le modèle avec une marge d'erreur acceptable de 3%.

Tableau 3 - 8 : Calculs d'erreur pour différentes positions de Mx avec prise en compte du mandrin de la sonde.

| Erreur (%) | M8  | M16 | M32 | M64 |
|------------|-----|-----|-----|-----|
|            | 2.9 | 1.2 | 0.9 | 0.5 |

### 3.2.3. Correction des données diagraphiques

Le principe est de corriger l'effet du forage sur la mesure de résistivité apparente. Cet effet est dû aux interfaces cylindriques autour de la sonde, qui influencent la distribution du courant, ainsi qu'à la présence physique de la sonde et de ses parties isolantes. Cela entraîne un confinement des lignes de courant dans le voisinage des parties conductrices telles que les électrodes, nous éloignant ainsi du milieu semi-infini théorique à partir duquel la

résistivité apparente est calculée. L'effet du forage dépend du diamètre du forage ainsi que du contraste de résistivité entre le massif rocheux et le fluide du forage.

Afin de corriger cet effet, une équation de correction a été développée par Taillet (2013) à partir des données de modélisations. Cette équation de 15 termes permet de corriger la valeur de la résistivité apparente mesurée au niveau des différents récepteurs (Éq 3-15).

$$\begin{aligned}
 Y = & -0.00075 \cdot X_1^4 + 0.02299 \cdot X_1^3 - 0.06325 \cdot X_1^2 + 1.11849 \cdot X_1 + \\
 & 0.01300 \cdot X_2^4 - 0.10401 \cdot X_2^3 + 0.21102 \cdot X_2^2 - 0.07903 \cdot X_2 + 0.00069 \cdot \\
 & X_1^3 \cdot X_3 - 0.01209 \cdot X_1^2 \cdot X_3 + 0.02144 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.10210 \cdot X_2 \cdot X_3 - \\
 & 0.00624 \cdot X_2^3 \cdot X_3 + 0.03798 \cdot X_2^2 \cdot X_3 + 0.01112 \cdot X_2 \cdot X_3
 \end{aligned}
 \tag{Éq 3-15}$$

Où Y,  $X_1$ ,  $X_2$  et  $X_3$  représentent respectivement  $\ln\left(\frac{C_t}{m}\right)$ ,  $\ln\left(\frac{C_a}{m}\right)$ ,  $\ln\left(\frac{AM}{D_f}\right)$  et  $X_1 X_2 = \ln\left(\frac{C_a}{m}\right) * \ln\left(\frac{AM}{D_f}\right)$ .  $\left(\frac{C_t}{m}\right)$  est le ratio de la résistivité vraie de la formation et la résistivité du fluide du forage.  $\left(\frac{C_a}{m}\right)$  est le ratio de la résistivité apparente et la résistivité du fluide du forage.  $\left(\frac{AM}{d_f}\right)$  est le ratio de l'espace AM et du diamètre du forage.

Par la suite, les valeurs de résistivité calculées à partir des travaux de modélisation seront corrigées à l'aide de l'équation de Taillet (2013) (Éq 3-15).

### 3.2.4. Position de la discontinuité

On a fait varier la position de la discontinuité par rapport à la position de la source et des quatre électrodes de mesure. Le Tableau 3 - 9 présente les propriétés électriques et géométriques de la discontinuité simulée. Le Tableau 3 - 10 représente les propriétés électriques de la matrice rocheuse, de la sonde et du fluide de forage. On a respecté les propriétés observées sur le site de validation (site national de calibration Bells corners à Ottawa, Ontario, Canada).

Tableau 3 - 9 : Propriétés électriques et géométriques de la discontinuité simulée.

| Discontinuité | $R_{DF}(Ohm.m)$ | $e (cm)$ | $L (cm)$ |
|---------------|-----------------|----------|----------|
|               |                 | 1000     | 5        |

Tableau 3 - 10 : Propriétés électriques des différents éléments constituant le modèle (sonde, électrodes, fluide de forage et matrice rocheuse).

| Propriété              | Unité | Sonde              | Electrodes         | Fluide de forage | Matrice rocheuse |
|------------------------|-------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|
| Résistivité électrique | Ohm.m | $1 \times 10^{12}$ | $1 \times 10^{-5}$ | 15               | 10000            |

La Figure 3 - 15 représente la valeur de résistivité corrigée au niveau de 4 électrodes et pour les différentes positions de la discontinuité entre (-1 m à 2 m). On a déplacé la discontinuité chaque 5 cm. On constate que lorsque la couche mince (conductrice) se situe entre le niveau de l'émetteur et la première électrode de réception la réponse est constante pour les différentes électrodes, avec un palier qui varie selon l'espacement entre les électrodes d'injection et de mesure. Par conséquent, on a fixé la position de la discontinuité à 10 cm au-dessus de la source.

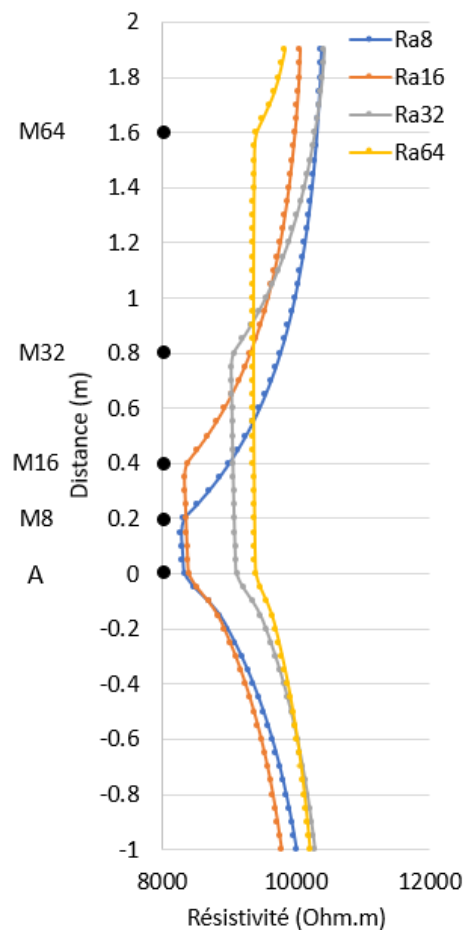


Figure 3 - 15 : La réponse de résistivité apparente corrigée au niveau des 4 électrodes de mesure du dispositif normal pour les différentes positions de la discontinuité entre (-1 m et 2 m) par rapport à l'électrode d'injection.

### 3.2.5. Étude paramétrique

On cherche à quantifier la chute de résistivité produite par la présence d'une couche conductrice dans une formation résistante (Figure 3 - 15). Afin d'étudier l'influence d'une discontinuité sur la réponse électrique, nous avons effectué une étude paramétrique en faisant varier le contraste de résistivité entre la discontinuité et le massif rocheux ( $C_{(RM/DF)}$ ) et les différentes propriétés géométriques (épaisseur ( $e$ ) et longueur ( $L$ )) (Tableau 3 - 11). Le choix de considérer ( $C_{(RM/DF)}$ ) provient de la sensibilité de la méthode électrique normale aux contrastes de résistivité plus qu'aux valeurs de résistivité elles-mêmes (Telford et al., 1990). Pour le fluide de forage, nous avons choisi de prendre la même valeur que sur le site de validation (15 Ohm.m).

Tableau 3 - 11 : Différentes valeurs choisies pour l'étude paramétrique pour les propriétés géométriques et électriques de la discontinuité.

| Propriétés de la discontinuité | $C_{(RM/DF)}$            | $e$ (cm)  | $L$ (cm)                  |
|--------------------------------|--------------------------|-----------|---------------------------|
| Valeurs                        | 2-5-10-20-50-100-200-400 | 0.5-1-2-5 | 1.5-10-15-20-40-60-80-200 |

### 3.2.6. Quantification de la perte de résistivité

Dans le cadre de mes travaux, j'ai défini la diminution de la résistivité engendrée par la présence d'une discontinuité conductrice au sein d'une formation résistante en utilisant les termes "perte de résistivité" ou "perte électrique".

Dans cette partie, nous identifions un facteur de perte électrique ( $Vr$ ) pour exploiter la sensibilité de la réponse diagraphique électrique aux différentes propriétés électriques et géométriques de la discontinuité. Pour quantifier cette diminution, nous avons comparé la résistivité apparente corrigée pour deux modèles : un milieu discontinu ( $R_D$ ) et un milieu homogène ( $R_H$ ) tout en appliquant l'Éq 3-16.

$$Vr (\%) = \frac{R_H - R_D}{R_H} \cdot 100 \quad \text{Éq 3-16}$$

### 3.2.7. Résultats et discussion

La Figure 3 - 16 illustre la réponse de facteur de perte électrique  $Vr$  en fonction de l'ouverture de la discontinuité, au niveau de 4 électrodes de réceptions et pour différents

contrastes (matrice /discontinuité) qui varient entre 2 et 400. En général, on constate que la forme de la réponse  $Vr$  est similaire pour les quatre électrodes de mesure, les courbes pour les différents contrastes de résistivité  $C_{\left(\frac{RM}{DF}\right)}$  sont classées de manière monotone. Pour les faibles contrastes ( $C_{\left(\frac{RM}{DF}\right)} \leq 10$ ), la réponse de  $Vr$  est linéaire et semble converger vers un comportement asymptotique pour les contrastes plus élevés ( $C_{\left(\frac{RM}{DF}\right)} > 10$ ). De plus, pour une faible ouverture de la discontinuité  $e$  et un faible contraste, la présence d'une discontinuité dans un massif rocheux n'est pas significativement remarquable. Lorsque l'ouverture de la discontinuité  $e$  augmente, une augmentation du facteur de perte électrique  $Vr$  est observée pour les différents contrastes.

Également, la Figure 3 - 16 met en évidence que  $Vr$  pour l'électrode M8 varie de 0 à 10% lorsque l'ouverture de la discontinuité  $e$  croît de 0 à 5 cm, pour un contraste  $C_{\left(\frac{RM}{DF}\right)}$  de 2. Cette variation de  $Vr$  augmente avec l'augmentation du contraste  $C_{\left(\frac{RM}{DF}\right)}$ , atteignant une plage de variation de 0 à 70% pour tous contrastes supérieurs à 100. Cependant, il convient de noter que cette observation ne s'applique qu'à l'électrode M8, car l'augmentation de l'espacement entre l'électrode d'injection et l'électrode de réception rend la réponse de  $Vr$  plus distincte pour les contrastes supérieurs à 100. Donc, en augmentant le volume d'investigation, on devient plus sensible aux changements de contraste.

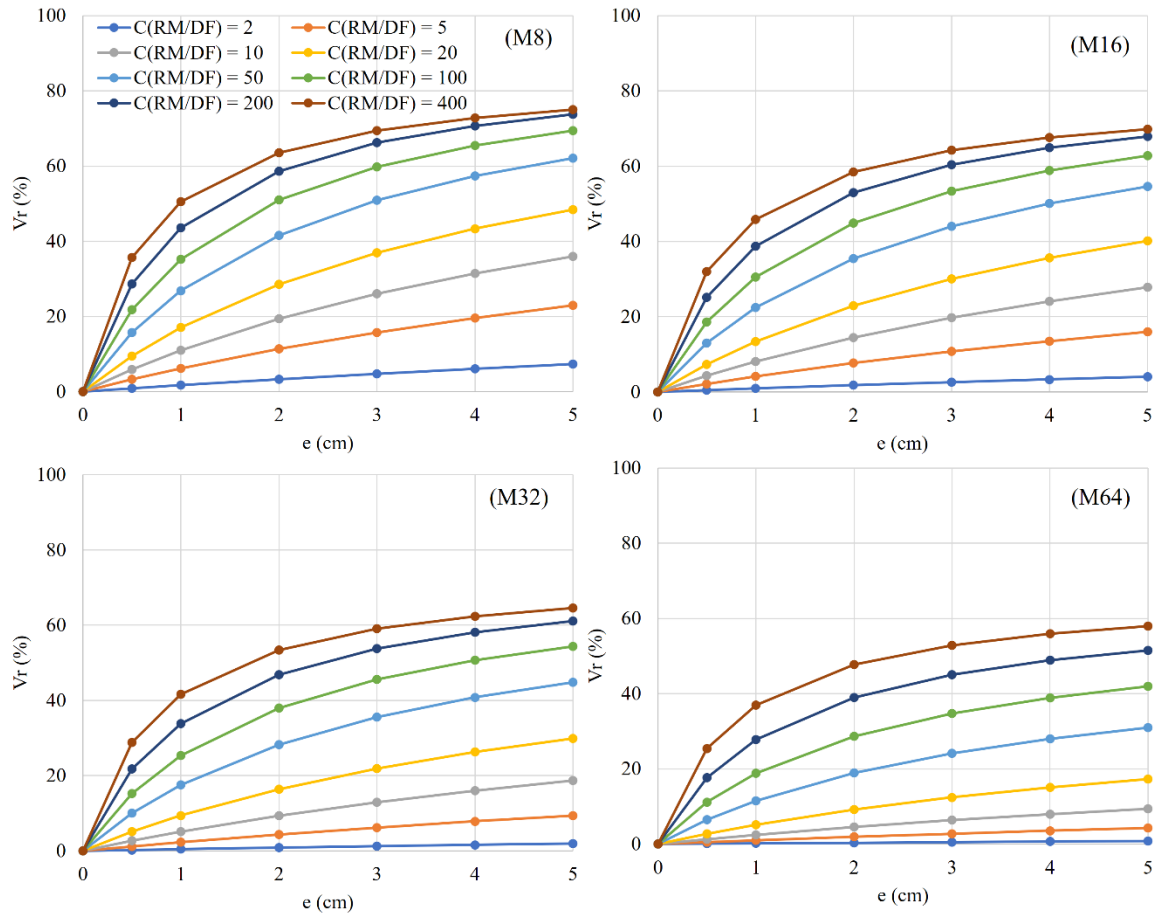


Figure 3 - 16 : Influence de  $C_{\left(\frac{RM}{DF}\right)}$  sur le facteur de perte électrique ( $V_r$ ) pour différentes ouvertures de la discontinuité au niveau des 4 électrodes de réception M8, M16, M32 et M64 et pour différents contrastes (Matrice rocheuse/discontinuité).

La Figure 3 - 17 présente la réponse du facteur de perte électrique  $V_r$  en fonction de la longueur de la discontinuité, ainsi que du contraste (massif/discontinuité) pour les 4 électrodes de mesure. En général, pour les différentes électrodes (M8, M16, M32, M64), on observe que la réponse de  $V_r$  s'éloigne d'une réponse asymptotique avec l'augmentation du contraste. Plus le contraste de résistivité  $C_{\left(\frac{RM}{DF}\right)}$  augmente, plus on est sensible à la caractérisation de la longueur de la discontinuité. Pour les faibles longueurs de discontinuité ( $L < 10$  cm), la présence d'une discontinuité dans un massif rocheux n'est pas significativement remarquable. En outre, il est intéressant de noter que pour  $L < 80$  cm, la réponse de  $V_r$  est presque linéaire à mesure que la longueur de la discontinuité  $L$  augmente. Par ailleurs, la Figure 3-17 montre que l'augmentation de l'espacement entre l'électrode d'injection et l'électrode de mesure nous éloigne d'une réponse asymptotique et nous rapproche d'une réponse linéaire entre  $V_r$  et la longueur de la discontinuité  $L$ . Par

conséquence, plus l'espacement entre l'électrode d'injection et l'électrode de mesure est important, plus nous sommes sensibles à la longueur de la discontinuité  $L$ .

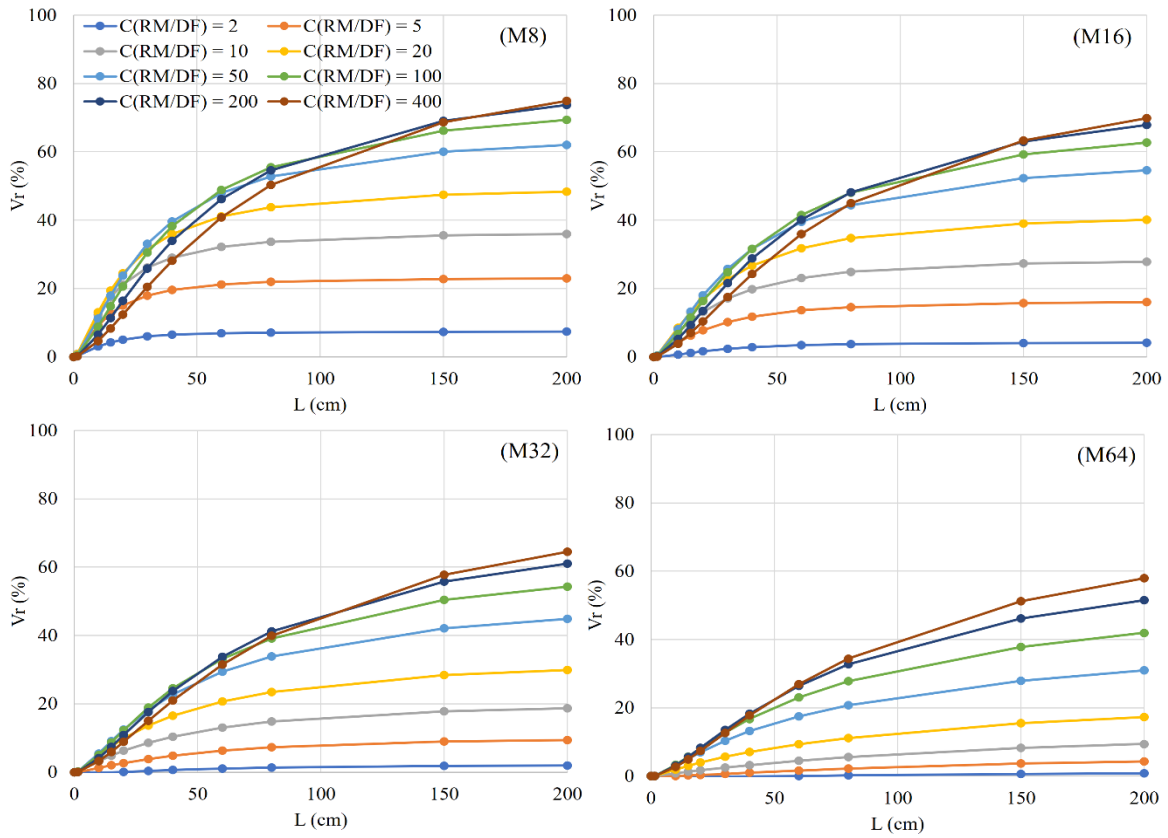


Figure 3 - 17 : Influence de  $C_{\left(\frac{RM}{DF}\right)}$  sur le facteur de perte électrique ( $V_r$ ) pour différentes extensions de la discontinuité au niveau des 4 électrodes de réception M8, M16, M32 et M64 et pour différents contrastes (Matrice rocheuse/discontinuité).

D'après, les Figure 3 - 16 et Figure 3 - 17, on remarque que l'amplitude de variation de  $V_r$  est plus importante pour l'électrode M8, allant de 0 à 75%, alors qu'elle est moins importante pour l'électrode M64, variant de 0 à 60%. La valeur de  $V_r$  diminue à mesure que la distance entre la source et l'électrode de mesure augmente, quelle que soit la valeur de contraste de résistivité  $C_{\left(\frac{RM}{DF}\right)}$ . En conséquent, la mesure est plus sensible au niveau de M8, qui correspond au volume d'investigation le plus petit.

La Figure 3 - 18 montre l'influence du changement du contraste de résistivité (pour  $C_{\left(\frac{RM}{DF}\right)}$  égale à 10 et 200), de l'ouverture (pour  $e$  égale à 3 et 5 cm) et de la longueur (pour  $L$  égale à 40 et 200 cm) de la discontinuité sur la distribution du potentiel électrique au niveau

des différentes électrodes de mesure (représentées respectivement par les points colorés : bleu pour M8, vert pour M16, jaune pour M32 et gris pour M64).

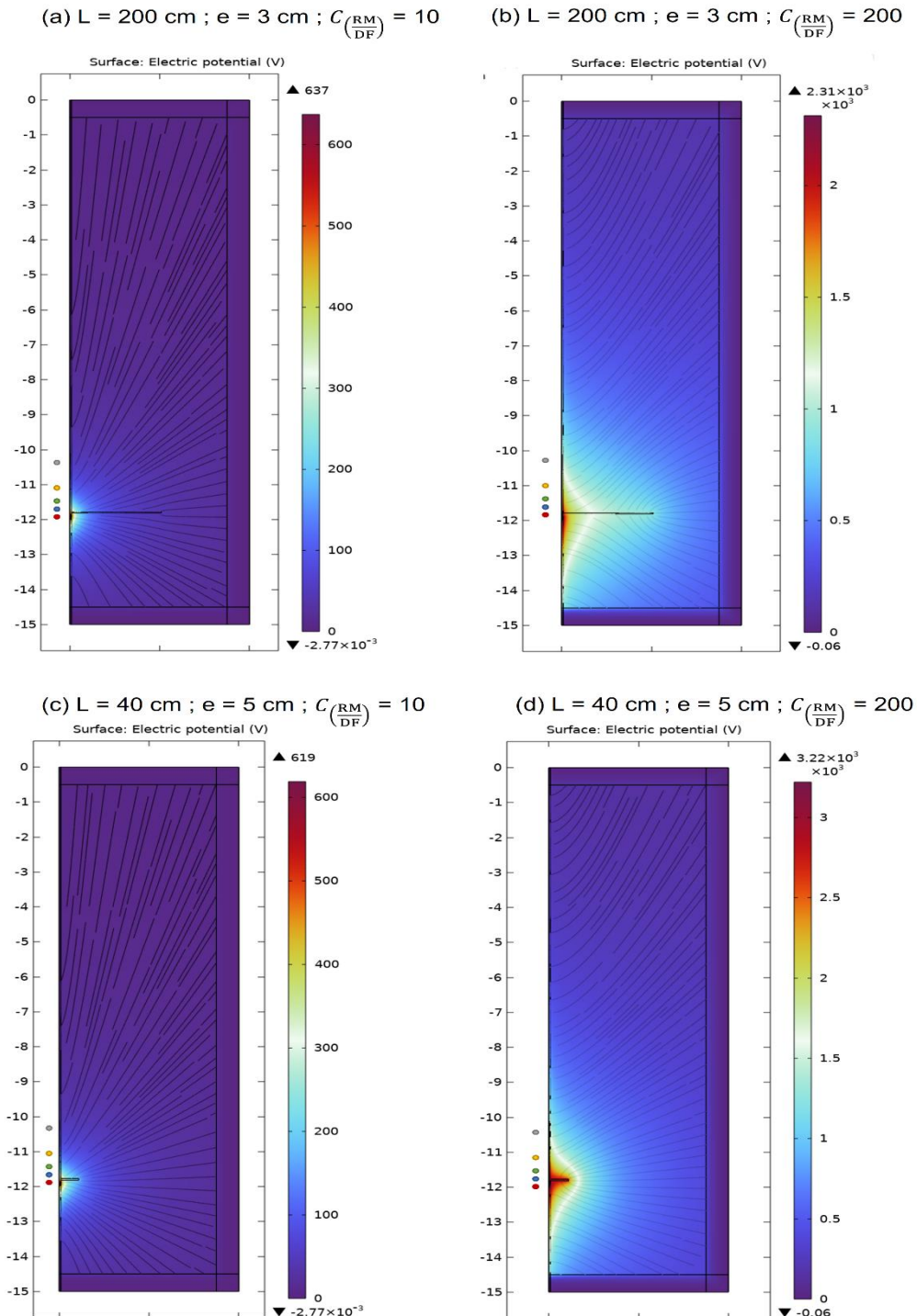


Figure 3 - 18 : Graphes montrant la distribution du potentiel électrique pour des faibles (a et c) et forts contrastes de résistivité (b et d) pour différentes longueurs et ouvertures de discontinuités. Les différents points rouges, bleus, verts, jaunes et gris représentent respectivement la position de l'électrode d'injection A et des électrodes de mesure M8, M16, M32 et M64.



La Figure 3 - 18 illustre comment la discontinuité affecte les mesures électriques en perturbant la répartition du potentiel dans le volume étudié. En comparant les échelles de valeurs entre différents cas, on peut visualiser l'impact relatif des trois paramètres  $e$ ,  $L$  et  $C_{(RM/DF)}$ . On remarque que la variation de  $C_{(RM/DF)}$  a un effet plus important sur les résistivités que les variations de  $e$  et  $L$ . Pour les cas avec un contraste élevé (b et d, avec un contraste de 200), les résistivités dans le volume étudié sont de l'ordre de 1000 Ohm.m, tandis que pour un contraste plus faible (a et c, avec  $C_{(RM/DF)} = 10$ ), elles sont de l'ordre de 250 Ohm.m.

Les équipotentielles montrent que pour les cas avec un contraste élevé (b et d), où la discontinuité est très conductrice, elle se comporte comme une ligne de courant sur toute sa longueur. Ce comportement n'est pas observé pour les cas avec un contraste plus faible (a et c). Ainsi, plus la discontinuité est contrastée (conductrice), plus elle influence la répartition du potentiel le long de sa longueur, ce qui a un impact différent sur le volume étudié entre les cas. De plus, l'influence de la discontinuité sur les réponses dépend de la dimension des sondes utilisées. Pour le cas b, plus la discontinuité est allongée, plus le courant pénètre loin du forage, ce qui provoque des différences entre les mesures proches du forage (petits espacements) et celles plus éloignées (grands espacements). En revanche, plus la discontinuité est épaisse (cas d), plus elle provoque des perturbations au niveau des électrodes de petits espacements, qui se manifestent par une augmentation du potentiel électrique.

### 3.2.8. Synthèse

Cette section présente une étude menée pour évaluer l'influence du contraste de résistivité entre le massif rocheux et la discontinuité  $C_{(RM/DF)}$  ainsi que des propriétés géométriques de la discontinuité conductrice (ouverture :  $e$  et longueur :  $L$ ) sur la réponse de la sonde électrique normale en utilisant COMSOL Multiphysics. Une étude paramétrique a été menée pour évaluer l'impact de ces propriétés sur la réponse de la sonde, et une méthode pour quantifier le facteur de perte électrique a été exposée.

Les conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Le facteur de perte électrique augmente avec l'augmentation des propriétés géométriques de la discontinuité ( $e$  et  $L$ ), et avec l'augmentation du contraste  $C_{(RM/DF)}$ .

- La résolution est plus fine au niveau de M8, tandis que la sensibilité à la longueur de la discontinuité augmente avec l'augmentation de l'espacement entre l'émetteur et l'électrode d'injection.
- La sensibilité au contraste de résistivité augmente également avec l'augmentation de l'espacement.

### 3.3. Conclusion

Afin de caractériser les propriétés d'une discontinuité idéale et isolée dans un massif rocheux, des simulations numériques ont été effectuées pour étudier la réponse des sondes FWS et DN face à sa présence. Les modèles ont été validés avec une marge d'erreur acceptable (4% pour le modèle acoustique et 3% pour le modèle électrique). Des facteurs de perte acoustique et électrique ont été définis pour quantifier l'effet de la discontinuité. De plus, une étude paramétrique a été menée pour évaluer la sensibilité des facteurs de perte acoustique et électrique aux différentes propriétés géométriques ( $e$  et  $L$ ), mécaniques ( $\rho_F$ ,  $VP_F$ , et  $VS_F$ ) et électriques ( $C_{\frac{RM}{DF}}$ ) d'une discontinuité remplie. Il est important de souligner que plusieurs hypothèses ont été fixées pour la modélisation, le diamètre et le fluide de forage, ainsi que pour les discontinuités, lesquelles sont récapitulées dans le Tableau 3 - 12.

Tableau 3 - 12 : Hypothèses de modélisation.

|                    | Acoustique   | Électrique   |
|--------------------|--|--|
| Modélisation       | 2D axisymétrique                                   |  |
| Diamètre du forage | 7.62 cm  |  |
| Fluide de forage : | Eau  |  |
| Discontinuité      | Horizontale perpendiculaire à l'axe de forage      |  |
|                    | Couche mince moins rigide que le milieu encaissant | Couche plus conductrice que la formation environnante. |

En simulant la réponse de la sonde FWS, nous avons pu différencier l'importance de considérer les réponses des ondes de compression et de cisaillement en termes d'atténuation d'amplitude et de vitesse. De plus, l'étude paramétrique a permis de distinguer la sensibilité entre les propriétés des discontinuités remplies ( $e$ ,  $L$ ,  $\rho_F$ ,  $VP_F$ , et  $VS_F$ ), l'impédance acoustique et le rapport  $R_V$  de la matrice rocheuse et les différents facteurs de quantification de perte ( $VV_P$  ;  $VV_S$  ;  $\gamma'_P$  ;  $\gamma'_S$ ). Les résultats montrent que les ondes S sont généralement plus sensibles que les ondes P à la présence d'une fracture, confirmant les travaux de Qinghua .

(2022). La longueur de la fracture influence les réponses des ondes P et S en fonction de leur relation avec la longueur d'onde dominante. Nous avons également montré que la variation de la vitesse est plus indicative de l'ouverture de la fracture que l'atténuation de l'amplitude. De plus, notre analyse a montré que les deux facteurs de perte de transmission sont complémentaires, car ils ont tendance à être plus sensibles à une propriété spécifique de la fracture, ce qui valide l'hypothèse de Pan et al. (2017) de combiner les mesures de vitesse acoustique et d'atténuation d'amplitude des ondes P et S pour mieux caractériser les propriétés d'une discontinuité. Enfin, nos travaux ont souligné l'importance de prendre en compte les réponses de différents récepteurs (R1, R2 et R3).

La simulation de la réponse de la sonde DN et la réalisation de l'étude paramétrique nous a permis de quantifier la sensibilité entre le facteur de perte électrique ( $Vr$ ), les propriétés géométriques de la discontinuité ( $e, L$ ), et le contraste de résistivité entre la matrice rocheuse et la discontinuité entre  $C_{(RM/DF)}$ . Le facteur de perte électrique augmente avec l'augmentation des propriétés géométriques et électrique de la discontinuité. La résolution de la sonde augmente avec la diminution de l'espacement avec l'émetteur et l'électrode de mesure. En outre, on a souligné l'importance de prendre en compte la réponse de différentes électrodes de réception (M8, M16, M32, M64), dans le but d'augmenter le volume d'investigation, pour mieux caractériser le contraste de résistivité  $C_{\left(\frac{RM}{DF}\right)}$  et la longueur de la discontinuité  $L$ .

Les analyses décrites précédemment ont jeté les bases pour développer une méthodologie de travail visant à quantifier la perte (acoustique et électrique) associée à la présence de discontinuités remplies localisées dans un massif rocheux. Les travaux consistent maintenant à exploiter la complémentarité entre les deux outils diagraphiques pour avoir une meilleure caractérisation des différentes propriétés d'une discontinuité.

## Chapitre 4 : Analyse et combinaison des données

Le travail d'étude, proposé dans le précédent chapitre, va maintenant être complété afin de passer de la description des sensibilités respectives des méthodes (acoustique et électrique) à l'étude de la capacité de diagnostic par une approche multi-techniques. Pour cela, nous reprenons l'ensemble des résultats de modélisation (acoustique et électrique) en les organisant dans une base de données. Puis, un premier travail d'analyse porte sur les degrés de corrélation entre les différentes observables qui représentent les facteurs de pertes (acoustiques et électriques) que nous avons établis, avec les différentes propriétés de la discontinuité (géométrique, mécanique et électrique). À l'issue de cette analyse par facteur, nous proposons d'exploiter les sensibilités les plus fortes, de manière combinée. L'objectif ici est d'utiliser la complémentarité de la physique acoustique et électrique aux caractéristiques du milieu et de sa discontinuité.

Dans ce chapitre, nous proposons donc une première partie qui présente la base de données et les caractéristiques, puis une seconde partie qui analyse les sensibilités de manière comparative entre les observables, en étudiant les degrés de corrélation entre eux, permettant de retenir les plus complémentaires et les plus sensibles aux différentes propriétés des discontinuités. À l'issue de ce travail, la troisième partie propose deux approches qui servent à exploiter la complémentarité des indicateurs pour proposer des modèles de prédiction visant à pronostiquer les propriétés d'une discontinuité dans un massif rocheux.

Nous nous attacherons à chaque étape à identifier les sources d'incertitude afin d'évaluer la signification des résultats finaux et les discussions évalueront la pertinence de nos choix d'approche relativement aux différentes techniques d'analyses possibles.

### 4.1. Construction de la base de données

Après les deux études paramétriques en acoustique et en électrique, deux bases de données indépendantes ont été constituées. Ces dernières ont été combinées afin de pouvoir corréler les cinq facteurs de perte (acoustiques :  $[VV_P ; VV_S ; \gamma'_P \ \gamma'_S]$  et électrique :  $[Vr]$ ) pour la caractérisation des propriétés de la discontinuité et de son remplissage. On optimise ainsi le nombre de cas, comme cela a déjà été mentionné dans le chapitre 2 section 2.1.1.5, un type de matériau (matrice rocheuse ou remplissage d'une discontinuité) peut avoir une large gamme de résistivité. Donc, un cas d'étude dans la base de données acoustiques peut couvrir

les 8 cas de contraste dans notre base de données électriques. Par conséquent, on aura 880 cas d'études, c'est la multiplication des 110 cas d'études acoustiques par 8 contraste électriques (Figure 4 - 1).

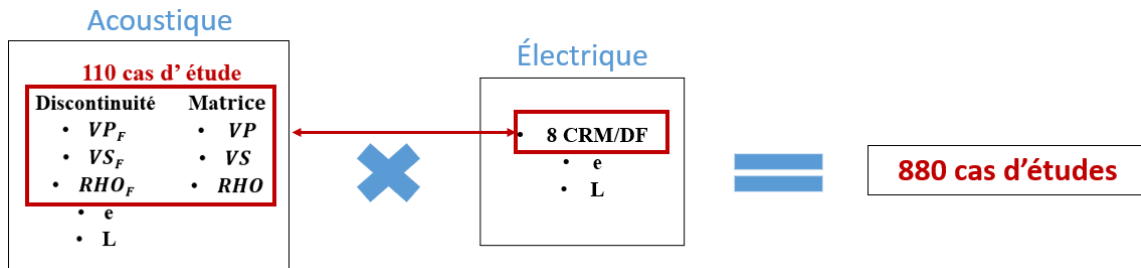


Figure 4 - 1 : Graphe illustrant la combinaison des deux bases de données acoustiques et électrique.

Dans cette optique, cette large base de données va être utilisée pour générer des modèles de prédiction entre les facteurs de pertes acoustiques et électriques et les propriétés géométriques, mécaniques, électriques d'une discontinuité remplie, en se basant sur et les modèles statistiques (technique de régression multiple non linéaire) et les techniques d'apprentissage automatique (réseaux de neurones).

## 4.2. Analyse de données

### 4.2.1. Présentation de l'objectif

Nous étudions les relations entre les propriétés du milieu et de la discontinuité, ainsi que les « observables » (c'est-à-dire les paramètres issus de la mesure dans le forage), dans le chapitre 3. Notre objectif est d'identifier les familles d'observables les plus pertinentes à exploiter. Par exemple, nous examinerons la relation linéaire entre  $e$  et  $VV_{P;S}$ , où l'augmentation de  $e$  entraîne une augmentation de  $VV_{P;S}$ . Cette étude vise à mettre en évidence les phénomènes physiques, tels que l'influence de la longueur d'onde qui est inhérente à la physique étudiée. Cependant, l'utilisation des sondes telles qu'elles sont conçues, avec plusieurs capteurs (3 espacements pour la sonde acoustique, 4 espacements pour la sonde électrique), multiplie les données et offre plus de possibilités pour échantillonner la discontinuité. Cela peut, dans le meilleur des cas, améliorer la caractérisation de l'anomalie, mais peut également contribuer à générer de l'incertitude :

- En créant une redondance d'information qui peut donner plus de poids à un facteur en diminuant un autre.

- En induisant une confusion sur les sensibilités ; par exemple,  $VV_{P;S}$  est plus sensible à l'ouverture de la discontinuité ( $e$ ) que  $\gamma'_{P;S}$ .
- En impliquant une contribution variable de la discontinuité sur le volume d'investigation des différentes électrodes électriques.

Par conséquent, il est nécessaire d'établir une comparaison des différentes observables et de leur sensibilité afin d'identifier l'information minimale suffisante que nous pouvons obtenir en combinant l'information des deux sondes FWS et DN. Cette étape consiste à exploiter au mieux et à valoriser l'ensemble des données pour établir des corrélations et des relations entre les observables (facteurs de perte) et les caractéristiques visées (propriétés géométriques, mécaniques et électriques d'une discontinuité remplie) (Figure 4 - 2).

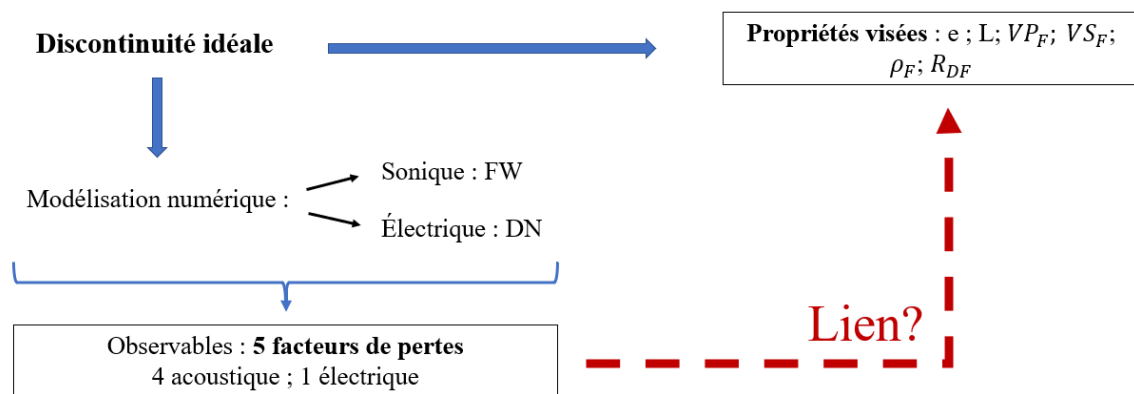


Figure 4 - 2 : Schéma qui représente la progression du travail, de l'analyse des facteurs de perte à la caractérisation des propriétés de la discontinuité idéal.

Le Tableau 4 - 1 présente les plages des propriétés de la discontinuité et les intervalles des facteurs de perte identifiées utilisés dans la base de données, ainsi que leurs statistiques descriptives.

Tableau 4 - 1 : Plages des propriétés de la discontinuité utilisées dans la base de données, et statistiques descriptives.

| Variable                         | Minimum | Maximum | Moyenne | Écart type |
|----------------------------------|---------|---------|---------|------------|
| $e$                              | 0.5     | 5.0     | 4       | 1.2        |
| $L$                              | 1.5     | 200.0   | 101.4   | 75.9       |
| $\frac{VP}{VP_F}$                | 1.8     | 6.2     | 3.1     | 0.6        |
| $\frac{VS}{VS_F}$                | 2.2     | 7.4     | 4.4     | 0.6        |
| $\frac{\rho}{\rho_F}$            | 1.1     | 3.0     | 1.8     | 0.2        |
| $C_{\left(\frac{RM}{DF}\right)}$ | 2.0     | 400.0   | 98.4    | 130.2      |
| $VV_{P1}$                        | 0.0     | 23.8    | 8.7     | 4.5        |
| $VV_{P2}$                        | 0.0     | 19.8    | 7.2     | 3.6        |
| $VV_{P3}$                        | 0.0     | 16.6    | 6.0     | 3.0        |
| $\gamma'_{P1}$                   | -7.5    | 9.6     | 2.9     | 3.2        |
| $\gamma'_{P2}$                   | -7.0    | 12.2    | 3.4     | 3.4        |
| $\gamma'_{P3}$                   | -6.4    | 10.9    | 3.9     | 3.4        |
| $VV_{S1}$                        | 0.0     | 22.9    | 10.3    | 5.2        |
| $VV_{S2}$                        | 0.0     | 18.7    | 8.3     | 4.2        |
| $VV_{S3}$                        | 0.0     | 14.1    | 6.4     | 3.4        |
| $\gamma'_{S1}$                   | -1.7    | 11.9    | 7.1     | 3.0        |
| $\gamma'_{S2}$                   | -0.6    | 13.5    | 8.0     | 3.4        |
| $\gamma'_{S3}$                   | -0.7    | 16.3    | 9.2     | 3.9        |
| $Vr_{M8}$                        | 0.0     | 81.3    | 37.5    | 27.2       |
| $Vr_{M16}$                       | 0.0     | 76.8    | 32.2    | 26.1       |
| $Vr_{M32}$                       | 0.0     | 72.0    | 26.7    | 24.3       |
| $Vr_{M64}$                       | 0.0     | 65.9    | 20.4    | 21.5       |

#### 4.2.2. Test de corrélation

Les tests de corrélation sont des tests statistiques qui sont utilisés pour mesurer la force et la direction de la relation entre deux variables. Il existe plusieurs types de tests de corrélation, notamment le coefficient de corrélation de Pearson, le coefficient de corrélation de Spearman. Le test de Person mesure une relation linéaire entre deux variables continues et il suppose que les données sont normalement distribuées, à l'inverse des deux autres tests. Cependant, comme présentés dans les sections 3.1.7 et 3.2.7, on n'a pas toujours de relations linéaires entre les différents facteurs de perte et les différentes propriétés de la discontinuité, ce qui justifie l'utilisation du coefficient de Spearman. Le coefficient de corrélation de Spearman est compris entre -1 et 1, -1 indiquant une forte corrélation négative, 0 indiquant

une absence de corrélation et 1 indiquant une forte corrélation positive. Le coefficient de corrélation de Spearman est déterminé à l'aide de l'Éq 4-1 (Xu et al., 2013 ; Puth et al., 2015) :

$$r_s = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2} \sqrt{\sum(y - \bar{y})^2}} \quad \text{Éq 4-1}$$

Afin de déterminer si la corrélation entre deux variables est statistiquement significative ou non, un test d'hypothèse a été effectué. L'hypothèse nulle d'un test de corrélation indique qu'il n'y a pas de corrélation entre les deux variables, tandis que l'hypothèse alternative est qu'il y a une corrélation entre les deux variables. Si la valeur du test d'hypothèse est inférieure au niveau de signification prédéterminé ( $p$ ) (généralement  $p = 0.05$ ), l'hypothèse nulle peut être rejetée et l'on peut conclure qu'il existe une corrélation statistiquement significative entre les deux variables (Cohen J., 1988 ; Yagiz et al. 2009). Dans l'annexe 3A on présente en détail le test d'hypothèse.

Le Tableau 4 - 2 représente le coefficient de corrélation de Spearman entre les différents facteurs de pertes (acoustique :  $VV_P$  ;  $VV_S$  ;  $\gamma'_P$  ;  $\gamma'_S$  et électrique :  $Vr$ ) au niveau des différents récepteurs (acoustique : R1 ; R2 ; R3 et électrique : M8 ; M16 ; M32 ; M64) et les différentes propriétés de la discontinuité ( $e$  ;  $L$  ;  $\rho_F$  ;  $VP_F$  ;  $VS_F$ ).



Tableau 4 - 2 : Coefficient de corrélation de Spearman entre les différents facteurs de pertes (acoustique :  $VV_P$  ;  $VV_S$  ;  $\gamma'_P$  ;  $\gamma'_S$  et électrique :  $Vr$ ) au niveau des différents récepteurs (acoustique :  $R1$  ;  $R2$  ;  $R3$  et électrique :  $M8$  ;  $M16$  ;  $M32$  ;  $M64$ ) et les différentes propriétés de la discontinuité ( $e$  ;  $L$  ;  $\rho_F$  ;  $VP_F$  ;  $VS_F$ ), les différentes couleurs rouge ( $\geq 0.4 \leq |r_s|$ ), orange ( $0.2 \leq |r_s| < 0.4$ ), bleu ( $0.1 \leq |r_s| < 0.2$ ), et noir ( $|r_s| < 0.1$ ) représentent respectivement une forte corrélation, une corrélation moyenne, une faible corrélation et pas de corrélation.

| Sorties<br>Entrés | $e$   | $L$  | $\frac{VP}{VP_F}$ | $\frac{VS}{VS_F}$ | $\frac{\rho}{\rho_F}$ | $C_{\left(\frac{RM}{DF}\right)}$ |
|-------------------|-------|------|-------------------|-------------------|-----------------------|----------------------------------|
| $VV_{P1}$         | 0.53  | 0.12 | 0.62              | -0.15             | -0.06                 | 0.00                             |
| $VV_{P2}$         | 0.51  | 0.17 | 0.61              | -0.13             | -0.07                 | 0.00                             |
| $VV_{P3}$         | 0.50  | 0.17 | 0.61              | -0.11             | -0.09                 | 0.00                             |
| $\gamma'_{P1}$    | -0.19 | 0.60 | 0.23              | 0.08              | 0.38                  | 0.00                             |
| $\gamma'_{P2}$    | -0.17 | 0.58 | 0.25              | 0.08              | 0.32                  | 0.00                             |
| $\gamma'_{P3}$    | -0.17 | 0.56 | 0.27              | 0.08              | 0.30                  | 0.00                             |
| $VV_{S1}$         | 0.46  | 0.40 | 0.16              | 0.42              | 0.05                  | 0.00                             |
| $VV_{S2}$         | 0.44  | 0.41 | 0.16              | 0.41              | 0.05                  | 0.00                             |
| $VV_{S3}$         | 0.43  | 0.41 | 0.18              | 0.40              | 0.03                  | 0.00                             |
| $\gamma'_{S1}$    | -0.35 | 0.60 | 0.04              | 0.34              | 0.40                  | 0.00                             |
| $\gamma'_{S2}$    | -0.30 | 0.57 | 0.01              | 0.33              | 0.41                  | 0.00                             |
| $\gamma'_{S3}$    | -0.25 | 0.56 | 0.01              | 0.30              | 0.40                  | 0.00                             |
| $Vr_{M8}$         | 0.26  | 0.47 | 0.06              | 0.03              | 0.03                  | 0.68                             |
| $Vr_{M16}$        | 0.23  | 0.47 | 0.04              | 0.03              | 0.03                  | 0.71                             |
| $Vr_{M32}$        | 0.20  | 0.46 | 0.04              | 0.03              | 0.03                  | 0.73                             |
| $Vr_{M64}$        | 0.17  | 0.46 | 0.04              | 0.03              | 0.03                  | 0.75                             |

Les corrélations retirées/colorées représentés dans le Tableau 4 - 2 sont statistiquement significatives avec  $p < 0.0001$ . Le Tableau 4 - 2 montre que l'ouverture de la discontinuité est fortement corrélée aux facteurs de perte des trois récepteurs acoustiques qui dépendent de la vitesse de propagation des ondes P et S ( $VV_P$  ;  $VV_S$ ) avec un coefficient de corrélation supérieur à 0.4 (ce qui est représenté dans la section : 3.1.7, Figure 3 - 9 (a, b) avec une relation linéaire entre  $e$  et  $VV_{P;S}$ ). De plus, on note que  $e$  est faiblement corrélée au  $\gamma'_P$  (comme l'a montré la section : 3.1.7, Figure 3 - 10 (a), traduisant bien la réponse quasi-constante pour  $\gamma'_P$  quand  $e$  augmente, pour  $e > 1$  cm).  $Vr$  et  $\gamma'_S$  sont modérément corrélés avec l'ouverture de la discontinuité, quel que soit l'espacement considéré. Généralement, on observe que les facteurs de variation de la vitesse ( $VV_P$  ;  $VV_S$ ) est plus indicative de l'ouverture de la fracture que les facteurs d'atténuation de l'amplitude ( $\gamma'_P$  ;  $\gamma'_S$ ) et le facteur de perte électrique ( $Vr$ ).

La longueur de la discontinuité ( $L$ ) est fortement corrélée avec tous les facteurs de perte acoustiques et électriques à l'exception de  $VV_{P1}$  avec lequel elle est faiblement corrélée (section : 3.1.7, Figure 3 - 9 (c)) (la réponse du  $VV_P$  est constante pour  $L$  plus grand que 30 cm).

D'ailleurs, le Tableau 4 - 2 confirme les résultats de la section : 3.1.7, concernant  $(\frac{VP}{VPF} ; \frac{VS}{VSF} ; \frac{\rho}{\rho_F})$ .  $\frac{VP}{VPF}$  est principalement corrélé avec  $VV_P$  supérieur à 0.6 et, en second lieu, avec  $\gamma'_P$  avec un coefficient de corrélation d'environ 0.25. Notons que  $\frac{VP}{VPF}$  est faiblement corrélé avec le facteur de variation de la vitesse de cisaillement ( $r_s \approx 0.15$ ). En revanche,  $\frac{VS}{VSF}$  marque une forte corrélation avec  $VV_S$  ( $r_s \approx 0.41$ ), une corrélation moyenne avec  $\gamma'_S$ , et une faible corrélation avec  $VV_P$ . Concernant  $\frac{\rho}{\rho_F}$ , nous constatons qu'il n'est corrélé qu'avec les facteurs de perte qui dépendent de l'atténuation de l'amplitude ( $\gamma'_{P;S}$ ). Ces résultats valident les discussions de la section 3.1.7.

Le Tableau 4 - 2 montre également que le facteur de perte électrique n'est pas corrélé avec les propriétés mécaniques du remplissage de la discontinuité et vice-versa ( $r_s \approx 0$ ).

Le Tableau 4 - 2 souligne le fait que les propriétés géométriques de la discontinuité ( $e ; L$ ) sont plus corrélées avec  $Vr_{M8}$ . Pour  $e$ ,  $r_s$  diminue de 0.26 à 0.17 en augmentant en augmentant l'espacement entre l'émetteur et les électrodes d'injection. Cela montre que  $e$  joue par sa contribution au volume d'investigation. Plus l'espacement de la sonde augmente, plus la fissure contribue moins sur les résultats. Logiquement ce qu'on observe. Concernant le contraste massif rocheux/remplissage de la discontinuité  $C_{(DF)}^{(RM)}$  est plus corrélé avec  $Vr_{M64}$ . Comme présenter dans la partie (3.2.7), plus on augmente l'espacement de la sonde plus on est sensible au contraste de résistivité  $C_{(DF)}^{(RM)}$ .

Pour tout  $r_s \leq 0.1$ , le facteur de perte est exclu des modèles de prédiction. Soulignons que toutes les corrélations retirées/colorées sont statistiquement significatives avec  $p < 0.0001$ .

- **Redondance**

La redondance dans un modèle de prédiction se manifeste par la présence de plusieurs variables d'entrée qui fournissent des informations similaires et fortement corrélées. Cela peut entraîner un surajustement du modèle prédictif (James et al., 2013). Par conséquent, avant de déterminer les variables à choisir pour caractériser/calculer chaque propriété de la discontinuité indépendamment de l'autre, il est essentiel d'examiner si les différents facteurs de perte (acoustique et électrique) sont corrélés entre eux ou pas. Il est primordial d'effectuer

cette étape afin d'obtenir un modèle de prédiction optimal. Elle permet d'accéder à un maximum d'informations avec un minimum de paramètres et d'éliminer toute redondance dans le modèle, ce qui réduit sa taille (Yagiz et al., 2009). Le Tableau 4 - 3 représente le degré de corrélation entre les différents facteurs de perte au niveau des différents récepteurs.

Tableau 4 - 3 : Le coefficient de corrélation de Spearman entre les différents facteurs de pertes au niveau des différents récepteurs. Chaque couleur représente un facteur de perte pour les différents récepteurs.

|                | $VV_{P1}$ | $VV_{P2}$ | $VV_{P3}$ | $\gamma'_{P1}$ | $\gamma'_{P2}$ | $\gamma'_{P3}$ | $VV_{S1}$ | $VV_{S2}$ | $VV_{S3}$ | $\gamma'_{S1}$ | $\gamma'_{S2}$ | $\gamma'_{S3}$ | $Vr_{M8}$ | $Vr_{M16}$ | $Vr_{M32}$ | $Vr_{M64}$ |
|----------------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------------|----------------|-----------|------------|------------|------------|
| $VV_{P1}$      | 1.00      | 0.97      | 0.95      | 0.16           | 0.16           | 0.15           | 0.61      | 0.61      | 0.61      | 0.02           | 0.02           | 0.10           | 0.26      | 0.24       | 0.21       | 0.17       |
| $VV_{P2}$      |           | 1.00      | 0.98      | 0.29           | 0.30           | 0.28           | 0.62      | 0.63      | 0.63      | 0.10           | 0.12           | 0.20           | 0.31      | 0.28       | 0.25       | 0.22       |
| $VV_{P3}$      |           |           | 1.00      | 0.31           | 0.33           | 0.31           | 0.63      | 0.64      | 0.63      | 0.14           | 0.15           | 0.22           | 0.32      | 0.29       | 0.26       | 0.22       |
| $\gamma'_{P1}$ |           |           |           | 1.00           | 0.91           | 0.91           | 0.37      | 0.45      | 0.50      | 0.60           | 0.61           | 0.64           | 0.42      | 0.41       | 0.39       | 0.36       |
| $\gamma'_{P2}$ |           |           |           |                | 1.00           | 0.95           | 0.30      | 0.40      | 0.43      | 0.50           | 0.61           | 0.60           | 0.37      | 0.36       | 0.34       | 0.30       |
| $\gamma'_{P3}$ |           |           |           |                |                | 1.00           | 0.33      | 0.40      | 0.42      | 0.52           | 0.62           | 0.65           | 0.39      | 0.38       | 0.36       | 0.32       |
| $VV_{S1}$      |           |           |           |                |                |                | 1.00      | 0.97      | 0.96      | 0.30           | 0.45           | 0.55           | 0.44      | 0.41       | 0.37       | 0.32       |
| $VV_{S2}$      |           |           |           |                |                |                |           | 1.00      | 0.98      | 0.36           | 0.47           | 0.58           | 0.46      | 0.43       | 0.39       | 0.34       |
| $VV_{S3}$      |           |           |           |                |                |                |           |           | 1.00      | 0.35           | 0.48           | 0.58           | 0.47      | 0.44       | 0.40       | 0.35       |
| $\gamma'_{S1}$ |           |           |           |                |                |                |           |           |           | 1.00           | 0.86           | 0.80           | 0.35      | 0.33       | 0.32       | 0.29       |
| $\gamma'_{S2}$ |           |           |           |                |                |                |           |           |           |                | 1.00           | 0.93           | 0.41      | 0.40       | 0.38       | 0.34       |
| $\gamma'_{S3}$ |           |           |           |                |                |                |           |           |           |                |                | 1.00           | 0.44      | 0.42       | 0.39       | 0.35       |
| $Vr_{M8}$      |           |           |           |                |                |                |           |           |           |                |                |                | 1.00      | 1.00       | 0.98       | 0.95       |
| $Vr_{M16}$     |           |           |           |                |                |                |           |           |           |                |                |                |           | 1.00       | 0.99       | 0.97       |
| $Vr_{M32}$     |           |           |           |                |                |                |           |           |           |                |                |                |           |            | 1.00       | 0.99       |
| $Vr_{M64}$     |           |           |           |                |                |                |           |           |           |                |                |                |           |            |            | 1.00       |

Le Tableau 4 - 3 met en évidence une forte corrélation (valeurs  $r_s$  supérieures à 0.9) entre les mêmes facteurs de perte pour différents récepteurs (par exemple : entre  $VV_{P1}$ ;  $VV_{P2}$ ;  $VV_{P3}$ ). Pour éviter la redondance et minimiser la complexité de nos équations de prédiction, nous avons décidé de considérer les facteurs de perte pour un seul récepteur. Nous avons donc choisi de nous concentrer sur les facteurs acoustiques au niveau du premier récepteur car ils présentent la meilleure corrélation avec les différentes variables de sortie. En ce qui concerne les facteurs de perte électriques, nous avons opté pour l'utilisation de  $Vr_{M8}$  pour caractériser les propriétés géométriques de la discontinuité et de  $Vr_{M32}$  pour calculer  $C_{(DF)}^{(RM)}$  (Cette décision est justifiée par le fait qu'il serait difficile de cibler spécifiquement une seule

discontinuité dans un volume d'investigation important comme pour M64 (espacement égale à 1.6 m)).

#### 4.2.2.1. Sensibilités des propriétés du massif rocheux sur les coefficients de corrélation

Au chapitre 3 (section : 3.1.7), on a constaté qu'il y a certains paramètres qui influent sur la réponse entre les différentes variables d'entrées/observables (facteurs de perte) et de sorties/propriétés visées (propriétés de la discontinuité), comme l'impédance acoustique et le rapport VP/VS de la mreatrice rocheuse. Dans la suite, nous cherchons à optimiser la sensibilité des observables par rapport aux paramètres de la discontinuité en exploitant l'effet de la prise en compte des propriétés du massif ( $R_V$ ,  $Z_P$  et  $Z_S$ ) sur les coefficients de corrélation.

- **Effet du ratio VP/VS ( $R_V$ ) sur  $VV$**

D'après les résultats de l'étude paramétrique, on a distingué l'effet du rapport VP/VS ( $R_V$ ) sur la réponse du  $VV_P$  et du  $VV_S$ . Par conséquent, on va explorer le potentiel du rapport  $VV/R_V$  sur le coefficient de corrélation entre les différentes propriétés de la discontinuité.

Tableau 4 - 4 : Effet de la prise en compte de  $R_V$  sur les coefficients de corrélation entre  $VV$  et les différentes propriétés de la discontinuité au niveau du premier récepteur. La couleur rouge représente un coefficient de corrélation ( $r_s$ ) plus important que dans le cas initial.

| Entrés \ Sorties      | $e$  | $L$  | $\frac{VP}{VP_F}$ | $\frac{VS}{VS_F}$ | $\frac{\rho}{\rho_F}$ |
|-----------------------|------|------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| $VV_{P1}$             | 0.53 | 0.12 | 0.62              | -0.08             | -0.06                 |
| $\frac{VV_{P1}}{R_V}$ | 0.55 | 0.12 | 0.63              | 0.09              | 0.01                  |
| $VV_{S1}$             | 0.4  | 0.40 | 0.16              | 0.40              | 0.05                  |
| $\frac{VV_{S1}}{R_V}$ | 0.44 | 0.40 | 0.12              | 0.44              | 0.09                  |

Le Tableau 4 - 4 montre que lorsque  $VV_{P1}$  est rapporté a  $R_V$ , le coefficient de corrélation avec l'ouverture de la discontinuité  $e$  augmente légèrement du 0.53 à 0.55. La Figure 3 - 9 (a), illustre l'effet du  $R_V$  sur  $VV_{P1}$  (la relation proportionnelle entre  $R_V$  et  $VV_{P1}$  : quand  $R_V$  augmente  $VV_{P1}$  augmente). D'après le Tableau 4 - 4, on observe une légère augmentation du

coefficient de corrélation entre  $VV_{P1}$  et  $\frac{VP}{VP_F}$ , de 0.62 à 0.63, lorsque  $R_V$  est pris en compte (cet effet est également illustré dans la Figure 3 - 9 (e)). En outre, la division de  $VV_S$  par  $R_V$  entraîne une légère augmentation de  $r_s$  pour  $\frac{VS}{VS_F}$  (de 0.4 à 0.44). Cependant, il n'y a pas d'autres avantages pour les autres propriétés de la discontinuité.

- **Effet de l'impédance acoustique ( $Z_P$  et  $Z_S$ ) sur  $\gamma'$**

L'étude paramétrique a révélé l'impact de l'impédance acoustique sur les facteurs d'atténuation de l'amplitude (section : 3.1.7). Cependant, cette partie examine l'effet de la division de  $\gamma'$  par l'impédance acoustique sur les coefficients de corrélation pour les différentes propriétés de la discontinuité au niveau du premier récepteur.

Tableau 4 - 5 : Influence de la prise en compte de l'impédance acoustique de la matrice rocheuse entourant ( $Z$ ) sur les coefficients de corrélation ( $r_s$ ) entre  $VV$  et les différentes propriétés de la discontinuité au niveau du premier récepteur. La couleur rouge représente un coefficient de corrélation plus important que dans le cas initial.

| Sorties<br>Entrés          | $e$   | $L$  | $\frac{VP}{VP_F}$ | $\frac{VS}{VS_F}$ | $\frac{\rho}{\rho_F}$ |
|----------------------------|-------|------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| $\gamma'_{P1}$             | -0.19 | 0.60 | 0.23              | 0.08              | 0.38                  |
| $\frac{\gamma'_{P1}}{Z_P}$ | -0.23 | 0.76 | 0.21              | 0.07              | 0.29                  |
| $\gamma'_{S1}$             | -0.35 | 0.60 | 0.04              | 0.34              | 0.40                  |
| $\frac{\gamma'_{S1}}{Z_S}$ | -0.39 | 0.65 | 0.04              | 0.10              | 0.11                  |

Le Tableau 4 - 5 illustre que la prise en compte de l'impédance acoustique de la matrice rocheuse environnante améliore le coefficient de corrélation entre  $\gamma'_{P;S}$  et les propriétés géométriques de la discontinuité ( $e ; L$ ), environ 20 % pour  $\gamma'_P$  et 10% pour  $\gamma'_S$ . Cette amélioration est justifiée par la réponse dépendante entre  $\gamma'$  et les propriétés géométriques de la discontinuité, illustrée dans les Figure 3 - 10 (a, b, c, d).

#### 4.2.2.2. Rapport entre les différents récepteurs

Au chapitre 3 de cette thèse, les sections 3.1.7 (Figure 3 - 11) et 3.2.7 (FiguresFigure 3 - 16 et Figure 3 - 17) mettent en évidence l'importance de prendre en compte la réponse des récepteurs situés plus loin et leur relation avec le volume d'investigation de chaque outil

(FWS, DN). Pour améliorer la sensibilité des observables aux propriétés d'une discontinuité, il a été proposé de combiner les résultats de deux récepteurs étant donné que les réponses des différents récepteurs sont fortement corrélées (Tableau 4 - 3). Cette approche consiste à créer un nouvel observable afin d'augmenter le rang dynamique de la base de données. Par conséquent, cette partie consiste à explorer la corrélation entre les rapports des différents facteurs de pertes subies par les différents récepteurs (c'est-à-dire la réponse d'un récepteur divisée par la réponse d'un autre) et les caractéristiques de la discontinuité. Plutôt que de considérer directement les facteurs de perte des différents récepteurs, de nouvelles variables d'entrée sont créées. Par exemple, les deux récepteurs acoustiques R1 et R2 sont tous deux sensibles à l'ouverture de la discontinuité de manière corrélée (Tableau 4 - 2). En utilisant le rapport de réponse R2/R1, on prend en compte les deux sensibilités pour accentuer leur effet sur les résultats et les rendre plus significatifs que lorsqu'ils sont pris séparément.

- **Acoustiques**

Les données du Tableau 4 - 6 indiquent qu'il existe une corrélation modérée entre l'ouverture d'une discontinuité  $e$  et les deux rapports liés aux changements de vitesse des ondes P et S ( $R_{VV_P}$  ;  $R_{VV_S}$ ). Cette corrélation est déjà illustrée dans la Figure 3 - 11 (a) (section : 3.1.7) qui montre que l'augmentation de  $e$  entraîne une augmentation de la différence des réponses des récepteurs au niveau de  $VV$ . En outre, le Tableau 4 - 6 révèle que la longueur de la discontinuité  $L$  est corrélée raisonnablement au rapport lié au changement de vitesse d'ondes P ( $R_{VV_P}$ ) et au rapport d'atténuation de l'amplitude d'ondes S ( $R_{\gamma'_S}$ ) (Figure 3 - 11 (c, d)).

Les rapports illustrés représentent la réponse du premier récepteur divisée par la réponse du deuxième récepteur. On n'a pas pris en compte le rapport entre le premier récepteur et le troisième récepteur pour ne pas rajouter de redondance dans les équations de prédiction, puisque les rapports sont fortement corrélés. Notons également que l'on n'a pas présenté la corrélation des rapports acoustiques ( $R_{VV}$  ;  $R_{\gamma'}$ ) avec le contraste de résistivité, car les facteurs de perte de transmission acoustique ne sont pas corrélés avec les propriétés électriques du milieu (Tableau 4 - 2).

Tableau 4 - 6 : Coefficient de corrélation ( $r_s$ ) entre les rapports des différents facteurs de pertes acoustiques subies par les différents récepteurs et les propriétés géométriques et mécaniques d'une discontinuité remplie. La couleur rouge représente un coefficient de corrélation important.

| Entrés \ Sorties                     | $e$  | $L$   | $\frac{VP}{VP_F}$ | $\frac{VS}{VS_F}$ | $\frac{\rho}{\rho_F}$ |
|--------------------------------------|------|-------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| $R_{VV_P} = \frac{VV_{P1}}{VV_{P2}}$ | 0.26 | -0.25 | 0.09              | 0.03              | 0.02                  |
| $R_{VV_S} = \frac{VV_{S1}}{VV_{S2}}$ | 0.15 | -0.08 | 0.01              | 0.09              | -0.08                 |
| $R_{Y'_P} = \frac{Y'_{P1}}{Y'_{P2}}$ | 0.07 | -0.09 | -0.02             | 0.09              | 0.07                  |
| $R_{Y'_S} = \frac{Y'_{S1}}{Y'_{S2}}$ | 0.09 | -0.29 | -0.03             | 0.04              | -0.01                 |

- **Électriques**

Le Tableau 4 - 7 montre que le rapport de facteur de résistivité entre les électrodes  $R_{Vr}$  n'est pas corrélé avec l'ouverture de la discontinuité, néanmoins il est fortement corrélé avec la longueur de la discontinuité et le contraste de résistivité. Cette corrélation est discutée plus en détail dans la section 3.2.7, où il est souligné que le volume d'investigation augmente avec l'espacement de l'outil. De plus, d'après le Tableau 4 - 7 on constate que la corrélation est plus importante pour un rapport plus contrasté,  $r_s$  pour  $R_{Vr2}$  est plus important que pour  $R_{Vr1}$ .

Tableau 4 - 7 : Coefficient de corrélation ( $r_s$ ) entre le rapport de facteur de perte de résistivité ( $\frac{r_{M32}}{r_{M16}}$ ) et les propriétés géométriques et électriques d'une discontinuité remplie. La couleur rouge représente un coefficient de corrélation important.

| Entrés \ Sorties                     | $e$  | $L$  | $C_{\left(\frac{RM}{DF}\right)}$ |
|--------------------------------------|------|------|----------------------------------|
| $R_{Vr1} = \frac{Vr_{M16}}{Vr_{M8}}$ | 0.02 | 0.41 | 0.54                             |
| $R_{Vr2} = \frac{Vr_{M32}}{Vr_{M8}}$ | 0.03 | 0.42 | 0.66                             |

#### 4.2.2.3. Synthèse

Après une lourde étude de sensibilité entre les différents observables de la base de données et les différentes propriétés visées de la discontinuité, le Tableau 4 - 8 résume les différentes variables d'entrées (facteurs de perte et rapports) tirés pour prédire les propriétés

géométriques ( $e; L$ ), mécaniques ( $VP_F; VS_F; \rho_F$ ) et électrique ( $C_{\left(\frac{RM}{DF}\right)}$ ) d'une discontinuité remplie.

Tableau 4 - 8 : Variables d'entrées pour chaque propriété de la discontinuité remplie.

| Variable de sortie               | Variables d'entrées   |
|----------------------------------|---|
| $e$                              | $\frac{VV_{P1}}{R_V}; VV_{S1}; \gamma'_{P1}; \gamma'_{S1}; R_{VV_P}; R_{VV_S}; Vr_{M8}$                           |
| $L$                              | $VV_{P1}; VV_{S1}; \frac{\gamma'_{P1}}{Z_P}; \frac{\gamma'_{S1}}{Z_S}; R_{VV_P}; R_{\gamma'_S}; Vr_{M8}; R_{Vr2}$ |
| $VP/VP_F$                        | $VV_{P1}; VV_{S1}; \gamma'_{P1}$  |
| $VS/VS_F$                        | $VV_{P1}; \gamma'_{S1}; R_{VV_S}$   |
| $\rho/\rho_F$                    | $\gamma'_{P1}; \gamma'_{S1}$  |
| $C_{\left(\frac{RM}{DF}\right)}$ | $Vr_{M32}; R_{Vr2}$   |

#### 4.2.3. Analyse en composantes principales ACP

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée afin de valider le test de corrélation utilisé pour déterminer les variables d'entrées pour chaque modèle prédictif. Une alternative à nos travaux sur le coefficient consiste à un travail qui globalise le problème. L'analyse en composante principale prend effectivement l'ensemble des paramètres considérés (propriétés de la discontinuité et observables) afin de les comparer deux à deux. L'ACP représente une projection des variables sur deux facteurs de projection (chaque facteur est représenté dans un espace factoriel). C'est une méthode d'observations d'un espace à  $p$  dimensions variables sur un espace de  $k$  dimensions (où  $k < p$ ). Elle permet de réduire l'ensemble des variables pour chaque modèle prédictif tout en représentant les composantes principales (variables les plus corrélées entre elles). L'ACP consiste également à l'analyse de corrélation entre paramètre. Le coefficient de corrélation correspond au produit scalaire entre 2 variables représentées dans cet espace à  $k$  dimensions.

D'après l'analyse en composantes principales (ACP), deux variables sont considérées comme étant linéairement corrélées si elles sont proches l'une de l'autre sur le cercle unité, soit en étant très proches et positivement corrélées, soit en étant diamétralement opposées et négativement corrélées. En revanche, si les variables sont représentées en quadrature, cela signifie qu'elles sont indépendantes (Jackson et al, 1991 ; Greenacre et al., 2022). Cependant, cette approche suppose que les relations entre les variables sont linéaires, ce qui n'est pas toujours le cas. Malgré cette limitation, nous avons utilisé l'approche ACP pour étudier nos



données et avons confronté ces résultats à d'autres méthodes pour obtenir une vue plus complète et complémentaire de notre analyse.

La Figure 4 - 3 représente l'ACP pour l'ouverture  $e$  de la discontinuité et les variables d'entrées déterminées par l'analyse de corrélation sont représentées. La projection ACP a été faite sur les deux axes de projection F1 et F2 qui porte le taux d'informations le plus élevé comparativement aux autres axes. Les résultats obtenus nous confrontent dans les conclusions de l'étude menée avec le coefficient de Spearman.

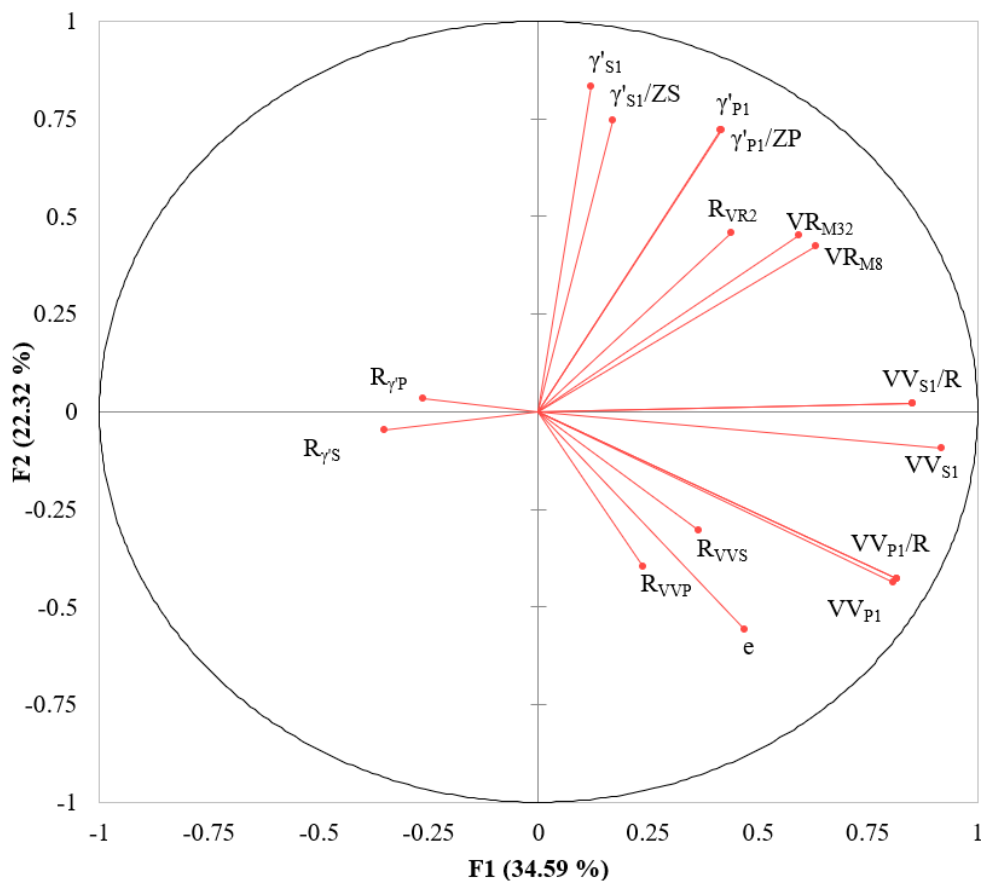


Figure 4 - 3 : Analyse (ACP) sur les axes F1, et F2. Seulement l'ouverture de la discontinuité  $e$  et les variables d'entrées déterminées par l'analyse de corrélation sont représentés.

La Figure 4 - 3 valide les résultats de l'analyse de corrélation au niveau de  $e$  :

- $e$  est corrélé fortement aux variables de vitesse  $VV_{P1}$  et  $VV_{S1}$  ;
- $e$  est plus corrélé avec  $VR_{M8}$  que  $VR_{M32}$  ;
- Tenir compte du coefficient R améliore faiblement la corrélation entre  $e$  et  $VV_{P1}$  et n'influe pas sur la corrélation entre  $e$  et  $VV_{S1}$ .
- Tenir compte de l'impédance acoustique n'améliore pas la prédiction de l'ouverture de la discontinuité.

- $e$  est significativement corrélé avec les rapports de vitesses entre les récepteurs et pas avec les rapports d'amplitude.

On retrouve à l'Annexe 3 B les résultats de l'ACP pour les différentes propriétés de la discontinuité.

#### 4.2.4. Régression simple

Avant de combiner les données, il est utile d'étudier le type de relation entre les différentes variables de sortie et les différentes variables d'entrées que nous avons retenu deux à deux. Cela permet d'optimiser la forme de l'équation de régression multiple. Pour déterminer la forme de l'équation entre deux variables, nous utilisons la méthode de régression simple (Yagiz et al. 2009).

La régression simple est une méthode statistique utilisée pour modéliser la relation entre une seule variable prédictive et une variable de réponse. Pour ce faire, on utilise généralement la régression des moindres carrés, qui consiste à trouver les valeurs des paramètres qui minimisent la somme des différences au carré entre les valeurs de réponse observées et les valeurs prédites.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad \text{Éq 4-2}$$

où (Y) est les points modélisés, ( $\hat{Y}$ ) est les points estimés et ( $\bar{Y}$ ) est la moyenne des valeurs de la variable dépendante.

On a étudié le type de la relation entre chaque variable d'entrée et chaque variable de sortie (Tableau 4 - 8). On a testé différents types de fonctions : linéaire, polynomiale (deuxième degré et troisième degré), exponentielle, puissance et logarithmique. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel XLStat (logiciel de statistique de Microsoft Excel, XLStat). Dans le corps de ce document nous illustrons la démarche pour le paramètre d'ouverture de la discontinuité ( $e$ ) uniquement, les études pour les autres paramètres sont présentées dans l'Annexe 3. Le Tableau 4 - 9 met en évidence que la fonction polynomiale de troisième ordre est la plus adaptée pour obtenir de meilleurs coefficients de détermination entre les différentes variables d'entrée ( $VV_{P1}/R_V$  ;  $VV_{S1}$  ;  $\gamma'_{P1}$  ;  $\gamma'_{S1}$  ;  $R_{VV_P}$  ;  $R_{VV_S}$  ;  $Vr_{M16}$ ) et l'ouverture de la discontinuité. Les courbes non linéaires représentées dans les Figure 3 - 10, Figure 3 - 11 et Figure 3 - 16 du chapitre 3 soutiennent cette décision. Par exemple, la Figure 3 - 11 (a et b) montre que la relation entre  $e$  et  $\gamma'_{P;S1}$  n'est pas une fonction

polynomiale de premier ordre, exponentielle, puissance ou logarithmique, comme le confirme le très faible coefficient de détermination inférieur à 0.03 dans le Tableau 4-9. Ainsi, une fonction polynomiale non linéaire d'ordre supérieur est nécessaire, et la fonction de troisième ordre a donné le meilleur coefficient de détermination de 0.15. De plus, les coefficients de détermination entre  $e$  et  $VV_{P,S1}$  montrent une amélioration modérée de  $R^2$  en variant les différents ordres polynomiaux (de 0.28 à 0.38 pour  $VV_{P1}$  et de 0.25 à 0.30 pour  $VV_{S1}$ ), car Figure 3 - 10 (a et b) montre une relation presque linéaire entre les variables. Selon la Figure 3 – 16, la relation entre  $e$  et  $Vr_{M8}$  dépend du contraste, et cette relation est presque linéaire pour les faibles contrastes et non linéaire pour les contrastes élevés, ce qui explique pourquoi le coefficient de détermination est le plus important pour une fonction polynomiale de troisième ordre  $R^2 = 0.21$ .

Tableau 4 - 9 : Coefficient de détermination  $R^2$  de la regression simple entre l'ouverture de la discontinuité est les différentes variables d'entrées ( $VV_{P1}/R_V ; VV_{S1} ; \gamma'_{P1} ; \gamma'_{S1} ; R_{VV_P} ; R_{VV_S} ; Vr_{M16}$ ) pour différents types de fonction.

|                | 1 <sup>er</sup> ordre | 2 <sup>e</sup> ordre | 3 <sup>e</sup> ordre | Exp  | Puis | Log  |
|----------------|-----------------------|----------------------|----------------------|------|------|------|
| $VV_{P1}/R_V$  | 0.28                  | 0.35                 | 0.38                 | 0.20 | 0.24 | 0.19 |
| $VV_{S1}$      | 0.25                  | 0.27                 | 0.30                 | 0.23 | --   | --   |
| $\gamma'_{P1}$ | 0.02                  | 0.03                 | 0.15                 | 0.02 | --   | --   |
| $\gamma'_{S1}$ | 0.07                  | 0.09                 | 0.11                 | 0.06 | --   | --   |
| $R_{VV_P}$     | 0.10                  | 0.12                 | 0.22                 | 0.10 | 0.05 | 0.1  |
| $R_{VV_S}$     | 0.03                  | 0.06                 | 0.11                 | 0.03 | --   | --   |
| $Vr_{M8}$      | 0.03                  | 0.12                 | 0.21                 | 0.03 | 0.03 | 0.02 |

Les Tableau A3 - 1 à Tableau A3 - 5 (Annexe 3) présentent les coefficients de détermination entre les différentes propriétés mécaniques, électriques et géométriques d'une discontinuité remplie et les différentes variables qui sont les plus corrélées à chaque propriété de la discontinuité. Grace à cette étude, on conclut donc que la fonction polynomiale de 3e ordre est la forme de fonction la plus appropriée pour l'ensemble des propriétés. Cela se traduit par les coefficients de détermination les plus élevées  $R^2$ . Ainsi, la fonction polynomiale de 3e ordre sera appliquée dans la suite de l'étude pour modéliser les différentes propriétés étudiées.

En raison de l'interaction non linéaire entre les multiples propriétés d'une discontinuité et les différents facteurs de perte acoustiques et électriques, il est essentiel de combiner les données

de manière appropriée en utilisant des modèles de combinaison complexes. Ceci nous permettra de créer des modèles de prédiction des propriétés de la discontinuité, qui prennent en compte les facteurs de perte retenus. Dans ce qui suit, nous allons créer ces modèles de prédiction en utilisant des techniques telles que la régression multiple non linéaire pour les modèles statistiques et les réseaux de neurones pour les techniques d'apprentissage automatique.

### 4.3. Combinaison des données

La combinaison de données fait référence au processus de combinaison ou d'intégration de données provenant de sources multiples. Dans notre étude, nous utilisons des techniques d'analyse statistique multivariable (régression multiple non linéaire) et d'apprentissage automatique (réseaux de neurones artificiels) pour générer des modèles de prédiction des propriétés de la discontinuité à partir de variables d'entrée, nos observables (facteurs de perte acoustique et électrique). Ensuite, les résultats des deux approches seront comparés. Bien qu'il existe de nombreuses autres techniques pour combiner des données, la méthode appropriée dépend des objectifs spécifiques de l'analyse et de la nature des données à combiner. Il est important de choisir soigneusement la meilleure approche pour s'assurer que l'ensemble de données résultant est précis et utile (Kleinbaum et Klein, 2010 ; James et al., 2013).

- **Paramètres d'évaluation**

Pour évaluer un modèle de prédiction issu d'une régression multiple ou d'un réseau de neurones, il est essentiel d'avoir des données de formation et de données de validation afin de confronter les prédictions issues des modèles construits. Nous avons sélectionné aléatoirement 30% de notre base de données pour la validation, tandis que le reste a été utilisé pour construire les modèles (620 cas pour la formation et 260 cas pour la validation) (Yagiz et al., 2009). En fin de compte, pour évaluer un modèle de prédiction, plusieurs indicateurs peuvent être utilisés. Nous retenons les classiques :

- La racine de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error, RMSE) : elle traduit l'écart entre l'estimation et le résultat.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}} \quad \text{Éq 4-3}$$

- Le coefficient de détermination  $R^2$  (Éq 4-2) : il traduit le degré de concordance entre les familles de données estimées et connues.

### 4.3.1. Régression multiple non linéaire

#### 4.3.1.1. Présentation

Il s'agit d'un modèle statistique utilisé pour identifier les relations entre plusieurs variables. La régression multiple non linéaire (RMNL) est particulièrement utile, car elle est capable de traiter des relations complexes et non linéaires entre les variables, elle présente un grand potentiel pour la création de modèles prédictifs (Huang et He, 2022 ; Yang et al., 2013 ; Yagiz et al., 2009). L'interaction complexe entre les variables d'entrées et de sorties présentées dans la section 4.2 justifie le choix de la régression multiple non linéaire. Les modèles prédictifs sont gouvernés par un type de fonction polynomiale.

Dans notre étude, la régression multiple non linéaire a été utilisée pour identifier des relations entre les réponses des deux outils diagraphiques (FWS et DN) face à une discontinuité (par les facteurs de perte) et les paramètres de la discontinuité. Le travail de régression est réalisé à l'aide de XLStat. Le logiciel estime les paramètres du modèle (algorithme de Levenberg - Marquardt) selon des critères optimaux par la méthode des moindres carrés. L'équation de régression est déterminée tout en minimisant les écarts au carré entre les points modélisés ( $Y$ ) et la moyenne des valeurs de la variable dépendante ( $\bar{Y}$ ) afin de s'ajuster aux données issues des modélisations (Kleinbaum et Klein, 2010).

$$\text{Écart total} = (Y - \bar{Y}) \quad \text{Éq 4-5}$$

#### 4.3.1.2. Résultats et discussion

- **Les équations générées par la régression multiple non linéaire**

En nous basant sur l'étude de la forme de régression (section 4.2.4), nous avons identifié une relation de type polynomiale de degré 3 pour lier chaque observable aux propriétés de la

discontinuité. Dans le cas de régression multiple, nous considérons donc cette forme de régression a priori, que nous qualifions par une étude statistique.

Le Tableau 4 - 10 : Valeurs de  $R^2$  et  $RMSE$  de formation et de validation pour trois modèles polynomiaux de prédiction pour les différentes propriétés géométrique, mécanique et électrique d'une discontinuité remplie. présente les valeurs de  $R^2$  et de  $RMSE$  de formation et de validation pour trois modèles polynomiaux de prédiction pour les différentes propriétés géométrique, mécanique et électrique d'une discontinuité remplie. Notons que l'objectif est de maximiser la valeur de  $R^2$  et de minimiser celle de  $RMSE$ . Lors de l'analyse des quatre premiers modèles de prédiction (pour  $e ; L ; VP/VP_F ; VS/VS_F$ ), une différence moyenne d'environ 15% a été observée pour les valeurs de  $R^2$  et de  $RMSE$  entre les modèles de degré 2 et 3. Par exemple, pour le modèle de prédiction de  $e$ , les données de formation ont montré que le  $RMSE$  diminue de 0.52 à 0.35 et que le  $R^2$  augmente de 0.67 à 0.78 pour le modèle de degré 3 par rapport au modèle de degré 2. De même, les données de validation ont montré que le  $RMSE$  diminue de 0.58 à 0.55 et que le  $R^2$  augmente de 0.76 à 0.78 pour le modèle de degré 3 par rapport au modèle de degré 2. Cependant, les valeurs pour les modèles de degré 3 et 4 sont très proches. Par exemple, pour le modèle de prédiction de  $e$  les données de formation ont montré que le  $RMSE$  diminue de 0.35 à 0.32 et que le  $R^2$  augmente de 0.78 à 0.79 pour le modèle de degré 4 par rapport au modèle de degré 3. De même, les données de validation ont montré que le  $RMSE$  diminue de 0.66 à 0.58 et que le  $R^2$  augmente de 0.66 à 0.76 pour le modèle de degré 3 par rapport au modèle de degré 2. Ainsi, afin de diminuer la taille des équations de prédictions, nous avons choisi d'utiliser les modèles de degré 3 pour la prédiction de ( $e ; L ; VP/VP_F ; VS/VS_F$ ). Ces modèles présentent une différence significative en termes de  $R^2$  et de  $RMSE$  par rapport aux modèles de degré 2, tout en restant proches des modèles de degré 4.

Pour prédire le rapport  $\rho/\rho_F$  et du  $C_{(RM/DF)}$ , nous avons constaté que le modèle polynomial de degré 4 est plus approprié qu'un modèle de degré 3. En ce qui concerne la prédiction de la masse volumique, un modèle de degré 4 améliore le coefficient de régression d'environ 20% (pour les données de formation, le  $R^2$  augmente de 0.47 à 0.55 et pour les données de validation, le  $R^2$  augmente de 0.4 à 0.5). En ce qui concerne le contraste de résistivité, un modèle de degré 4 améliore d'environ 25% la moyenne des carrés des erreurs (pour les données de formation, le  $RMSE$  diminue de 52 à 41 et pour les données de validation, le  $RMSE$  diminue de 59 à 43).

Il convient de souligner que pour tous les modèles choisis, le coefficient de détermination  $R^2$  est supérieur à 0.5. De plus, nous avons constaté que l'outil de prédiction utilisé (régression multiple non linéaire) est plus adapté aux paramètres ( $e$  et  $VP/VP_F$ ) qu'aux autres paramètres (avec un  $R^2$  plus élevé et un RMSE plus bas). Par conséquent, le Tableau 4 - 10 montre également que les valeurs du RMSE pour la prédiction de  $C_{(RM/DF)}$  et de  $L$  sont relativement importantes par rapport à la moyenne des valeurs employées dans la base de données (Tableau 4 - 1). En effet, le RMSE est d'environ 40% pour la prédiction de  $C_{(RM/DF)}$  (RMSE formation égale à 41 pour un  $C_{(RM/DF)}$  moyen égal à 98.4) et d'environ 33% pour la prédiction de  $L$  (RMSE formation égal à 34.8 pour un  $L$  moyen égal à 101.4), tandis que le RMSE est inférieur à 10% de la moyenne des autres paramètres de la discontinuité.

Tableau 4 - 10 : Valeurs de  $R^2$  et RMSE de formation et de validation pour trois modèles polynomiaux de prédiction pour les différentes propriétés géométrique, mécanique et électrique d'une discontinuité remplie.

| Variable de sortie | Degré 2        |                 |                 |                  | Degré 3        |                 |                 |                  | Degré 4        |                 |                 |                  |
|--------------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|
|                    | RMSE Formation | RMSE Validation | $R^2$ Formation | $R^2$ Validation | RMSE Formation | RMSE Validation | $R^2$ Formation | $R^2$ Validation | RMSE Formation | RMSE Validation | $R^2$ Formation | $R^2$ Validation |
| $e$                | 0.52           | 0.66            | 0.67            | 0.66             | 0.35           | 0.58            | 0.78            | 0.76             | 0.33           | 0.55            | 0.79            | 0.78             |
| $L$                | 35.3           | 35.8            | 0.78            | 0.76             | 34.8           | 35.0            | 0.80            | 0.79             | 33.1           | 32.6            | 0.82            | 0.82             |
| $VP/VP_F$          | 0.24           | 0.26            | 0.86            | 0.82             | 0.23           | 0.24            | 0.88            | 0.82             | 0.23           | 0.23            | 0.87            | 0.8              |
| $VS/VS_F$          | 0.41           | 0.42            | 0.60            | 0.59             | 0.39           | 0.41            | 0.65            | 0.61             | 0.39           | 0.41            | 0.66            | 0.62             |
| $\rho/\rho_F$      | 0.27           | 0.18            | 0.40            | 0.35             | 0.19           | 0.2             | 0.47            | 0.40             | 0.18           | 0.19            | 0.55            | 0.50             |
| $C_{(RM/DF)}$      | 58             | 70              | 0.72            | 0.70             | 52             | 59              | 0.82            | 0.80             | 41             | 43              | 0.89            | 0.86             |

Les équations de prédiction générées par la régression multiple non linéaire pour les différentes propriétés de la discontinuité remplie sont présentées dans le Tableau 4 - 11

Tableau 4 - 11 : Équations générées par la régression multiple non linéaire pour les différentes propriétés de la discontinuité remplie.

| Variable de Sortie | Equations   |         |
|--------------------|---|---------|
| $e$                | $= 19.95 + 1.88 \frac{VV_{P1}}{R_V} - 44.27 R_{VV_P} - 0.28 \gamma'_{P1} + 0.65 VV_{S1} - 3.49 R_{VV_S} + 0.10 \gamma'_{S1} - 0.032 V r_{M8} - 0.28 \left( \frac{VV_{P1}}{R_V} \right)^2 + 37.01 R_{VV_P}^2 - 0.01 \gamma'_{P1}{}^2 - 0.03 VV_{S1}^2 - 0.78 R_{VV_S}^2 - 0.05 \gamma'_{S1}{}^2 + 0.008 V r_{M8}^2 + 0.01 \left( \frac{VV_{P1}}{R_V} \right)^3 - 9.98 R_{VV_P}^3 + 0.003 \gamma'_{P1}{}^3 + 0.0005 VV_{S1}^3 + 0.74 R_{VV_S}^3 + 0.003 \gamma'_{S1}{}^3 - 5.39 \cdot 10^{-6} V r_{M8}^3$   | Éq 4-6  |
| $L$                | $= 333.65 + 8.93 VV_{P1} - 766.33 R_{VV_P} + 22.82 \frac{\gamma'_{P1}}{Z_P} - 5.05 VV_{S1} - 58.32 R_{\gamma'_{S1}} + 11.21 \frac{\gamma'_{S1}}{Z_S} - 0.71 V r_{M8} + 48.95 R_{Vr} - 0.81 VV_{P1}^2 + 658.41 R_{VV_P}^2 - 1.87 \frac{\gamma'_{P1}{}^2}{Z_P} + 0.14 VV_{S1}^2 + 6.15 R_{\gamma'_{S1}}^2 + 1.91 \frac{\gamma'_{S1}{}^2}{Z_S} + 0.01 V r_{M8}^2 + 253.94 R_{Vr}^2 + 0.02 VV_{P1}^3 - 186.82 R_{VV_P}^3 - 0.41 \frac{\gamma'_{P1}{}^3}{Z_P} - 0.003 VV_{S1}^3 + 0.21 R_{\gamma'_{S1}}^3 - 0.15 \frac{\gamma'_{S1}{}^3}{Z_S} + 0.0004 V r_{M8}^3 - 412.17 R_{Vr}^3$ | Éq 4-7  |
| $VP/VP_F$          | $= 2.73 + 0.18 VV_{P1} + 0.039 \gamma'_{P1} - 0.21 VV_{S1} - 0.013 VV_{P1}^2 + 0.007 \gamma'_{P1}{}^2 + 0.013 VV_{S1}^2 + 0.0005 VV_{P1}^3 - 6.99 \cdot 10^{-5} \gamma'_{P1}{}^3 - 0.0003 VV_{S1}^3$  | Éq 4-8  |
| $VS/VS_F$          | $= 4.67 - 0.02 VV_{P1} - 0.24 \frac{VV_{S1}}{R_V} + 0.1 \gamma'_{S1} - 0.009 VV_{P1}^2 + 0.05 \left( \frac{VV_{S1}}{R_V} \right)^2 - 0.03 \gamma'_{S1}{}^2 + 0.0003 VV_{P1}^3 - 0.0013 \left( \frac{VV_{S1}}{R_V} \right)^2 + 0.002 \gamma'_{S1}{}^3$   | Éq 4-9  |
| $\rho/\rho_F$      | $= 1.74 + 0.03 \gamma'_{P1} - 0.01 \gamma'_{S1} - 0.001 \gamma'_{P1}{}^2 - 0.01 \gamma'_{S1}{}^2 + 0.001 \gamma'_{P1}{}^3 + 0.001 \gamma'_{S1}{}^3 + 0.0001 \gamma'_{P1}{}^4 - 4.49 \cdot 10^{-5} \gamma'_{S1}{}^4$   | Éq 4-10 |
| $C_{(RM/DF)}$      | $= -31.912 - 11.36 V r_{M32} + 372.60 R_{Vr2} + 0.475 V r_{32}^2 + 1983.5 R_{Vr2}^2 - 0.01 V r_{M32}^3 - 2898.7 R_{Vr2}^3 + 0.0001 V r_{M32}^4 + 4220.34 R_{Vr2}^4$   | Éq 4-11 |

La Figure 4 - 4 présente graphiquement les régressions en comparant pour des valeurs de propriétés de discontinuité, les valeurs prédites par les régressions du Tableau 4 - 11.



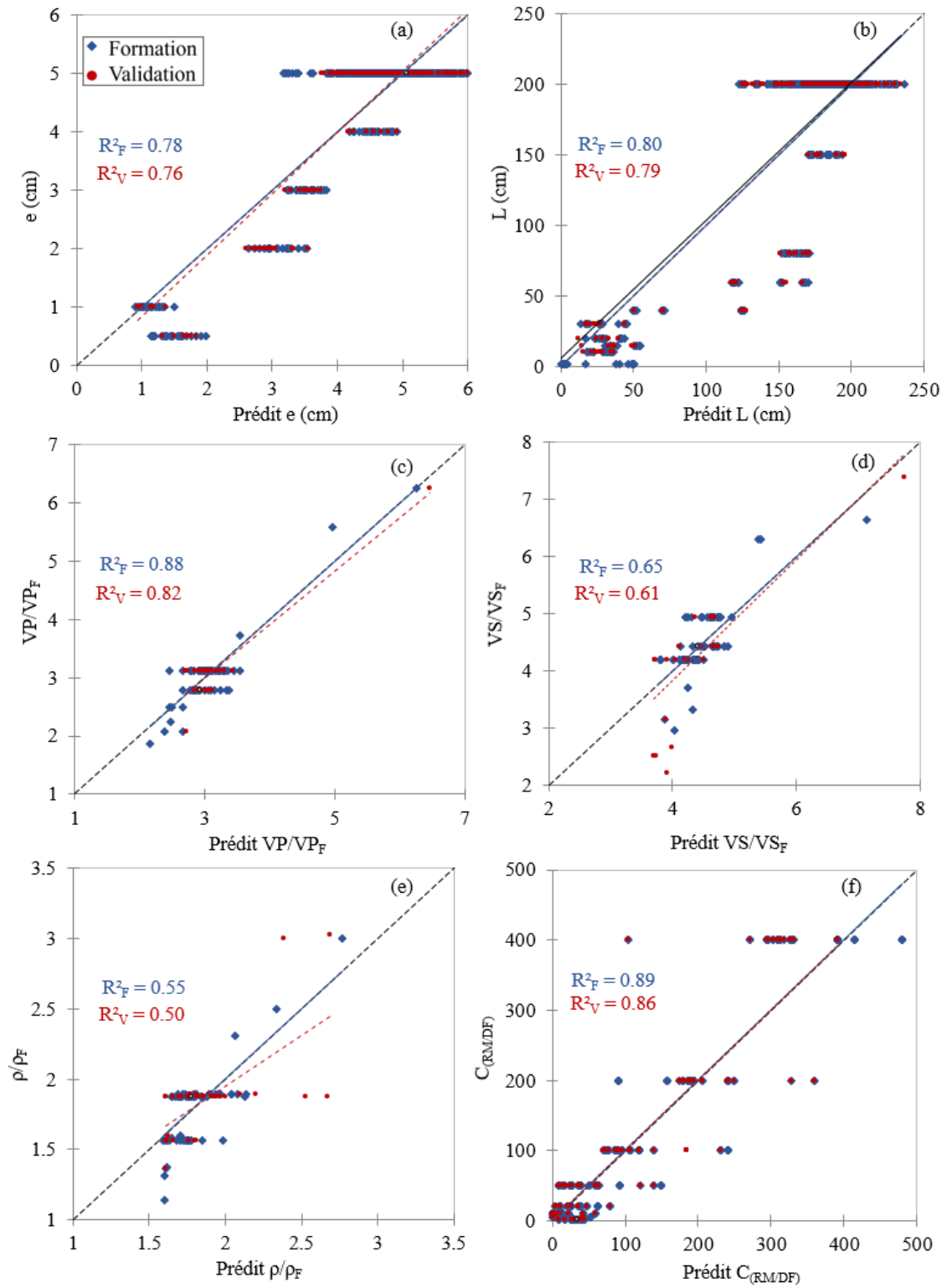


Figure 4 - 4 : Comparaison entre les valeurs de la base de données et les valeurs prédites par les modèles de prédiction pour les différentes propriétés d'une discontinuité remplie.

Les valeurs de RMSE et de  $R^2$  présentées dans le Tableau 4 - 10, constituent une première étape pour quantifier et évaluer le potentiel des modèles de prédiction générés par l'outil de

régression multiple non linéaire. Comme le montre le tableau, les coefficients de détermination des six modèles de prédiction sont supérieurs à 0.5 pour les données de formation et de validation. Cependant, malgré des coefficients de détermination satisfaisants, certains modèles de prédiction ne s'ajustent pas correctement aux équations de régression, comme les montres la Figure 4 - 4. Si on considère que l'étalement des valeurs prédites (quel que soit le paramètre) pour une valeur donnée de ce paramètre peut être un moyen d'exprimer l'incertitude, alors on constate, sur les Figure 4 - 4 a, b, d, e et f, que l'incertitude n'est pas constante pour toutes les valeurs, et que certains modèles de prédiction ( $e$  ;  $L$  ;  $VS/VS_F$  ;  $\rho/\rho_F$  ;  $C_{(RM/DF)}$ ) présentent des faiblesses importantes pour les données de formation et de validation. Par exemple, pour le modèle de prédiction de l'ouverture, nous avons constaté que l'incertitude pour prédire une ouverture de 0.5 cm est de +/- 0.75 cm tandis que pour prédire une ouverture de 5 cm, l'incertitude est de l'ordre de +/-1.5 cm. Concernant la propriété  $VP/VP_F$ , nos résultats montrent une faible incertitude de prédiction, avec des valeurs de bases de données de validation et de formation qui sont presque identiques aux valeurs prédites (Figure 4 - 4c). Par exemple, pour une valeur de  $VP/VP_F$  égale à 3, l'incertitude est inférieure à 1. En revanche, pour la prédiction de la propriété  $C_{(RM/DF)}$ , nous avons constaté que l'incertitude augmente avec l'augmentation de  $C_{(RM/DF)}$  (Figure 4 - 4f). Ainsi, pour un  $C_{(RM/DF)}$  égal à 10, l'incertitude est d'environ 70, tandis que pour un  $C_{(RM/DF)}$  égal à 200, l'incertitude est d'environ 300.

Étant donné la nature complexe et variée des discontinuités dans les structures géologiques, il est important d'utiliser des outils d'analyse efficaces pour en évaluer les propriétés. L'outil de régression multiple non linéaire (RMNL) s'est avéré être un choix prometteur dans cette perspective, permettant une évaluation variable des propriétés des discontinuités en fonction des intervalles de valeurs des différentes propriétés. Cependant, il est également important de comparer les résultats obtenus avec d'autres techniques couramment utilisées dans ce domaine. C'est pourquoi nous avons choisi de confronter les résultats du RMNL à ceux des réseaux neuronaux artificiels (RNA), une technique de plus en plus populaire dans l'analyse de ce type de données.

## 4.3.2. Réseaux de neurones artificiels

### 4.3.2.1. Présentation

Les réseaux neuronaux artificiels (RNA) sont l'une des techniques d'apprentissage automatique les plus populaires pour combiner des données provenant de sources multiples. Il s'agit des modèles mathématiques non linéaires de type « boîte noire ». Leur principe est inspiré des réseaux de neurones biologiques. Cette technique présente la capacité d'approcher un phénomène à partir des couples entrées-sorties enregistrés sur un système. Ils sont composés de "neurones" interconnectés qui peuvent traiter et transmettre des informations, et ils sont capables d'apprendre et de s'adapter au fil du temps en ajustant le poids des connexions entre les neurones (Yagiz et al. 2009 ; Chenhao, 2018 ; Kimura et al., 2019).

Les modèles de réseau neuronal artificiel (RNA) sont composés de trois couches, à savoir une couche d'entrée (observables ou facteurs de perte), une couche cachée, et une couche de sortie (différentes propriétés des discontinuités :  $e$ ,  $L$ ,  $\rho_F$ ,  $VP_F$ , ;  $VS_F$  ;  $C_{(RM/DF)}$ ). Il est à noter que la couche cachée peut souvent contenir plusieurs couches dans le cadre d'une approche d'apprentissage profond. Les réseaux neuronaux à entrées multiples et sorties multiples (EMSM) constituent un type de RNA capable de traiter plusieurs entrées et de prédire plusieurs sorties. Cette approche est particulièrement adaptée à notre étude, car les réseaux neuronaux EMSM ont l'avantage de pouvoir apprendre des relations complexes entre plusieurs variables d'entrée et de sortie. Ils sont ainsi capables de fournir des prévisions plus précises et fiables pour les différentes propriétés des discontinuités étudiées dans notre recherche.

Le schéma fonctionnel de base d'un neurone artificiel est représenté par la Figure 4 - 5. Un neurone formel représente la somme pondérée d'un ensemble d'entrées  $x_1, x_2, \dots, x_n$  plus un biais propre au neurone  $b_k$ . De plus,  $y_k$  représente la sortie de ce neurone, il est déterminé par l'application d'une fonction d'activation  $\phi$  sur la somme pondérée ( $w_{ki}$  correspond au poids synaptique) (Yagiz et al. 2009 ; Chenhao, 2018 ; Kimura et al., 2019).

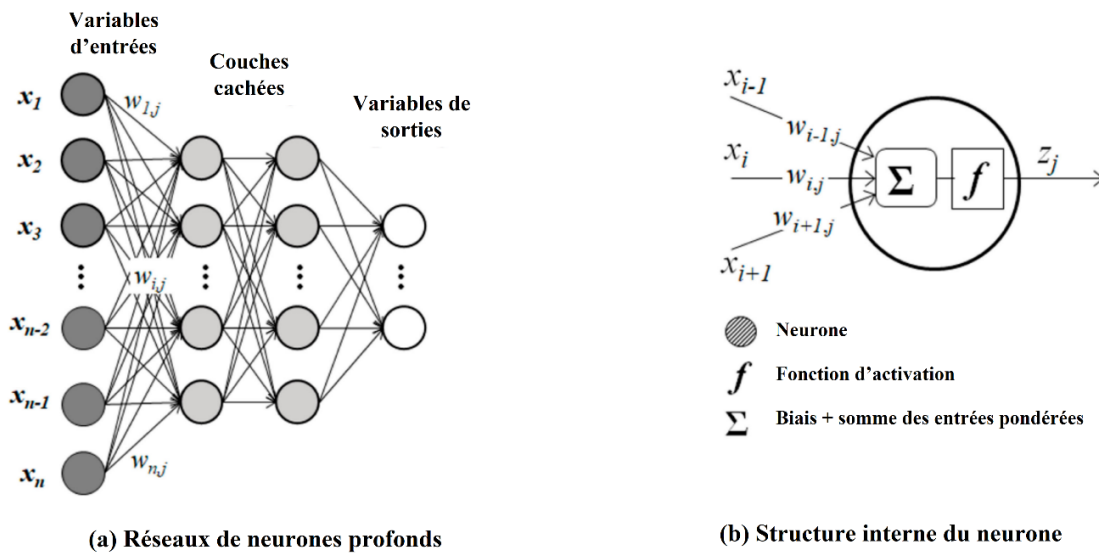


Figure 4 - 5 : Schéma fonctionnel d'un neurone artificiel (multi-entrées multi-sorties).

La sortie  $y_k$  est déterminée en se basant sur l'équation suivante :

$$y_k = \varphi\left(\sum_{i=1}^n x_i w_{ki} + b_k\right) \quad \text{Éq 4-13}$$

Les sorties de chaque couche cachée sont transformées par la fonction d'activation pour tenir compte de la non-linéarité. On distingue la présence de plusieurs formes pour la fonction d'activation désirée (binaire, relu, sigmoïde, linéaire, etc.). Le choix du type de cette fonction dépend du type de sortie. Dans notre modèle on a appliqué la fonction de Relu pour calculer les variables de sorties. Il est connu qu'elle converge plus vite que les autres fonctions.

$$y = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{Éq 4-14}$$

L'une des principales techniques utilisées pour former les réseaux neuronaux EMSM est la rétropropagation (*back-propagation algorithm*). Elle consiste à utiliser un algorithme pour ajuster les poids et les biais des connexions entre les neurones afin de minimiser l'erreur entre la sortie prédite du réseau et la sortie réelle souhaitée. Pour ce faire, l'erreur est propagée à travers le réseau et utilisée pour mettre à jour les poids et les biais dans un processus itératif. Elle est normalement utilisée par les algorithmes d'optimisation par descente de gradient (notamment l'optimiseur Adam a été utilisé dans cette étude : il est souvent recommandé comme optimiseur par défaut : Annexe 3 D) pour régler les paramètres

du modèle. Le gradient de la fonction de perte est calculé et ensuite distribué en arrière à travers l'ensemble du réseau (Chenhao, 2018).

La fonction de la perte utilisée est racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) des prédictions plus le poids de chaque neurone régularisé (Éq 3-14).  $k$  est le paramètre de régularisation.

$$\text{Perte} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}} + \frac{1}{2} k \sum_{i=1}^n w_i^2 \quad \text{Éq 4-14}$$

Pour former un réseau neuronal EMSM, il faut définir l'architecture du réseau, notamment le nombre de couches cachées et le nombre de neurone dans chaque couche. La couche cachée étant l'élément le plus crucial du réseau. Le nombre de neurone dans la couche cachée a été sélectionné selon la suggestion du Hecht-Nielsen (1987) [ $\leq 2N_i + 1$ ]. Ce type particulier de structure signifie que l'RNA a un total de trois couches, avec 18 neurones dans la couche d'entrée (déterminées dans la section 4.2.2), une couche cachée avec 36 neurones, suivie de 6 neurones dans la couche de sortie. Divers auteurs (Hecht-Nielsen, 1987 ; Baheer, 2000 ; Yagiz et al. 2009) ont souligné qu'une couche cachée peut être suffisante pour résoudre la plupart des problèmes. Par conséquent, dans cette étude, une couche cachée a été sélectionnée. Le code de réseaux de neurones a été codé sous Python tout en utilisant la bibliothèque TensorFlow. Le code du réseau neuronal EMSM est affiché en (Annexe 3 D)

En particulier, un phénomène tel que le surajustement doit être reconnu et évité afin de créer un réseau fiable. Le surajustement se produit lorsqu'un modèle est trop bien entraîné sur les données de formation, ce qui entraîne des performances médiocres au niveau des données de validation. Une façon de détecter le surajustement est de tracer la perte d'apprentissage et la perte de validation en fonction du nombre d'itération d'apprentissage. Si la perte d'apprentissage continue de diminuer alors que la perte de validation plafonne ou augmente, cela indique clairement un surajustement. Une itération représente le passage en avant/en arrière (*forward/backward*) du processus d'apprentissage.

La Figure 4 - 6 représente la perte d'apprentissage de validation qui diminue et converge au cours des itérations pour la prédiction de l'ouverture de la discontinuité. Ce qui implique que notre modèle n'est pas sur-ajusté. Les courbes de convergence pour les autres propriétés de la discontinuité sont présentées dans l'Annexe 3 D.

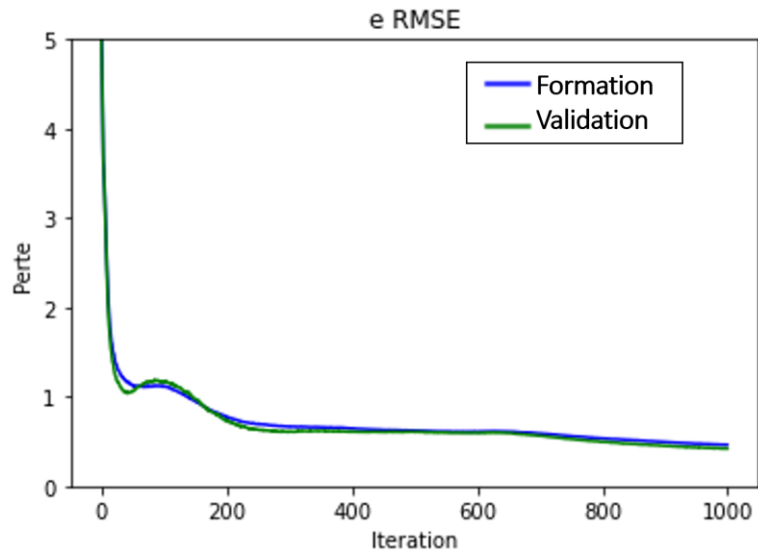


Figure 4 - 6 : (RMSE) du réseau en fonction du nombre d'itération pour la prédiction de l'ouverture de la discontinuité.

#### 4.3.2.2. Résultats et discussion

La Figure 4 - 7 représente les résultats prédits issus du modèle de réseaux de neurones en fonction de vraies valeurs des différentes propriétés de la discontinuité remplie simulées.

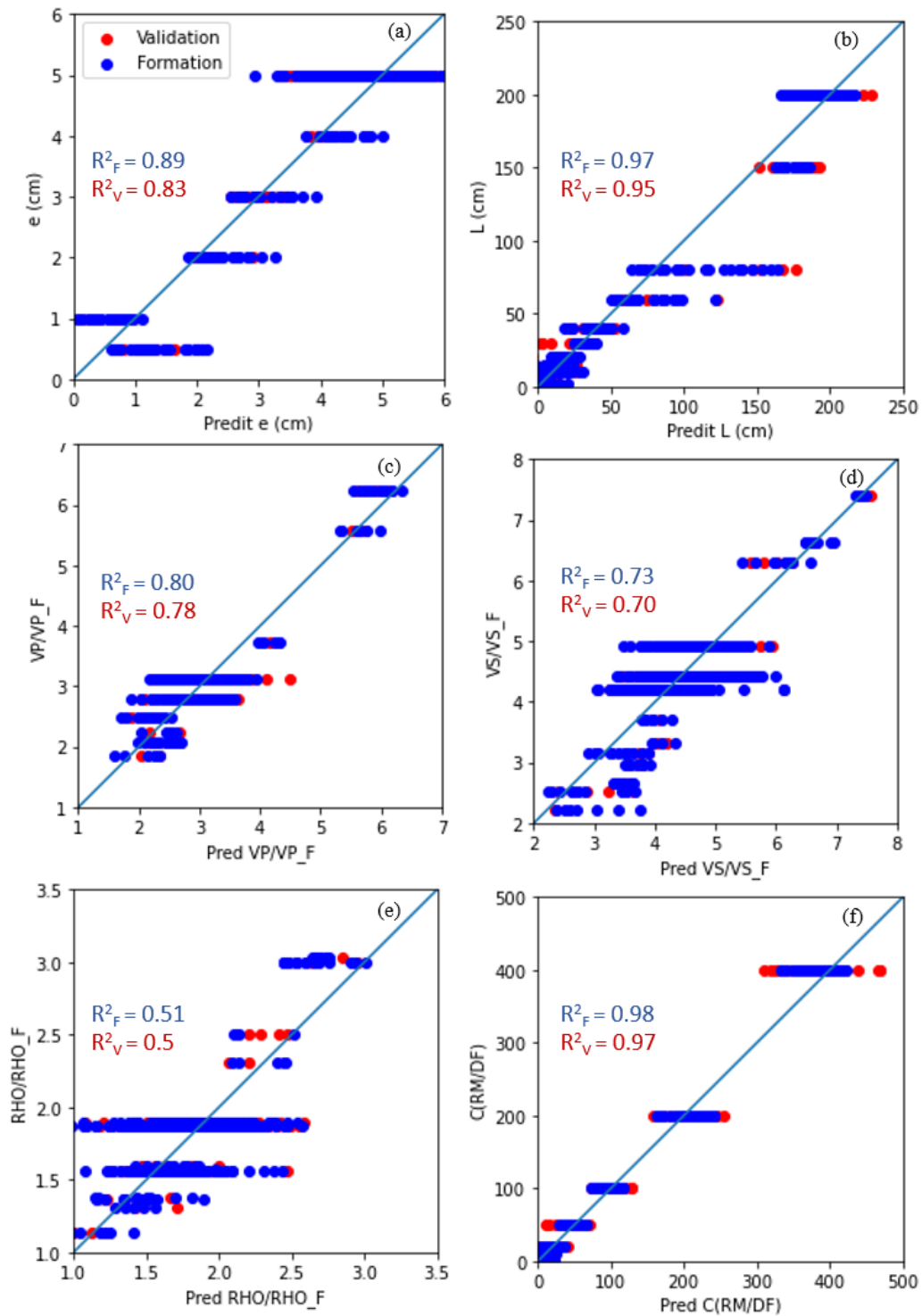


Figure 4 - 7 : Comparaison entre les valeurs de la base de données et les valeurs prédites par le modèle de prédiction par RNA pour les différentes propriétés d'une discontinuité remplie.

La Figure 4 - 7 révèle que le modèle de prédiction RNA fournit des résultats de prédiction satisfaisants pour la plupart des valeurs des propriétés avec un coefficient de détermination  $R^2$  acceptable dépassant 0,5 pour l'ensemble des données de formation et de validation.

Bien que certaines valeurs de ces propriétés ( $e; L; VS/VS_F; \rho/\rho_F$ ) présentent des incertitudes variables, le modèle de prédiction RNA affiche de bonne performance.

### 4.3.3. Comparaison et discussion

La régression multiple non linéaire et les réseaux neuronaux EMSM sont deux approches différentes de la modélisation et de la prédiction, chacune ayant ses propres forces et limites. La performance des modèles développés est résumée dans le Tableau 4 - 12. On constate qu'au niveau de la prédiction de  $e$ ,  $L$ ,  $VS/VS_F$  et  $C_{(RM/DF)}$ , le modèle RNA présente les meilleures prédictions. Le coefficient de détermination  $R^2$  est plus important au niveau de données de formations validations (pour  $e = 0.89$ ; pour  $L = 0.97$ ; pour  $VS/VS_F = 0.73$  et pour  $C_{(RM/DF)} = 0.98$ ) et de validations (pour  $e = 0.83$ ; pour  $L = 0.95$ ; pour  $VS/VS_F = 0.7$  et pour  $C_{(RM/DF)} = 0.97$ ), avec un RMSE les plus minimes. Tandis que pour la prédiction de  $VP/VP_F$  et de  $\rho/\rho_F$ , le modèle RMNL est le plus pertinent.  $R^2$  de formation (pour  $VP/VP_F = 0.88$ ; pour  $\rho/\rho_F = 0.55$ ) et de validation (pour  $VP/VP_F = 0.82$ ; pour  $\rho/\rho_F = 0.51$ ) les plus élevées.

Tableau 4 - 12 : Comparaison entre les deux modèles de prédiction RMNL et RNA au niveau de  $R^2$  et RMSE de formation et de validation.

|       |               | RMNL      |            | RNA(EMSM) |            |
|-------|---------------|-----------|------------|-----------|------------|
|       |               | Formation | Validation | Formation | Validation |
| $R^2$ | $e$           | 0.78      | 0.76       | 0.89      | 0.83       |
|       | $L$           | 0.80      | 0.79       | 0.97      | 0.95       |
|       | $VP/VP_F$     | 0.88      | 0.82       | 0.80      | 0.78       |
|       | $VS/VS_F$     | 0.65      | 0.61       | 0.73      | 0.7        |
|       | $\rho/\rho_F$ | 0.55      | 0.50       | 0.51      | 0.5        |
|       | $C_{(RM/DF)}$ | 0.89      | 0.86       | 0.98      | 0.97       |
| RMSE  | $e$           | 0.35      | 0.58       | 0.36      | 0.46       |
|       | $L$           | 34        | 35         | 12        | 16         |
|       | $VP/VP_F$     | 0.23      | 0.24       | 0.32      | 0.34       |
|       | $VS/VS_F$     | 0.39      | 0.41       | 0.35      | 0.36       |
|       | $\rho/\rho_F$ | 0.18      | 0.19       | 0.24      | 0.25       |
|       | $C_{(RM/DF)}$ | 41        | 43         | 11.4      | 20.4       |



À partir des données présentées dans les Figure 4 - 4 et Figure 4 - 7, il a été observé que les performances des modèles ne sont pas uniformes pour toutes les plages de valeurs de différentes propriétés de la discontinuité. Dans cette étude, une comparaison entre la méthode statistique (RMNL) et l'apprentissage (RNA) a été menée pour prédire les propriétés d'une discontinuité dans un massif rocheux. Les performances des deux outils ont été évaluées pour des plages distinctes de propriétés de la discontinuité en utilisant l'équation 4-12 et les résidus d'erreur. Les résidus d'erreur ont été définis comme la différence moyenne entre les valeurs réelles et les valeurs prédites par les modèles de prédiction. Cette approche a permis d'identifier les plages où les modèles ont les meilleures performances et celles où ils sont moins adaptés. Les plages pour les différentes propriétés de la discontinuité ont été déterminées visuellement en fonction des marges d'incertitude présentées dans les Figure 4 - 4 et Figure 4 - 7.

$$E (\%) = 100 \frac{pr_{vrai} - pr_{prédit}}{pr_{vrai}} \quad \text{Éq 4-12}$$

Où  $pr_{vrai}$  représente la vraie valeur de la propriété issue des modélisations et  $pr_{prédit}$  est la valeur prédite de la propriété calculée par les modèles de prédictions développés.

Le Tableau 4 - 13 synthétise les résultats de l'erreur moyenne et du résidu moyen des modèles de prédiction RMNL et RNA, pour différentes propriétés d'une discontinuité remplie, à travers différents intervalles de valeurs.

Tableau 4 - 13 : Erreur moyenne et résidu moyen des modèles de prédiction RMNL et RNA, pour différents intervalles pour les différentes propriétés d'une discontinuité remplie.

| Variable de sortie | Intervalle                   | RMNL         |               | RNA          |               |
|--------------------|------------------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
|                    |                              | Erreur (Moy) | Résidus (Moy) | Erreur (Moy) | Résidus (Moy) |
| $e$                | $e \leq 1$ cm                | 65 %         | 0.35 cm       | 35 %         | 0.1 cm        |
|                    | $1 \text{ cm} < e < 5$ cm    | 20 %         | 0.6 cm        | 17 %         | 0.3 cm        |
|                    | $e = 5$ cm                   | 3 %          | 1 cm          | 2.5 %        | 0.7 cm        |
| $L$                | $L \leq 50$ cm               | 10 %         | 9 cm          | 4 %          | 2 cm          |
|                    | $50 \text{ cm} < L < 200$ cm | 85 %         | 64 cm         | 15 %         | 20 cm         |
|                    | $L = 200$ cm                 | 6 %          | 10 cm         | 4 %          | 5 cm          |
| $Vp/Vp_F$          | $1 < Vp/Vp_F < 7$            | 7%           | 0.2           | 8%           | 0.3           |
| $VS/VS_F$          | $VS/VS_F < 4$                | 28 %         | 1             | 25 %         | 0.8           |
|                    | $VS/VS_F \geq 4$             | 8 %          | 0.3           | 17 %         | 0.5           |
| $\rho/\rho_F$      | $\rho/\rho_F < 1.5$          | 22 %         | 0.3           | 10 %         | 0.1           |
|                    | $1.5 \leq \rho/\rho_F < 2.5$ | 10 %         | 0.2           | 20 %         | 0.4           |
|                    | $\rho/\rho_F \leq 2.5$       | 8 %          | 0.2           | 10 %         | 0.2           |
| $C_{(RM/DF)}$      | $C_{(RM/DF)} \leq 10$        | 250 %        | 5             | 6 %          | 1             |
|                    | $10 < C_{(RM/DF)} < 100$     | 13 %         | 7             | 6 %          | 2             |
|                    | $C_{(RM/DF)} \geq 100$       | 6 %          | 15            | 6 %          | 10            |

Le Tableau 4 - 13 montre que le modèle RMNL présente une erreur moyenne élevée d'environ 65 % pour les petites fractures à millimètre près ( $e \leq 1$  cm), ce qui indique une faible sensibilité du modèle à ces types de fractures. Cependant, le résidu moyen de 0.35 cm est acceptable en termes de résolution. L'erreur moyenne diminue avec l'augmentation de  $e$ , atteignant environ 20 % pour  $1 \text{ cm} < e < 5$  cm, et environ 3 % pour  $e = 5$  cm. Le résidu moyen augmente pour  $e \leq 1$  cm, mais reste acceptable. En revanche, le modèle RNA présente une erreur moyenne de l'ordre de 35 % pour  $e \leq 1$  cm, montrant également une insensibilité aux petites fractures à millimètre près. Cependant, le résidu moyen du modèle RNA est inférieur à celui du modèle RMNL, d'environ 0.4 cm, ce qui indique une meilleure performance en termes de résolution. De plus, comme pour le modèle RMNL, l'erreur moyenne diminue avec l'augmentation de  $e$ , atteignant environ 17 % pour  $1 \text{ cm} < e < 5$  cm et environ 2.5 % pour  $e = 5$  cm. Le résidu moyen reste acceptable, d'environ 0.7 cm, pour  $e = 5$  cm. En résumé, les résultats de l'étude ont montré que les deux modèles ont un fort potentiel pour évaluer l'ouverture d'une discontinuité d'ordre centimétrique dans un massif rocheux. Les deux modèles ont également montré une faible sensibilité aux discontinuités de petite taille, à l'échelle du millimètre. Le modèle RNA a présenté une meilleure résolution

avec un résidu moyen inférieur pour tous les intervalles de valeurs examinés. Cependant, le modèle RMNL offre des équations de prédiction plus accessibles, ce qui peut être un avantage important pour les applications pratiques.

En comparant les modèles RMNL et RNA pour la prédiction de  $L$ , il est intéressant de noter que les deux modèles ont des performances différentes en fonction de l'intervalle de valeurs de  $L$  considéré. Pour le modèle RMNL, l'erreur moyenne de prédiction de  $L$  est inférieure à 10% pour la plupart des intervalles, mais pour les valeurs comprises entre 50 cm et 200 cm, l'erreur moyenne est élevée, atteignant 85% avec un résidu moyen de 64 cm. En revanche, pour le modèle RNA, l'erreur moyenne est plus élevée pour les valeurs de  $L$  comprises entre 50 cm et 200 cm, atteignant 15% avec un résidu moyen de 20 cm, mais pour les autres intervalles, l'erreur moyenne est inférieure à 5% avec un résidu moyen de 5 cm. Donc, pour la prédiction de  $L$ , le modèle RNA fournit des performances globalement meilleures que le modèle RMNL, avec une erreur moyenne inférieure et un résidu moyen plus faible, en particulier pour les valeurs de  $L$  en dehors de l'intervalle de 50 cm à 200 cm. Bien que l'erreur moyenne pour la prédiction de  $L$  soit importante pour les deux modèles, ils peuvent tout de même être utiles pour distinguer les zones d'endommagement à proximité du trou de forage.

En analysant la prédiction de  $VP/VP_F$  à partir des modèles RMNL et RNA, il semble qu'il n'y ait pas d'influence de la gamme de valeurs considérée. Le modèle RMNL de prédiction présente les meilleurs résultats avec une erreur moyenne de prédiction de 7%, pour toutes les valeurs du modèle. En revanche, le modèle RNA de prédiction présente un écart par rapport à RMNL, avec une erreur moyenne de prédiction de 8%, accompagnée d'un résidu moyen égal à 0.3. Cependant, l'écart entre les deux modèles est relativement faible et les deux modèles peuvent être utiles dans la distinction des zones d'endommagement.

En examinant la prédiction de  $VS/VS_F$ , avec les modèles RMNL et RNA, on constate que les deux modèles présentent des limites dans la prédiction de la vitesse de cisaillement, avec des erreurs moyennes importantes pour des contrastes de vitesse de cisaillement inférieurs à 4. Le modèle RMNL présente une erreur moyenne d'ordre 28% et un résidu moyen d'ordre 1, qui augmente avec la rigidité de la matrice rocheuse pour des contrastes inférieurs à 4, mais diminue pour des contrastes plus grands que 4, avec une erreur d'ordre 8%. Quant au modèle RNA, il présente une erreur moyenne de prédiction de l'ordre de 25% et un résidu moyen égal à 0.8 pour des contrastes de vitesse de cisaillement inférieurs à 4, avec une erreur

moyenne qui diminue avec l'augmentation du contraste, mais reste importante, de l'ordre de 17%. Il est donc nécessaire de poursuivre les études pour améliorer la précision des modèles de prédiction de la vitesse de cisaillement, en particulier pour des contrastes de vitesse de cisaillement plus faibles. D'autres facteurs peuvent également affecter la précision des prédictions et devraient être pris en compte dans les études futures.

En ce qui concerne la prédiction  $\rho/\rho_F$ , le modèle RMNL donne des résultats satisfaisants pour des contrastes de masse volumique supérieurs à 1.5, avec une erreur moyenne inférieure à 10% et un résidu moyen inférieur à 0.3. Cependant, pour des contrastes de masse volumique inférieurs à 1.5, le modèle RMNL présente une faiblesse, avec une erreur moyenne de l'ordre de 22%. En revanche, le modèle RNA présente une faiblesse pour des contrastes de masse volumique compris entre 1.5 et 2.5, avec une erreur moyenne de 20% (résidu moyen de 0.4). Pour les autres intervalles, l'erreur moyenne est acceptable, de l'ordre de 10%. En conclusion, les deux modèles présentent des limites dans la prédiction  $\rho/\rho_F$ , mais le modèle RMNL semble mieux adapté pour les contrastes de masse volumique élevés, tandis que le modèle RNA peut être plus approprié pour les contrastes de masse volumique modérés. Il est donc nécessaire de réaliser des études complémentaires afin d'améliorer la précision des deux modèles pour les faibles contrastes de masse volumique. En outre, il est crucial d'explorer d'autres facteurs pouvant impacter la précision des prédictions.

En ce qui concerne la prédiction de  $C_{(RM/DF)}$ , le modèle de prédiction RMNL présente une faiblesse marquée pour les faibles contrastes de résistivité ( $C_{(RM/DF)} \leq 10$ ), avec une erreur moyenne très élevée d'environ 250% et un résidu moyen faible égal à 5. Cependant, pour des contrastes supérieurs à 10, l'erreur moyenne diminue et atteint environ 15%. En comparaison, le modèle RNA est plus performant, en particulier pour les faibles contrastes de résistivité ( $C_{(RM/DF)} \leq 10$ ), avec une erreur moyenne de prédiction qui diminue pour atteindre 6% et un résidu moyen égal à 1. De plus, pour toutes les valeurs de contraste, l'erreur moyenne et le résidu moyen sont relativement faibles par rapport aux résultats du modèle de prédiction RMNL. En effet, pour tous les contrastes, l'erreur moyenne est inférieure à 10%. Il est donc recommandé de privilégier le modèle RNA pour la prédiction de  $C_{(RM/DF)}$ , en particulier pour les faibles contrastes de résistivité.

En résumé, les deux modèles de prédiction ont montré un potentiel élevé pour prédire les propriétés des discontinuités. Cependant, le modèle RNA est plus performant pour la prédiction de  $C_{(RM/DF)}$ , en particulier pour les faibles contrastes de résistivité, ainsi que pour la prédiction de  $L$  pour des valeurs de  $50 \text{ cm} < L < 200 \text{ cm}$  et pour les faibles ouvertures de discontinuité ( $e \leq 1 \text{ cm}$ ). En revanche, le modèle RMNL est plus performant pour les contrastes de masse volumique supérieurs à 1.5 et pour les contrastes de cisaillement plus grand que 4.

#### 4.4. Conclusion

Le but est d'évaluer les propriétés géométriques, mécaniques, électriques d'une discontinuité idéale et isolée en utilisant de mesures diagraphiques classiques, avec les sondes Fullwave (FWS) et sonde électrique normale (DN). En se basant sur les facteurs de perte acoustique et électrique déterminés au chapitre 3, cette recherche a permis de développer des modèles de prédiction pour ces propriétés en utilisant deux outils de combinaison de données : l'analyse statistique statique (l'outil de régression multiple non linéaire : RMNL) et les techniques d'apprentissage automatique (réseaux de neurones artificiels : RNA).

D'abord, les tests de corrélations ont permis d'identifier les facteurs de perte les plus corrélés à chaque propriété de la discontinuité. Par la suite, ces facteurs ont été employés dans les modèles de prédiction afin de caractériser les propriétés de la discontinuité.

Ce travail met en avant l'importance de combiner les réponses de la méthode diagraphique sonique FWS et de la méthode électrique DN pour caractériser les propriétés géométriques de la discontinuité. Les résultats obtenus permettent une caractérisation au centimètre près des propriétés géométriques ( $e$ ,  $L$ ) des discontinuités, permettant ainsi de distinguer les discontinuités continues des discontinuités non continues.

L'outil RMNL ne prend pas en compte la complémentarité des variables de sortie, mais il a permis de construire des équations de prédiction pour les propriétés géométriques, mécaniques et électriques des discontinuités, qui peuvent être utilisées par les ingénieurs pour évaluer les discontinuités. En outre, le modèle RNA a montré l'importance de prendre en compte la complémentarité entre les paramètres géométriques et électriques pour mieux évaluer le contraste de résistivité et les discontinuités ayant une faible ouverture et une longueur comprise entre 50 et 150 cm. Cependant, en raison de la complexité de leur structure interne, il est difficile d'interpréter, d'expliquer et de comprendre comment le modèle effectue ses prédictions. Nous concluons que les deux modèles de prédiction

développés peuvent être utilisés pour prédire les propriétés des discontinuités. Il est évident que ces modèles de prédiction peuvent être développés ultérieurement. Afin de valider notre approche de travail, nous avons décidé d'utiliser le modèle de prédiction RMNL pour évaluer l'ouverture de la discontinuité dans les forages réels. Nous avons fait ce choix en raison de l'accessibilité de l'équation de prédiction, et du fait que nous cherchons simplement à évaluer l'ouverture et pas nécessairement tous les six paramètres de sortie en même temps. Nous appliquerons donc le modèle RMNL aux données de forage réelles, tel que décrit au chapitre suivant, pour confirmer la validité de notre approche.



## Chapitre 5 : Application en situ et validation

Ce chapitre présente les travaux effectués sur le site de Bells Corner au Canada, où nous avons testé notre méthodologie de travail. Nous avons réalisé des mesures de terrain (sonique : FWS et électrique : DN) dans un forage réel pour confirmer nos paramètres de mesure et étudier la sensibilité des techniques de diagraphies à la présence de discontinuités en nous appuyant sur des relevés d'imagerie optique et acoustique. En outre, nous avons mis en oeuvre la méthodologie définie au chapitre 3 pour déterminer les facteurs de perte acoustique et électrique générés par la présence d'une discontinuité, ce qui a permis de prédire les ouvertures des discontinuités isolées en appliquant notre modèle de prédiction. Bien que cette étude ait démontré le potentiel de notre approche de travail, nous avons également identifié certaines limites concernant son exploitation.

### 5.1. Présentation du site et des mesures

#### 5.1.1. Site de calibration *Bells corners*

##### 5.1.1.1. *Présentation du site d'étude*

À la fin des années 1970 et au début des années 1980, la Commission géologique du Canada (Geological Survey of Canada : GSC) a établi un site pour le développement et la calibration d'instruments et de techniques géophysiques de forage. Ce site est situé à Bells Corners, en Ontario, à 10 km à l'ouest d'Ottawa, sur le terrain du complexe de recherche CANMET du ministère des Ressources naturelles. Le site de calibration Bells Corners comprend deux sites extérieurs distincts : le premier est une série de neuf colonnes en béton pour la calibration du spectromètre gamma en forage et le second est une série de six forages profonds pour la calibration dans le massif rocheux (Figure 5 - 1). Les forages recouvrent différents types de roches avec des propriétés physiques et minéralogiques très variées (Bernius, 1996 ; Crow et al., 2021).



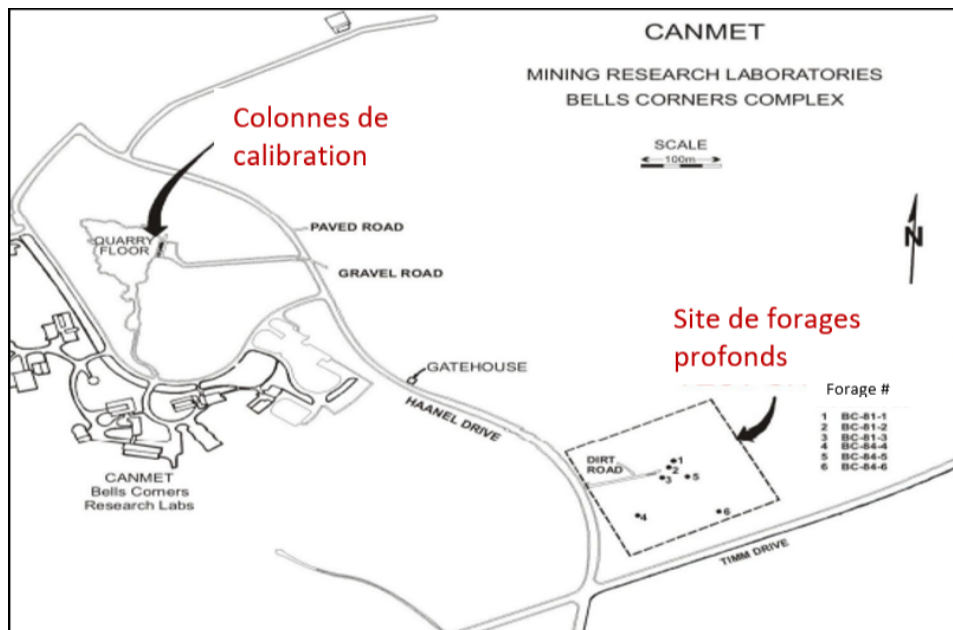


Figure 5 - 1 : Carte montrant l'emplacement des installations de calibration au Bells Corners (adaptée de Mwenifumbo et al., 2005).

Historiquement, le site a joué un rôle important dans le développement des outils de diagraphie géophysique au Canada dans les années 1980 et 1990, lorsque des outils et des techniques de diagraphie ont été développés et appliqués pour l'exploration minérale (Killeen et al., 1984 ; Killeen et al., 1986 ; Schock et al., 1996). Le site Bells Corner représente un lieu où les universités et l'industrie peuvent tester et calibrer leurs instruments par rapport à des ensembles de données de propriétés physiques enregistrées ((Bernius, 1996 ; Mwenifumbo et al., 2005).

En réponse à l'intérêt croissant pour l'accès à Bells Corners et aux ensembles de données de calibrations numériques, la GSC a recueilli un nouvel ensemble de relevés géophysiques à l'aide d'outils modernes pour compléter la suite existante de données géophysiques. De nouvelles images en haute résolution prises à l'aide de sondes optiques et acoustiques fournissent un contexte pour l'étude des conditions hydrogéologiques sur le site et pour des mesures répétées de la température, de la conductivité et du débit des eaux souterraines. Des mesures sur carottes ont également été effectuées en 2019, 2020 et 2022 pour fournir un ensemble élargi de données de calibrations physiques, mécaniques et hydrologiques dans les différents types de roches recoupées par les trous de forage.

- **Site de calibration du massif rocheux**

Six trous verticaux ont été forés par Longyear Canada Inc. en 1981 (BC81-1 à 3) et 1984 (BC84-4 à 6) (Bernius, 1981 ; Killeen et al., 1984). Les trous de forage ont été disposés suivant une configuration triangulaire espacée de 10 m, 20 m, 30 m, 70 m et 100 m (Figure 5 - 2). Les forages 1, 2, 3 et 5 ont été creusés au-dessus d'une dalle en béton de plusieurs mètres d'épaisseur, tandis que les forages 4 et 6 ont été forés directement dans le substratum rocheux. Les carottes sont conservées à Ottawa dans le cadre des collections de matériaux terrestres pour la GSC. Plusieurs relevés diagraphiques ont été faits dans les années 80 et 90 par Bernius (1996) : la diagraphie nucléaire (gamma spectral passif, densité gamma-gamma active, neutrons), électrique (polarisation induite, résistivité, potentiel spontané, induction), diagraphies de fluides (température, résistivité), sonique (FWS) et diamètre du trou de forage.

Après 40 ans d'utilisation, une réparation des forages a été réalisée en 2019. Le gel, et l'affaissement affectent l'intégrité de l'enveloppe de surface métallique. Dans les trous 2, 3, 4, 5 et 6, le tubage métallique de surface a été remplacé et réinstallé dans le massif rocheux. Le forage 3 a été modifié, et son diamètre augmenté de 20 mm pour permettre l'utilisation des outils de plus grand diamètre. Les détails des emplacements, des profondeurs et des diamètres des forages se trouvent dans le Tableau 5 - 1.

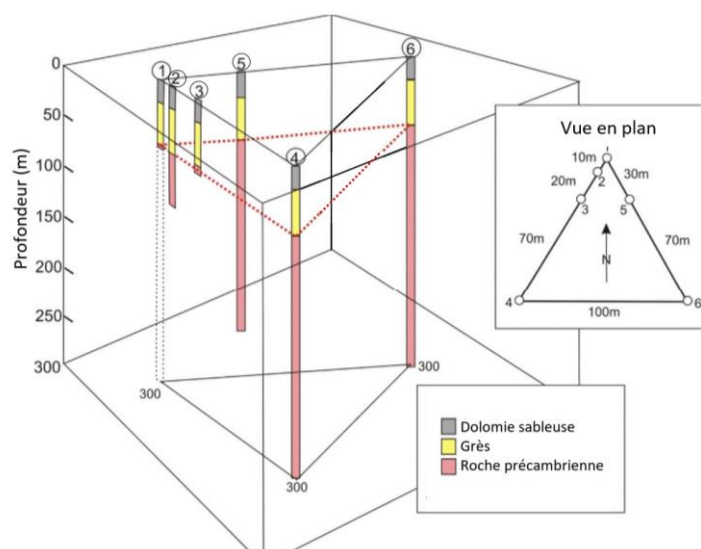


Figure 5 - 2 : Positions et profondeurs des six forages de Bells Corners (adapté de Mwenifumbo et al., 2005).

Tableau 5 - 1 : Coordonnées et élévations des forages basées sur des mesures GPS différentielles enregistrées entre 2019 et 2021. La référence horizontale est NAD83 (The North American Datum of 1983) et la référence verticale pour les élévations (hauteur orthométrique) est CGVD28(HTv2.0) (The Canadian Geodetic Vertical Datum of 1928). sns= sous le niveau de sol (Crow et al., 2021).

| Nom    | Lat      | Long       | Élévation (haut du tubage) (m) | Diamètre du forage (mm) | Profondeur de forage (m sns) | Hauteur de tubage (m) |
|--------|----------|------------|--------------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------|
| BC81-1 | 45.31875 | -75.861179 | 115.45 ± 0.04                  | 76                      | 64                           | 0.23                  |
| BC81-2 | 45.31867 | -75.86123  | 115.74 ± 0.04                  | 76                      | 115                          | 0.87                  |
| BC81-3 | 45.3185  | -75.861336 | 115.3 ± 0.05                   | 96                      | 73                           | 0.54                  |
| BC84-4 | 45.31793 | -75.861694 | 114.77 ± 0.03                  | 76                      | 300                          | 0.85                  |
| BC84-5 | 45.31854 | -75.860965 | 114.71 ± 0.04                  | 76                      | 249                          | 0.84                  |
| BC84-6 | 45.31802 | -75.860453 | 112.67 ± 0.03                  | 76                      | 290                          | 0.53                  |

La première étude géologique scientifique et cartographique de la région de Bells Corners a été réalisée par Wilson et est documentée dans le mémoire 241 de la GSC (Wilson, 1946). Il révèle que, les forages profonds du substrat rocheux traversent les formations sédimentaires de Potsdam et du groupe inférieur de Beekmantown et se terminent par un substrat de roches ignées et métasédimentaires précambriennes très variables de la province de Grenville. Le contact entre le sous-sol précambrien et la roche sédimentaire sus-jacente forme une non-conformité régionale importante s'étendant sur 0,5Ga (Di Prisco et Springer, 1991).

Notons que des mesures ont été effectuées par GSC en laboratoire sur 43 échantillons du forage BC81-2 ont permis de déterminer la masse volumique, la porosité, la vitesse de l'onde de compression et de cisaillement, le module d'Young et de cisaillement et le coefficient de Poisson des échantillons.

Dans le cadre de cette thèse, le travail s'est porté sur les données issues d'un forage présentant différentes caractéristiques :

- Possibilité d'un accès facile pour l'organisation de la campagne de mesure en situ
- Présence d'une zone favorable aux développements de nos travaux.

En effet, sur le dernier point, il a été choisi de travailler sur une zone présentant des discontinuités singulières et espacées, afin de limiter les effets d'interaction entre les discontinuités lors des mesures.

En effet, sur le dernier point, il a été choisi de travailler sur une zone présentant des discontinuités singulières et espacées, afin de limiter les effets d'interaction entre les discontinuités lors des mesures de répétition. Le forage BC84-5 présente, au-delà de 80 m, une formation précambrienne qui correspond à ces critères.

### 5.1.1.2. Description de la géologie au forage BC4-5

Le forage du trou BC84-5 a été réalisé en mars 1984 jusqu'à une profondeur de 249 m. D'après les images acoustiques et optiques et les carottes extraites, on distingue la présence de différentes unités géologiques (Figure 5 - 3). Les premiers 20 m sont composés d'une couche de grès dolomitique. Par la suite, on distingue une couche de grès d'environ 40 m dans laquelle on retrouve une petite couche de 50 cm de schiste argileux. Dès 60 m, les roches précambriennes comme le granite, la syénite et le gneiss commencent à apparaître.

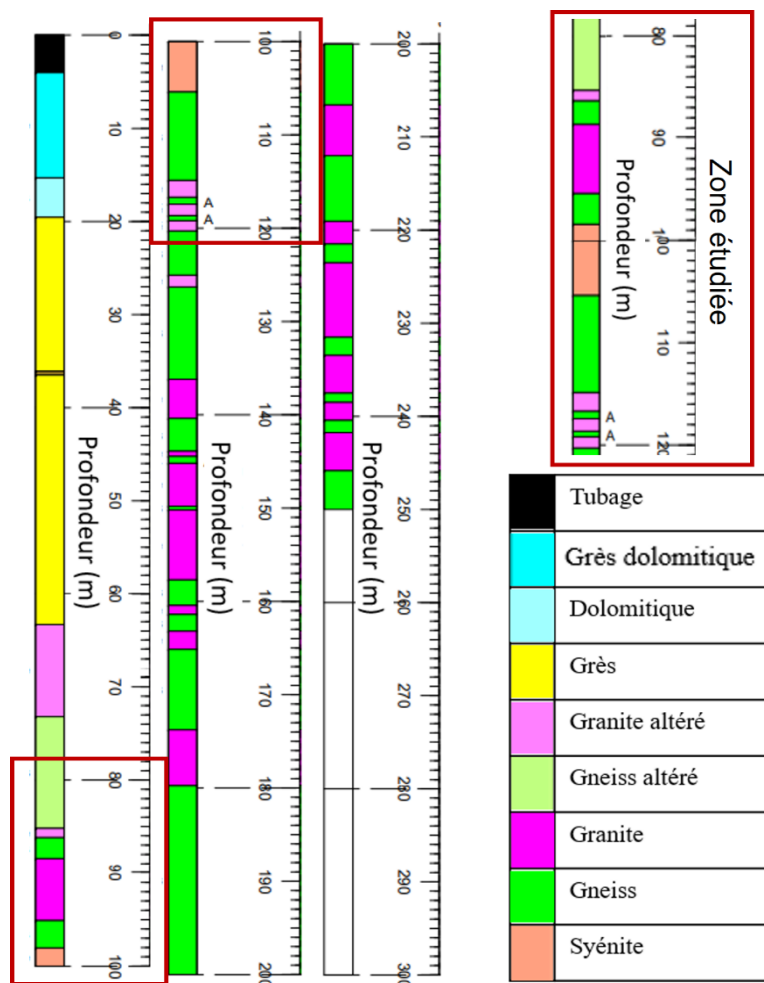


Figure 5 - 3 : La géologie du forage BC84-5 jusqu'à 249 m de profondeur. Le rectangle rouge représente la zone étudiée (de 80 à 120m).

Afin de pouvoir considérer le cas d'une discontinuité singulière, les images acoustiques et optiques réalisées par GSC ont permis d'identifier un secteur entre les profondeurs 80 et 120 m, correspondant à nos besoins. À ces cotes, les roches sont issues de la roche précambrienne, avec parfois quelques traces d'altération.

Le Tableau 5 - 2 présente la liste des relevés diagraphiques effectués dans le forage BC84-5, comprenant l'imagerie optique OTV, l'imagerie acoustique ATV, la sonique FWS, l'électrique DN, le rayonnement gamma et la densité, ainsi que les paramètres d'acquisition correspondants. Les deux campagnes de 2022 (diagraphie sonique et électrique) sont celles que nous avons réalisées dans le cadre de cette thèse. Les différentes profondeurs de chaque technique de diagraphie sont rapportées par rapport au sommet du tubage (point zéro de référence). Les données diagraphiques ont ensuite été importées dans le logiciel de traitement WellCAD V5.4 pour l'analyse et l'affichage. La Figure 5 - 4 illustre les résultats des différentes mesures réalisées, tout en présentant la géologie du milieu étudié.

*Tableau 5 - 2 : Les différents outils de diagraphie réalisée dans le forage BC84-5 avec les détails de l'acquisition.*

| Outil               | Données                         | Modèle de sonde      | Direction d'enregistrement | Vitesse d'enregistrement moyenne (m /min) | Taux d'échantillonnage vertical (cm) | Année de la mesure | Fournit par |
|---------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------------|---|--------------------------------------|--------------------|-------------|
| Imagerie optique    | Intensité de couleurs           | ALT QL40-OB140       | Vers le haut               | 0.7                                       | 0.125                                | 2019               | GSC         |
| Imagerie acoustique | Temps d'arrivée, Amplitude      | ALT QL40-ABI40       | Vers le haut               | 0.7                                       | 0.125                                | 2019               | GSC         |
| Sonique             | Temps d'arrivée, Amplitude      | ALT QL40-FWS 1TX-3RX | Vers le haut               | 0.7-1.5-3                                 | 1-5-10                               | 2022               | GRAI        |
| Electrique          | Résistivité, potentiel spontané | ALT QL40-2PEA        | Vers le haut               | 0.7-1.5-3                                 | 1-5-10                               | 2022               | GRAI        |
| Nucléaire           | Gamma ray Densité               | MS 2SNA              | Vers le haut               | 0.55                                      | 10                                   | 1987               | GSC         |

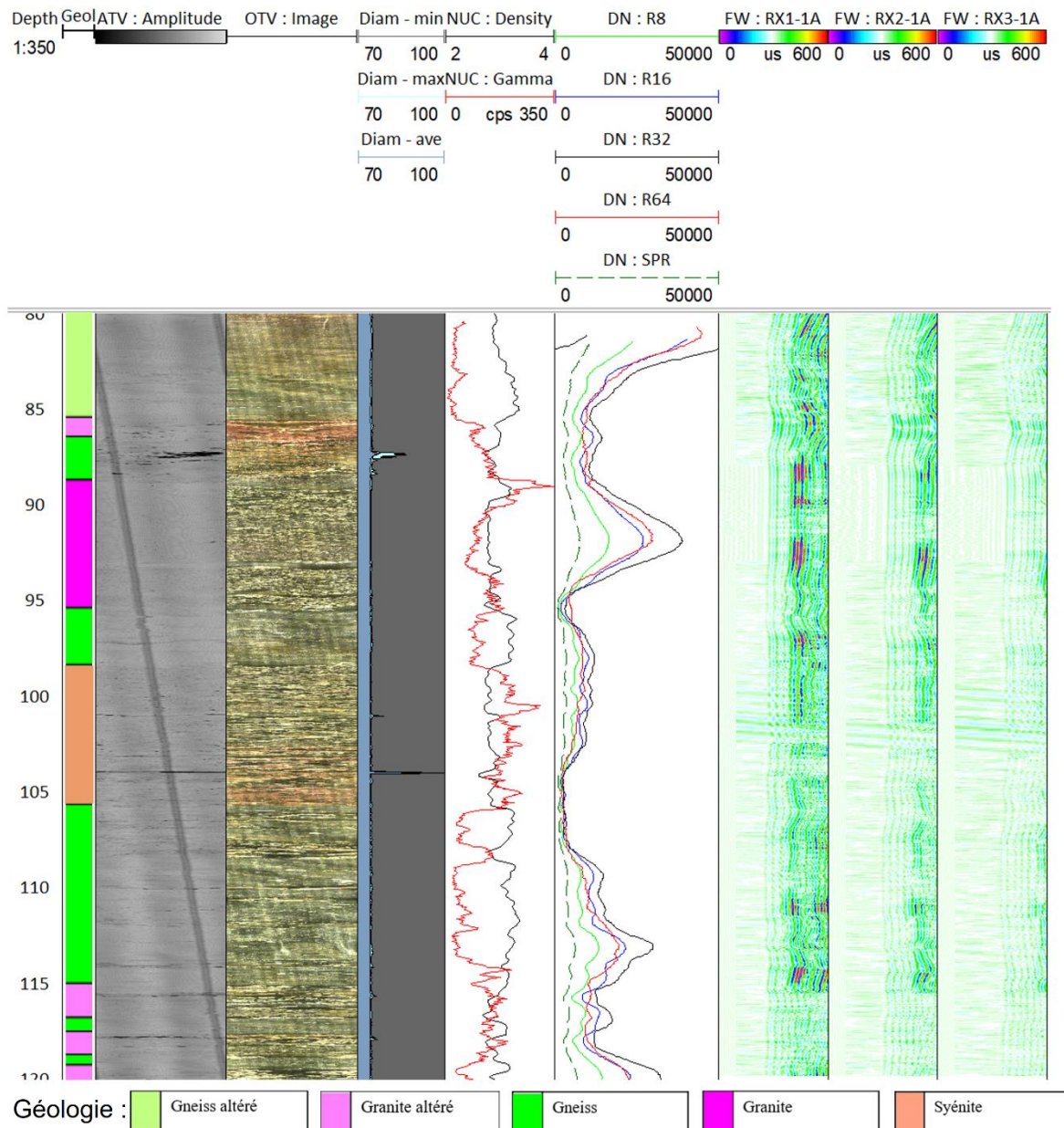


Figure 5 - 4 : La géologie et le tracé récapitulatif des différents outils de diagrapie acquises en BC84-5 (Imagerie acoustique et optique, diamètre, densité, résistivité, et acoustique sonore). Les profondeurs sont relatives au sommet du tubage.

### 5.1.2. Déroulement des essais

De manière générale, les mesures de diagrapie nécessitent l'utilisation d'un certain nombre de composants. La Figure 5 - 5 illustre les éléments essentiels pour une acquisition des données quelle que soit la technique de diagrapie utilisée. La sonde (A) est reliée au câble (D) qui permet de maintenir la sonde dans le forage. Le treuil (E) permet le déplacement de la sonde depuis la surface. Le câble (D) assure la descente et la remontée de la sonde tout en effectuant une liaison électrique entre la sonde et le système d'acquisition. Le treuil principal (E) peut déplacer plusieurs centaines de mètres de câble.



Les mesures sont ensuite enregistrées par le système d'acquisition Matrix Logger © (Mount Sopris Instrument, 2009) (F) permettant de transformer des informations analogiques en informations numériques. Enfin les mesures sont recueillies et visualisées par le logiciel logger © installé sur un ordinateur de terrain (H).

Cet enchainement entre les différents éléments constituant le dispositif de mesures est commun aux différents types de sondes. Notons qu'il y a des éléments supplémentaires pour la sonde électrique. On distingue la présence d'une bride (B) de 7.5 m entre le câble et la sonde. Cette bride porte l'électrode N. De plus, on remarque l'apparition d'un élément relié directement au système d'acquisition. Il s'agit de l'électrode de surface B (G) qui permet d'assurer le bon couplage électrique et qui est plantée dans un sol végétal à 10 m des forages.

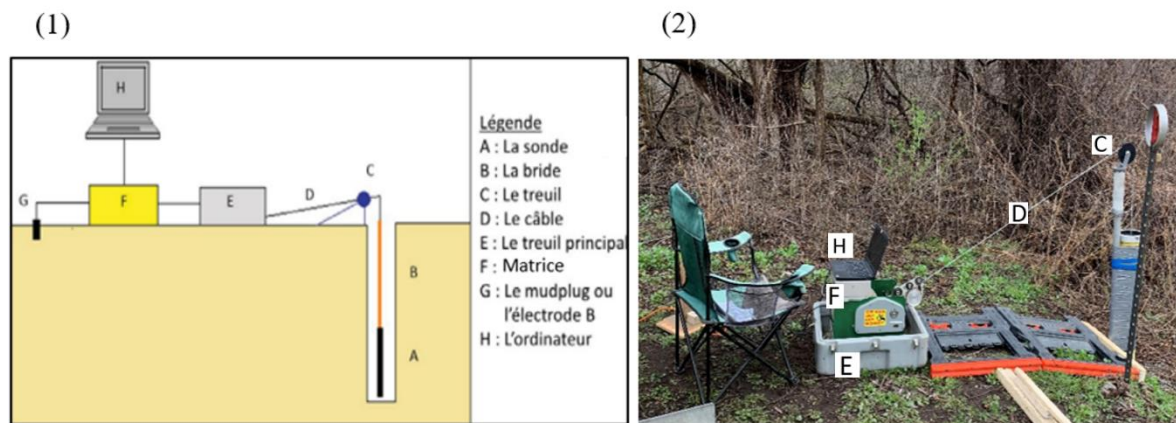


Figure 5 - 5 : (1) schéma représentant le dispositif installé sur le terrain, la bride et l'électrode B se présentent quand on utilise la sonde électrique uniquement. (2) photographie du dispositif installé sur chantier.

En diagraphie, l'enregistrement est habituellement réalisé en remontant la sonde, c'est-à-dire du fond du forage vers le haut. Notons qu'avant l'enregistrement, le haut de la sonde est aligné avec le sommet du tubage. Pour chaque investigation, on a placé des centreurs (centreurs non conducteurs pour le dispositif normal) aux extrémités des sondes afin d'éviter l'influence d'un biais possible (Desbrandes, 1982).

## 5.2. Campagne expérimentale

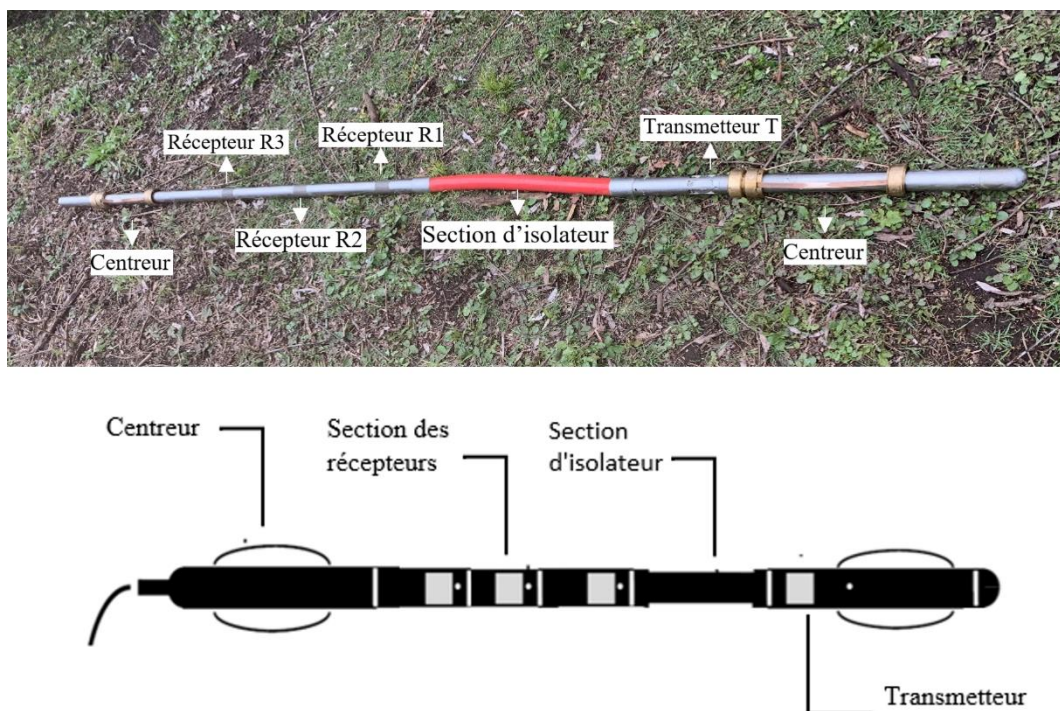
Dans ce chapitre nous avons procédé à une caractérisation des mesures effectuées à l'aide de deux sondes : la sonde sonique FWS et la sonde électrique DN. L'objectif de cette étude est de dresser un bilan de leur sensibilité expérimentale par rapport aux niveaux d'incertitude rencontrés sur le site et dans des conditions réelles. Nous avons porté une attention

particulière aux paramètres de mesure tels que le pas de mesure, le bruit de terrain et la fréquence centrale émise par la source pour la sonde sonore.

### 5.2.1. Sonde sonore FWS 1TX-3RX

La sonde FWS 1TX-3RX est munie d'un transducteur piézoélectrique pour une source d'énergie et de trois transducteurs piézoélectriques séparés par un isolateur acoustique flexible de 50 cm de longueur. Elle dispose d'un dispositif comprenant un émetteur et trois récepteurs de 0.06 m de long, placés à des distances différentes de l'émetteur (R1 à 0.9 m, R2 à 1.2 m et R3 à 1.5 m).

La sonde est fabriquée par Mount Sopris Instrument Co, elle est de 3 m de longueur et de 0.05 m de diamètre (Figure 5 - 6). Elle permet lors d'une seule acquisition d'enregistrer la forme d'onde acoustique complète au niveau de chacun des trois récepteurs. Cet outil est utilisé pour déterminer les vitesses des ondes P et S ainsi que d'autres types d'ondes, et leurs amplitudes. Durant l'acquisition on pulse la source toutes les demi-secondes et on échantillonne toutes les 4 $\mu$ s. Le signal est amplifié avec un gain égal à 2 pour amplifier l'enregistrement. L'ensemble du déroulement de la campagne expérimentale acoustique est présenté dans un protocole (Annexe 4 A).





Le Tableau 5 - 3 présente les différentes configurations acoustiques réalisées le 26 avril 2022 dans le but de calculer l'incertitude des données soniques relatives au bruit de mesure et aux paramètres de mesure tels que le pas de mesure verticale et la fréquence centrale d'échantillonnage.

*Tableau 5 - 3 : Différentes configurations acoustiques faites le 26 avril 2022 pour le forage BC84-5 à Bells corner, Ottawa.*

| <b>Nom</b> | <b>Fréquence (kHz)</b> | <b>Vitesse (m/min)</b> | <b>Pas de mesure (m)</b> | <b>Profondeur (m)</b> |
|------------|------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| FWS_B5_1   | 20                     | 1.5                    | 0.05                     | 120-80                |
| FWS_B5_2   | 20                     | 1.5                    | 0.05                     | 120-80                |
| FWS_B5_3   | 20                     | 1.5                    | 0.05                     | 120-80                |
| FWS_B5_4   | 15                     | 1.5                    | 0.05                     | 120-80                |
| FWS_B5_5   | 30                     | 1.5                    | 0.05                     | 120-80                |
| FWS_B5_6   | 20                     | 0.7                    | 0.01                     | 100-80                |
| FWS_B5_7   | 20                     | 3.0                    | 0.10                     | 100-80                |

Avant de calculer l'incertitude de mesure sur site, une procédure d'extraction des données a été appliquée au niveau des signaux d'acquisition, c'est la même procédure appliquée pour le signal numérique (étapes décrites dans la Section : 3.1.2). Cependant, pour éliminer le bruit de basses et des très hautes fréquences, le signal de mesure acoustique a précédemment subi une phase supplémentaire de traitement, avec un filtrage passe-bande (10-60 kHz).

Les acquisitions ont été examinées pour évaluer l'incertitude des signaux des trois récepteurs de la sonde sonique : les temps d'arrivée des ondes P et S, ainsi que les amplitudes des ondelettes de premier cycle de ces ondes. En raison du temps nécessaire pour traiter le signal acoustique, l'incertitude a été calculée pour une bande de 4 mètres de long située entre 88.5 mètres et 92.5 mètres dans une formation rigide telle que le granite non altéré, avec quelques fractures de l'ordre du millimètre d'ouverture (Figure 5 - 4). Nous le désignerons comme étant la zone d'étalonnage de l'incertitude.

#### *5.2.1.1. Influence des paramètres de mesures acoustiques*

- **Pas de mesure**

Le pas de mesure représente la distance fixe entre chaque acquisition que l'on impose à la sonde lors de la remontée de la sonde. Plus le pas de mesure est petit, meilleure est la

résolution des mesures (meilleure estimation de la position et de l'épaisseur des discontinuités). Afin d'évaluer l'influence du pas de mesure, trois enregistrements ont été réalisés dans le même forage, à quelques instants d'intervalle, dans les mêmes conditions, mais avec trois pas de mesure différentes :  $\Delta z = 0.01$  m (FWS\_B5\_1) ;  $\Delta z = 0.05$  m (FWS\_B5\_6) ;  $\Delta z = 0.1$  m (FWS\_B5\_7). Chaque mesure a été réalisée avec une fréquence centrale fixe de 20 kHz.

La Figure 5 - 7 illustre l'impact de l'espacement de mesure sur les résultats de l'amplitude de la première ondelette et du temps d'arrivée des ondes P et S du premier récepteur.

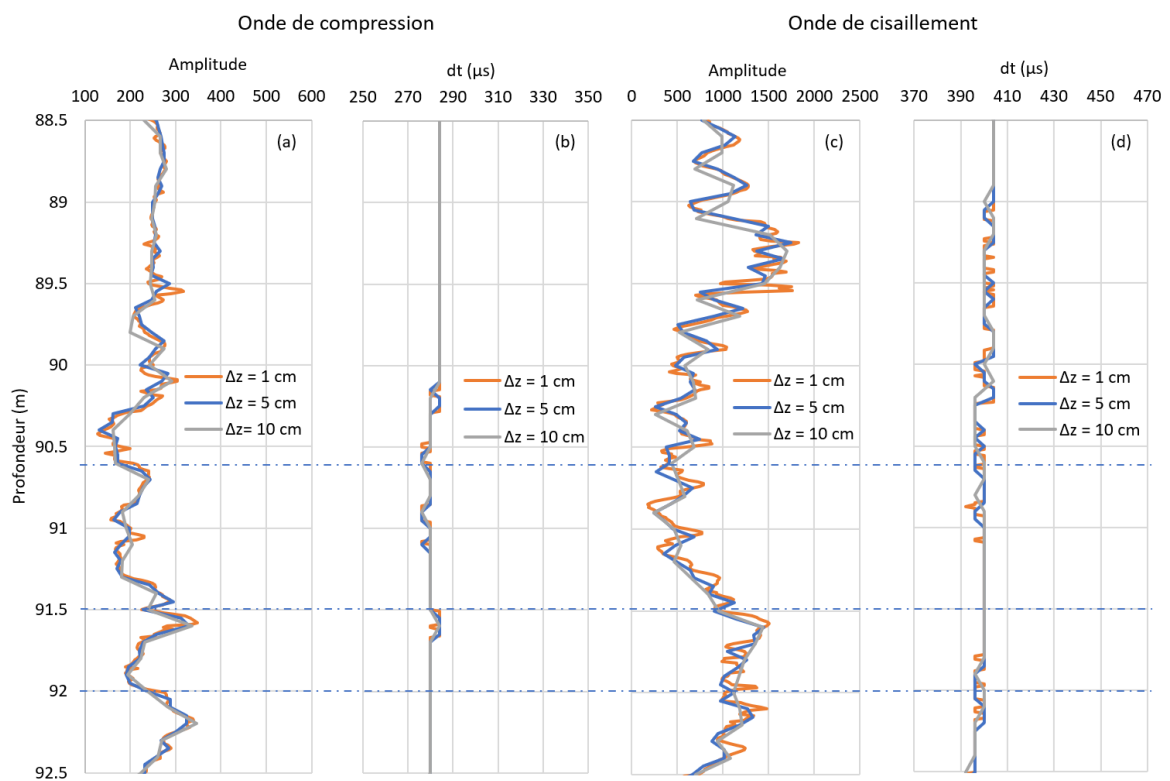


Figure 5 - 7 : Comparaison entre trois mesures acoustiques dont les pas de mesure sont respectivement de 1, 5 et 10 cm, pour le premier récepteur. (a) et (c) représentent les résultats de l'amplitude des ondes P et S, respectivement. (b) et (d) représentent les résultats de temps d'arrivée des ondes P et S, respectivement. Les lignes bleues représentent les positions des discontinuités.

Comme attendu, les Figure 5 - 7 (a et c), montrent que la diminution du pas de mesure améliore la résolution des logs. En effet, plus le pas de mesure est grand ( $\Delta z = 10$  cm), plus la courbe est lisse, ce qui entraîne une perte de représentativité des variations et une sensibilité moindre des mesures selon l'axe des profondeurs. Les résultats pour  $\Delta z = 1$  cm et 5 cm se superposent presque. Pour quantifier l'effet sur l'incertitude d'une augmentation du pas de mesure par rapport à un pas de mesure égal à 1 cm, on a utilisé le coefficient de

variation ( $CV = \frac{\sigma}{\bar{m}}$ ), qui est un indicateur de la dispersion des données exprimé en pourcentage. Ainsi, le coefficient de variation a été calculé pour toutes les profondeurs comprises entre 88,5 cm et 92,5 cm, avec un intervalle de 5 cm entre les mesures, afin de comparer les résultats pour un pas de mesure de 1 cm et 5 cm. De même, il a été calculé pour un intervalle de 10 cm entre les mesures, pour comparer les résultats entre un pas de mesure de 1 cm et 10 cm. Les résultats ont montré un CV (médian) d'environ 2 % entre les résultats pour  $\Delta z = 1$  cm et 5 cm (chaque 5 cm sur tout le forage), et un CV (médian) d'environ 4 % entre les résultats pour  $\Delta z = 10$  cm par rapport à  $\Delta z = 1$  cm (chaque 10 cm sur tout le forage). En outre, on doit considérer une incertitude de mesure sur la position de Z en raison de la discrétisation. Les courbes sont décalées du fait de la résolution, par exemple, pour un niveau de 89 m, une valeur de pic pour  $\Delta z = 1$  cm se situe à  $89 \pm 0.05$  m pour  $\Delta z = 5$  cm et à  $89 \pm 0,1$  m pour  $\Delta z = 10$  cm. Par conséquent, il est important de tenir compte de ces incertitudes lors de l'interprétation des résultats des logs. De plus, le chapitre 3 de cette étude a permis de déterminer un seuil d'erreur numérique acoustique de l'ordre de 2 %. Cette valeur est comparable à l'incertitude observée pour un pas de mesure de 5 cm.

Les Figure 5 - 7 (b et d) représentent le temps d'arrivée des ondes P et S, pour différents pas de temps. Les résultats se superposent et sont quasiment fixes avec de petites variations qui tombent dans la marge d'incertitude du traitement du signal appliquée aux résultats bruts ( $4 \mu s =$  temps d'échantillonnage). Dans certains cas, la présence de fractures n'entraîne pas de modification notable des temps d'arrivée des ondes par rapport au milieu environnant. Cette situation dépend de l'épaisseur et de la nature du remplissage des fractures (Barbosa et al., 2019). Les images optiques et acoustiques de la GSC ont permis d'observer que les discontinuités dans le massif rocheux entre 88.5 et 92.5 m ont une ouverture de l'ordre du millimètre. Ainsi, la présence de fractures de cette taille n'affecte pas significativement les temps d'arrivée des ondes, mais plutôt l'amplitude de la première ondelette des ondes P et S. Ces résultats sont cohérents avec ceux présentés dans la section 3.1.7 (Figure 3 - 9, Figure 3 - 10) du chapitre 3, où une discontinuité de faible ouverture n'affecte que légèrement les temps d'arrivée des ondes, mais atténue fortement leur amplitude.

La diminution du pas de mesure est associée à une diminution de la vitesse de remontée de la sonde. Cependant, une vitesse de remontée plus faible augmente le temps de mesure. Lors de la prise de mesure, la vitesse d'enregistrement est de l'ordre 3 m/min, choisit pour un pas de 10 cm, alors que pour un pas plus fin égale à 5 cm, la vitesse est d'environ 1.5 m/min et

pour un pas égal à 1 cm la vitesse est réduite pour atteindre 0.5 m/min. Donc, un pas de mesure de 5 cm avec une incertitude de 2% a été retenu pour la suite de l'étude, offrant un bon compromis entre résolution et temps de mesure.

- **Fréquence centrale**

La fréquence d'une sonde sonore correspond au nombre de cycles du signal qu'elle émet par seconde (mesuré en Hertz). La fréquence de diagraphie sonore peut avoir un impact significatif sur la qualité et la précision des mesures obtenues (Serra, 1982). Afin d'évaluer l'influence de la fréquence de signal émis au niveau du premier récepteur, trois enregistrements ont été réalisés dans le même forage et dans les mêmes conditions (pas de mesure de 5cm, une vitesse d'enregistrement constante égale à 1.5 m/min), avec trois fréquences différentes :  $f_c = 15$  kHz (FWS\_B5\_4) ;  $f_c = 20$  kHz (FWS\_B5\_1) ;  $f_c = 30$  kHz (FWS\_B5\_5) (Figure 5 - 8).

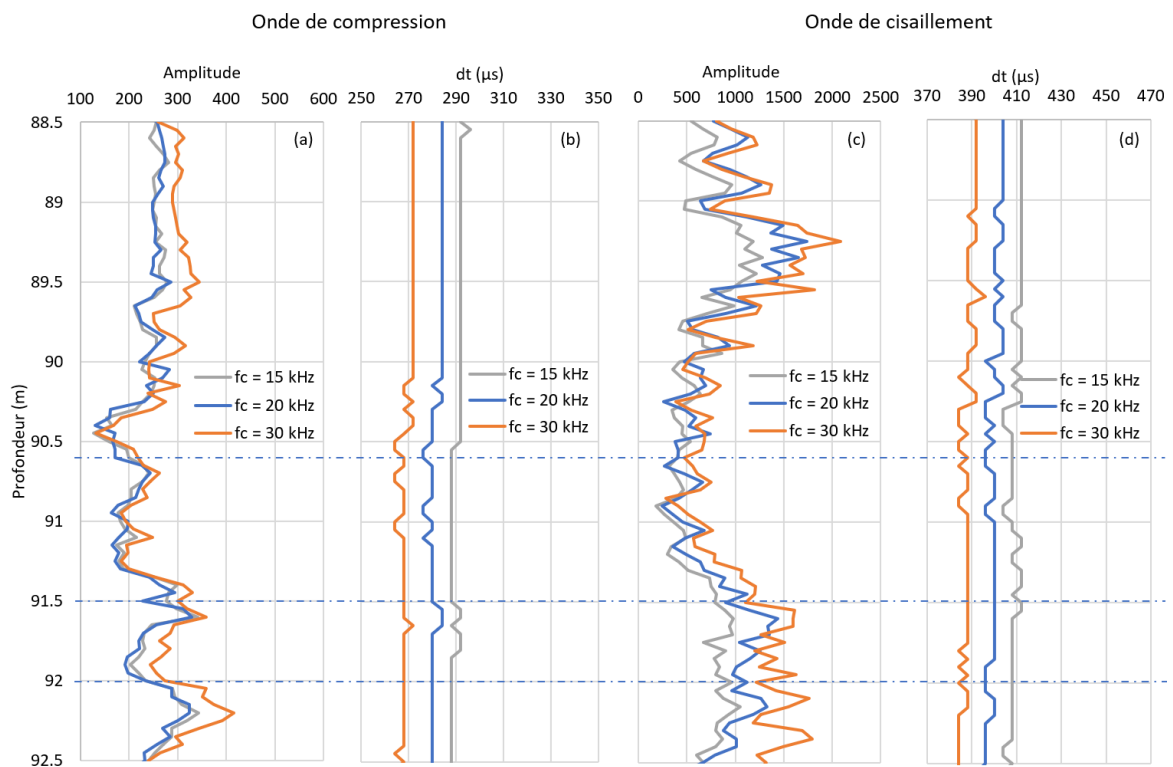


Figure 5 - 8 : Comparaison entre trois mesures acoustiques pour différentes fréquences émises par la sonde, pour le premier récepteur. (a) et (c) représentent l'amplitude des ondes P et S mesurées respectivement. (b) et (d) représentent les temps d'arrivée des ondes P et S mesurés, respectivement. Les lignes bleues représentent les positions des discontinuités.

Il n'y a pas de fréquence unique qui convienne parfaitement à la détection des ondes P et S avec une sonde sonore, car cela dépend de plusieurs facteurs tels que la profondeur des couches géologiques, la nature du matériau traversé, la distance entre la source et la sonde,

etc. La fréquence spécifique utilisée dépendra du résultat souhaité et des propriétés spécifiques de la formation rocheuse à mesurer (Serra, 1982).

Une fréquence élevée est généralement utilisée pour la sonde FWS afin d'obtenir des informations plus détaillées sur la formation rocheuse mesurée. En effet, les fréquences plus élevées offrent une meilleure résolution et peuvent détecter des caractéristiques plus petites dans la roche, telles que des fractures et des variations à petite échelle des propriétés de la roche. Cependant, les hautes fréquences ont également tendance à s'atténuer plus rapidement lorsqu'elles traversent la roche, ce qui peut limiter la profondeur d'investigation de l'outil. Les fréquences plus basses (généralement inférieures à 10 kHz) offrent une pénétration plus profonde, mais une résolution plus faible (Serra, 1982 ; Achenbach, 1984).

La Figure 5 - 8 (a) indique que l'amplitude de la première ondelette de l'onde P du premier récepteur est presque identique pour les fréquences de 15 kHz et 20 kHz. En considérant à chaque profondeur les deux mesures faites, on va calculer leur CV (médiante) pour exprimer la variabilité des résultats ( $f= 15$  et  $20$  kHz). Avec cette méthodologie, la variabilité des mesures liée aux changements de fréquences est d'environ 3 %. Cependant, pour une fréquence de 30 kHz, l'amplitude augmente pour les zones moins fracturées et la réponse est similaire à celle des autres fréquences pour la zone fracturée (entre 90 et 92 m selon les images optiques et acoustiques), avec un CV d'environ 11%, en comparant les résultats de 20 kHz et de 30 kHz. Les ondes P de fréquence plus élevée ont tendance à produire des ondes de plus grande amplitude mais aussi plus courtes et plus atténuées (lorsqu'elles rencontrent des hétérogénéités). Par conséquent, les ondes P de fréquence plus élevée peuvent ne pas se propager aussi profondément dans le solide que les ondes P de fréquence plus basse (Serra, 1982 ; Achenbach, 1984). Ainsi, on évite de travailler avec des sources de haute fréquence pour privilégier un volume d'investigation plus important.

Selon la Figure 5 - 8 (c), les ondes S montrent une courbe d'amplitude de la première ondelette plus lisse pour une fréquence centrale de 15 kHz par rapport aux autres fréquences. Cependant, à mesure que la fréquence émise augmente ( $f= 30$  kHz), la courbe devient plus sensible, même pour les zones non fracturées. Cette observation met en évidence que pour une fréquence centrale de 30 kHz la résolution du signal est meilleure et le rend plus apte à détecter des hétérogénéités dans le milieu rocheux traversé. On note aussi qu'à ces fréquences élevées (30kHz) il semble qu'on soit donc également sensible aux hétérogénéités plus réduites que celles que nous cherchons à caractériser, ce qui va contribuer à augmenter le niveau de parasitage de nos données. Par conséquent, à fréquence plus élevée les ondes S

peuvent être plus difficiles à détecter et à interpréter que celles obtenues à fréquence plus basse.

Dans la zone de fissure (entre 90 et 92 m), où l'amplitude diminue, on remarque que l'écart entre les courbes se réduit. Cependant, pour une fréquence centrale de 15 kHz, la réponse est plus lissée que pour les autres fréquences, ce qui traduit qu'elle est moins sensible à la présence de discontinuités. À mesure que la fréquence augmente, le signal devient plus sensible à la présence de discontinuités qui nous intéressent (Serra, 1982).

Ainsi une fréquence de 20 kHz est un bon choix : permettant d'avoir un rapport signal/bruit plus élevé que les signaux plus hautes fréquences, tout en restant sensibles aux discontinuités ayant les dimensions qui nous intéressent (ouverture centimétrique).

Les Figure 5 – 8 (b, d) montrent bien que les temps d'arrivées des ondes P et S enregistrées par la sonde varient en fonction de la fréquence émise par la sonde. Plus la fréquence émise par la sonde augmente plus le temps d'arrivée des ondes diminue (Achenbach, 1984).

Donc, l'application d'une fréquence de 20 kHz est un bon choix. En effet, cette fréquence offre généralement un rapport signal/bruit élevé, ce qui améliore la qualité des données, ainsi qu'une meilleure résolution pour détecter les discontinuités de la formation rocheuse. Cette fréquence de 20 kHz émise par la source a été sélectionnée pour les mesures acoustiques sur site et pour les simulations acoustiques numériques (section : 3.1).

#### *5.2.1.2. Bruit de mesure acoustique*

Le bruit de mesure est une perturbation aléatoire affectant en diagraphie acoustique les mesures de temps de parcours et d'amplitude des ondes acoustiques dans un puits de forage. Ce bruit est généralement causé par des facteurs externes tels que par exemple les perturbations électromagnétiques, ou lié aux caractéristiques métrologiques de l'appareil (sensibilité, finesse, etc.). La quantification du bruit de mesure est importante pour évaluer la qualité des données de diagraphie acoustique et pour s'assurer que les résultats obtenus sont représentatifs. Pour quantifier le bruit global, on a procédé à des tests en répétabilité pour cela on a effectué plusieurs passages de la sonde dans le même forage et avec les mêmes conditions de mesure dans un intervalle de temps réduit (quelques heures). Le bruit est déterminé pour les deux types d'ondes (compression et de cisaillement) et exprimé par la médian sur l'ensemble du forage, des coefficients de variations (CV) déterminé sur les différentes valeurs mesurées à une même cote, lors des passage successifs. Chaque mesure est réalisée avec des paramètres fixes : une fréquence centrale de 20 kHz et un pas de mesure

de 5 cm (une vitesse d'enregistrement constante égale à 1.5 m/min). La Figure 5 - 9 présente la réponse de la sonde de diagraphe acoustique pour différentes positions de la sonde en termes d'amplitude et d'arrivée des ondes P et S, au niveau du premier récepteur.

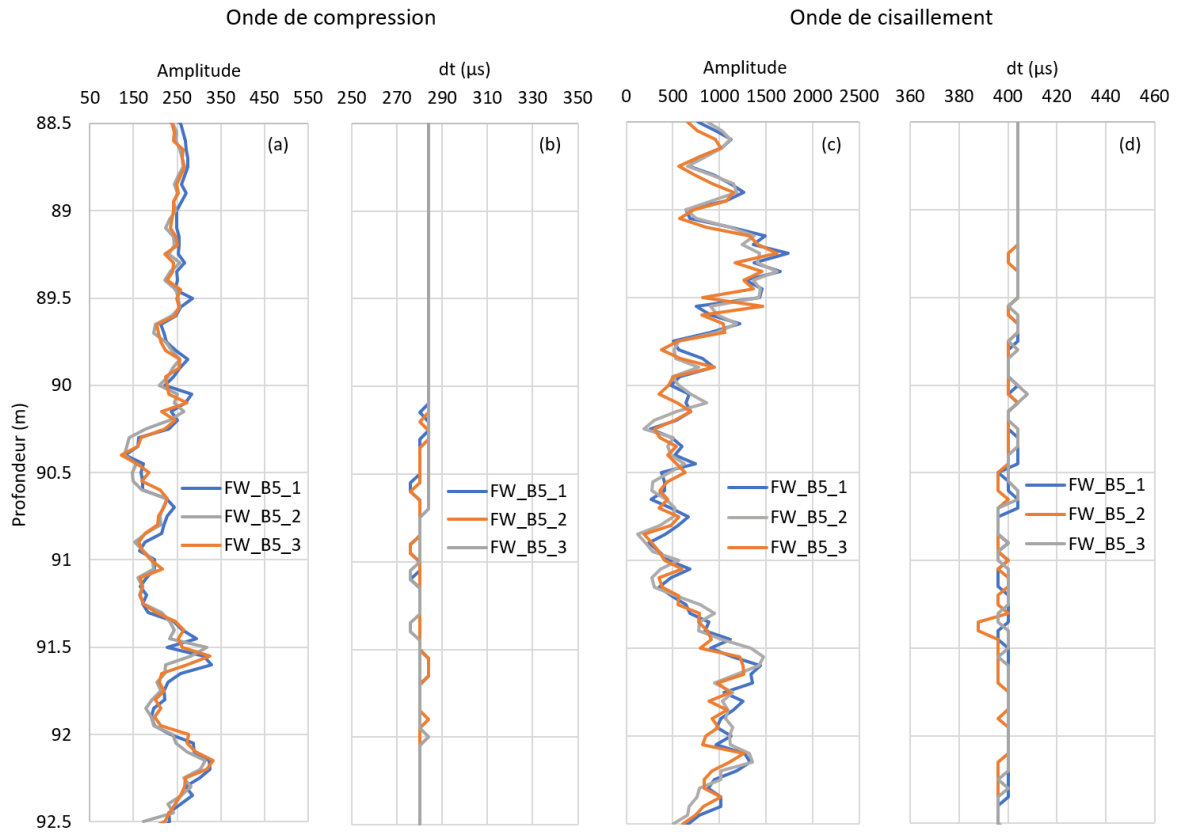


Figure 5 - 9 : Les résultats pour les différents passages de la sonde acoustique, pour le premier récepteur. (a) et (c) représentent les résultats en l'amplitude des ondes P et S, respectivement. (b) et (d) représentent les résultats en temps d'arrivée des ondes P et S, respectivement.

Le Tableau 5 - 4 présente les valeurs médianes des coefficients de variation pour les trois passages de la sonde sur les trois récepteurs, pour l'amplitude et l'arrivée d'onde. On peut constater que les coefficients de variation sont relativement faibles (inférieurs à 5 % pour chaque récepteur), avec des valeurs plus faibles pour les ondes P (<3.3%) que pour les ondes S (<4.8%). Cette faible variabilité expérimentale est en relation avec les variations recherchées (chapitre 3, section 3.1) qui sont de l'ordre de 2% pour l'erreur numérique et 2% pour l'erreur de traitement de signal. Ainsi, cette limite expérimentale de 5% (qui inclut également l'erreur de traitement de signal des données sur le chantier) nous permet d'enregistrer des paramètres représentatifs du milieu, ce qui autorise l'étude des variations significatives.

Tableau 5 - 4 : Coefficients de variation pour l'étude de l'amplitude de la première ondelette et des temps d'arrivée des ondes P et S, au niveau de trois récepteurs de la sonde acoustique.

| Coefficients de variation Med (%) | R1   |      | R2   |      | R3   |      |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                                   | P    | S    | P    | S    | P    | S    |
| Amplitude                         | 3.1  | 4.3  | 3.3  | 4.8  | 2.5  | 4.5  |
| Temps d'arrivée                   | 0.23 | 0.31 | 0.21 | 0.35 | 0.13 | 0.81 |

### 5.2.2. Sonde électrique 2PEA-1000

La sonde 2PEA-1000 est une sonde multifonctionnelle de 1.88m de longueur et 0.05m de diamètre. Elle possède une électrode d'injection (A) de 0.045m de longueur et quatre électrodes de mesure de 0.025m de longueur (Figure 5 - 10). Le protocole expérimental de la sonde électrique est décrit en Annexe 4 B.

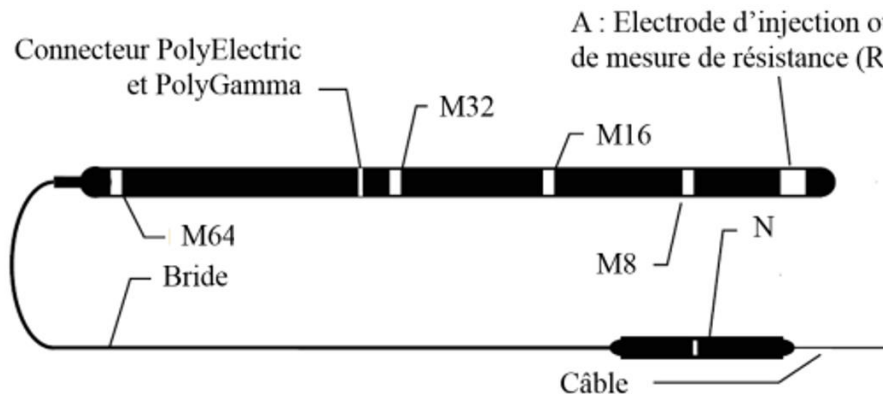


Figure 5 - 10 : Sonde de résistivité normale ALT 2PEA-1000

Le Tableau 5 - 5 présente les différentes configurations électriques réalisées le 27 avril 2022 dans le même forage BC84-5 dans le but de calculer l'incertitude des données électriques relatives au pas de mesure vertical et au bruit de mesure. Dans toutes les configurations, le "mudplug" (électrode B de courant en surface) a été placé à une distance de 8 mètres du forage dans un sol humide afin d'assurer un bon couplage (selon les instructions du Mount



Sopris pour la sonde 2PEA-1000), et une plage de calibrage de 0-2500 Ohm.m a été utilisée. L'incertitude a été déterminée pour une sonde sur 20 mètres de longueur entre les profondeurs de 85 mètres et 105 mètres.

Tableau 5 - 5 : Différentes configurations électriques faites le 27 avril 2022 pour le forage BC84-5 à Bells corner, Ottawa.

| Nom      | Position de l'électrode D'injection en surface (m) | Vitesse (m/min) | Pas de mesure (cm) | Profondeur (m) |
|----------|--|-----------------|--------------------|----------------|
| RES_B5_1 | 8  | 1.5             | 5                  | 120-80 m       |
| RES_B5_2 | 8  | 1.5             | 5                  | 120-80 m       |
| RES_B5_3 | 8  | 1.5             | 5                  | 120-80 m       |
| RES_B5_4 | 8  | 0.7             | 1                  | 105-85 m       |
| RES_B5_5 | 8  | 3.0             | 10                 | 105-85 m       |

#### 5.2.2.1. Influence des paramètres de mesures électriques

Une analyse similaire à celle menée en sonique a été réalisée pour la diagraphie électrique, en se concentrant uniquement sur l'impact du pas de mesure sur les résultats reçus au niveau du récepteur M8. Cette section présente trois enregistrements électriques de terrain, réalisés dans les mêmes conditions, mais avec des pas de mesure différents :  $\Delta z = 1$  cm (FWS\_B5\_4),  $\Delta z = 5$  cm (RES\_B5\_1) et  $\Delta z = 10$  cm (RES\_B5\_5).

Nous avons obtenu les mêmes conclusions que pour la diagraphie acoustique : une résolution accrue des données électriques est obtenue en réduisant le pas de mesure (Figure 5 - 11). Cependant, nous avons observé de légères fluctuations lorsque le pas de mesure a été réduit de 10 cm à 5 cm, puis à 1 cm. Nous avons calculé un coefficient de variation (CV : médian) sur l'ensemble de profondeur étudié (entre 85 m et 105 m) d'environ 2% entre les résultats (chaque 5 cm) pour les pas de mesure de 1 cm et 5 cm, et un CV d'environ 5% entre les résultats (chaque 10 cm) pour les pas de mesure de 1 cm et 10 cm. En augmentant le pas de mesure, la résolution diminue en raison de la discrétisation de la courbe, ce qui empêche une superposition précise des courbes.

Cependant, l'augmentation de la résolution entraîne une diminution de la vitesse d'enregistrement (qui est de l'ordre de 3 m/min pour  $\Delta z = 10$  cm, 1.5 m/min pour  $\Delta z = 5$  cm et 0.5 m/min pour  $\Delta z = 1$  cm) (Tableau 5 - 5). Cela conduit à une augmentation du temps de mesure. Comme pour la diagraphie acoustique, nous avons choisi un espacement de

mesure de 5 cm qui offre un compromis satisfaisant entre la résolution et le temps de mesure. En effet, cela permet d'obtenir un seuil d'incertitude acceptable de 2%, qui est de même ordre de grandeur que l'erreur numérique du modèle de résistivité d'approximativement 3% (chapitre 3, section 3.2.2)

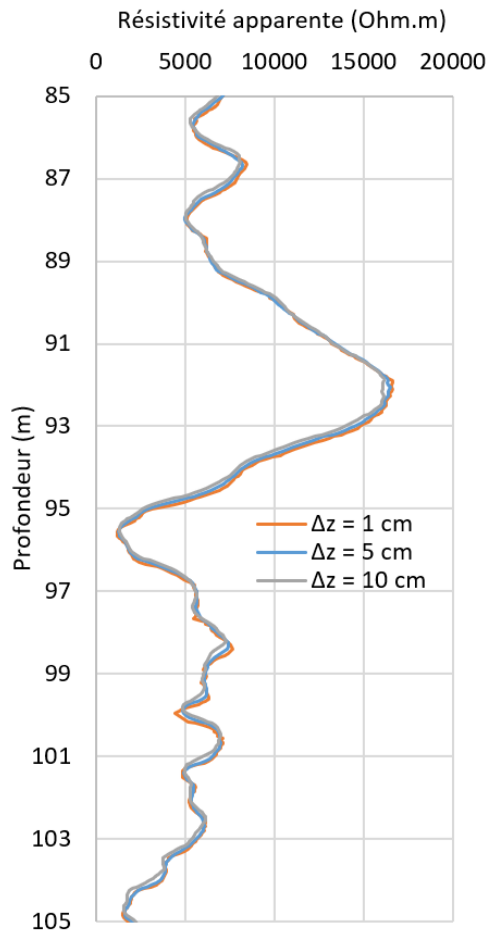


Figure 5 - 11 : Comparaison entre trois mesures électriques dont les pas sont de 1, 5 et 10 cm.

#### 5.2.2.2. Bruit de mesure électrique

Il convient de noter que le bruit de mesure est toujours présent lors de la réalisation de mesure, quelle que soit la technique ou les outils employés. Ce bruit peut avoir différentes sources telles que des interférences externes, des problèmes de câblage ou des variations de l'alimentation électrique (Serra, 1979 ; Taillet, 2013). Afin de quantifier le niveau de bruit, nous avons calculé l'incertitude en utilisant le coefficient de variation (CV) des tests de répétabilité. Pour ce faire, nous avons effectué trois passages de la sonde dans le même forage et avec les mêmes conditions de mesure (RES\_B5\_1 ; RES\_B5\_2 ; RES\_B5\_3) en utilisant un pas de mesure fixe de 0.05 m (avec une vitesse d'enregistrement de 1.5 m/min).

La Figure 5 - 12, montre que les courbes de résistivité obtenues pour les différents passages au niveau de la première électrode M8 se superposent presque parfaitement. Cette observation suggère que l'incertitude de mesure au niveau du premier espacement est très faible.

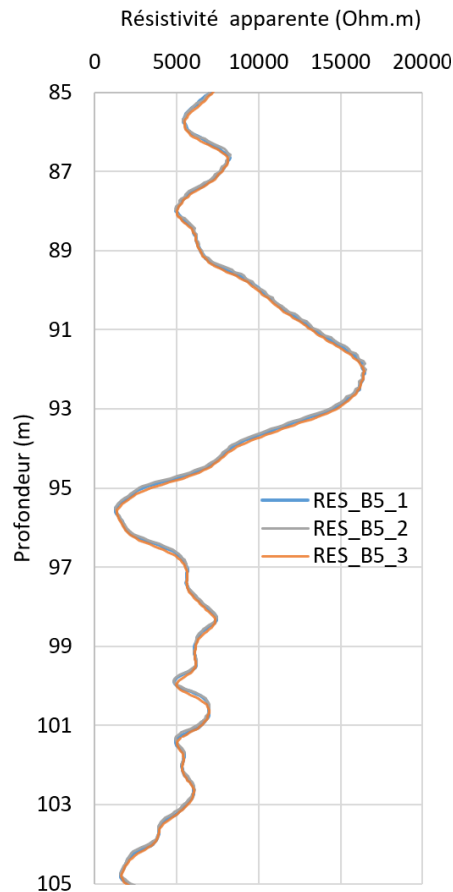


Figure 5 - 12 : Les résultats pour les différents passages de la sonde électrique, au niveau de la première électrode M8.

Les différents paramètres d'acquisition ont été étudiés pour les quatre récepteurs du dispositif normal afin de déterminer leur influence sur les mesures électriques. Le Tableau 5 - 6 nous présente la médiane des coefficients de variation obtenus pour chaque espacement (AM) lors de l'investigation du forage. Les coefficients de variation pour les résultats électriques sont compris entre 0.91% et 2.31%, et augmentent avec l'augmentation de l'espacement. Cela indique que le bruit électrique est relativement faible. Toutefois, pour prendre en compte une situation défavorable, nous prendrons en compte une incertitude de 3% pour le bruit de mesure lors de l'analyse des logs de résistivité. Cette incertitude est de même ordre de grandeur que l'incertitude numérique déterminée dans la section 3.2.2 du chapitre 3.

Tableau 5 - 6 : Coefficients de variation pour les quatre espacements de la sonde électrique.

| Coefficients de variation (%) | R8   | R16  | R32  | R64  |
|-------------------------------|------|------|------|------|
| Médiane                       | 0.91 | 1.32 | 1.78 | 2.31 |

### 5.2.3. Synthèse

Notre étude sur les diagraphies acoustiques nous amène à privilégier une fréquence de signal de 20kHz, compromis optimisant la résolution et le rapport signal/bruit. Cette valeur a été utilisée par Barbosa en 2019 pour déterminer la compliance des discontinuités en exploitant la réponse des ondes P. En ce qui concerne le pas de mesure, nous avons considéré un pas de 5 cm comme un bon compromis entre la résolution des mesures et le temps nécessaire à leur réalisation. Nous avons également évalué l'incertitude expérimentale pour ces mesures acoustiques, qui a donné un seuil pessimiste d'incertitude de 5 % pour l'amplitude d'onde et de 1 % pour l'identification du temps d'arrivée. Ce seuil est comparable aux seuils d'incertitude numérique de 2 % et de traitement de signal de 2 % de notre base de données.

En ce qui concerne les mesures électriques, un pas de mesure de 5 cm est également recommandé pour assurer une bonne résolution tout en évitant des temps de mesure excessifs. Cela permet aussi de conserver des paramètres similaires à ceux des acquisitions soniques. Nous avons évalué notre incertitude expérimentale pour ces mesures électriques et avons trouvé un seuil d'incertitude de 3%, qui est du même ordre que le seuil d'incertitude déterminé pour les résultats des modèles numériques électriques (3%).

### 5.3. Mesures de terrain – interprétations qualitatives

Cette section présente différentes mesures réalisées dans le trou de forage BC84-5 en avril 2022, comprenant des mesures d'imagerie optique et acoustique, ainsi que des mesures acoustiques soniques (FWS\_B5\_1) et des mesures électriques (RES\_B5\_1) enregistrées lors de la remontée des différentes sondes. Ces enregistrements sont comparés les uns aux autres ainsi qu'à un ensemble d'informations géologiques recueillies dans le trou de forage et aux informations obtenues à partir des images acoustiques et optiques. Cette comparaison permet une interprétation qualitative des données reçues et permet d'évaluer la capacité et la sensibilité des deux techniques (FWS et DN) à détecter les discontinuités dans un massif rocheux.

### 5.3.1. Analyse classique des mesures de diagraphies

Pour assurer une interprétation adéquate des résultats acoustiques et électriques, il est nécessaire de les comparer avec les mesures d'imagerie de la paroi du forage réalisées par la Commission géologique du Canada (GSC). Les deux types de sondes utilisées par la GSC, OBI-40 (sonde optique) et ABI-40 (sonde acoustique), fournissent des images complémentaires de la paroi du trou de forage.

La sonde OBI-40 génère une image en continu de la paroi du forage à l'aide de balayages numériques en couleur, en utilisant une caméra numérique à couplage de charge (CCD) à haute sensibilité (résolution de 1.25 pixel/degré). Elle est équipée d'un système d'éclairage (anneau de lumières LED). Les données de l'OTV servent à identifier la présence, la taille et l'apparence des fractures dans la paroi du trou de forage (L'Annexe 4C comporte la fiche technique de la sonde).

La sonde ABI-40 utilise un dispositif de balayage acoustique en trou de forage. On distingue la présence d'un capteur rotatif qui génère des impulsions ultrasonores et qui enregistre l'amplitude et le temps de déplacement du signal réfléchi par la paroi du forage. Les balayages acoustiques du forage ont été collectés par incréments de 1.25 mm en profondeur à une résolution maximale de 288 pixels/révolution. L'image d'amplitude indique un certain nombre de discontinuités qui s'étendent dans la paroi du trou de forage (la fiche technique de la sonde est présentée en Annexe 4C).

En ce qui concerne les résultats acoustiques FWS, les mesures ont été réalisées à l'aide d'un émetteur de 20 kHz placé à la base d'une sonde sonique centrale, et les signaux ont été enregistrés tous les 5 cm sur une longueur d'enregistrement de 1 ms par trois récepteurs situés à différentes hauteurs au-dessus de l'émetteur (R1 à 0.9 m, R2 à 1.2 m et R3 à 1.5 m). La Figure 5 - 13 illustre les images acoustiques et optiques ainsi que les signaux enregistrés par les trois récepteurs en fonction de la profondeur.

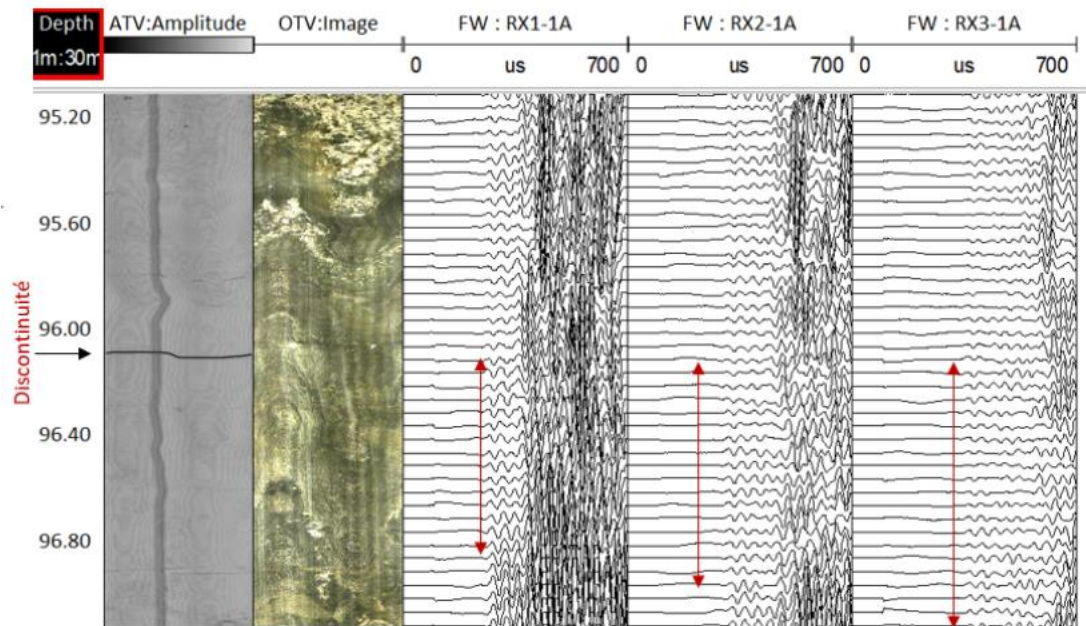


Figure 5 - 13 : Exemple de tracé des images acoustiques et optiques ainsi que les signaux enregistrés par les trois récepteurs FWS en fonction de la profondeur au niveau du forage BC84-5. Les flèches rouges représentent la zone d'influence pour chaque récepteur.

Les résultats (Figure 5 - 13) indiquent que la présence d'une fracture, par exemple à une profondeur de 96.1 m, entraîne une diminution de l'amplitude des différentes ondes enregistrées. Cette diminution est moins visible au niveau du troisième récepteur, situé plus loin de l'émetteur. Cependant, il est important de noter que la forme de la réponse est inversée par rapport aux résultats numériques, car les enregistrements ont été effectués lors de la remontée des sondes, alors que les simulations ont été réalisées en modifiant la position de la discontinuité par rapport à l'émetteur. L'amplitude des ondes diminue le long de la distance entre l'émetteur et les récepteurs, ce qui est représenté par les flèches rouges. Ces résultats indiquent que les enregistrements soniques FWS permettent d'estimer la présence et l'emplacement d'une discontinuité.

La Figure 5 - 14 présente les images acoustiques et optiques ainsi que les relevés électriques enregistrés corrigés, conformément à l'équation de Taillet 2013, (Section :3.2.3, Éq 3-15). La correction de l'effet de forage a pris en compte une eau à 15 Ohm.m et un diamètre de forage de 76.2 mm. Ces relevés ont été effectués pour les dispositifs M8 (à 20 cm de l'émetteur), M16 (à 40 cm de l'émetteur) et M32 (à 80 cm de l'émetteur), en fonction de la profondeur. M64 n'est traité car elle ne montre pas de sensibilité.

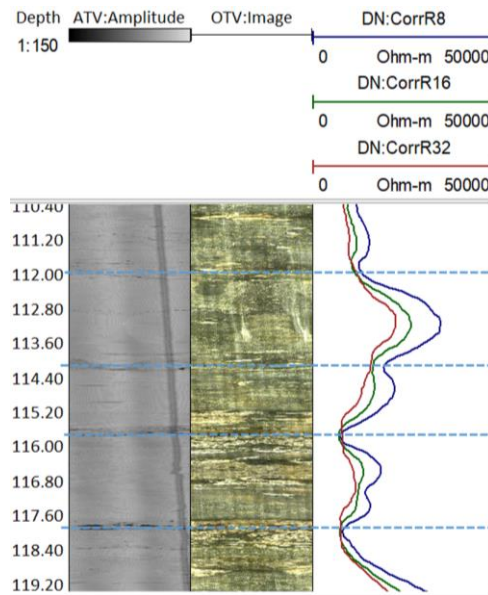


Figure 5 - 14 : Exemple de tracé des images acoustiques et optiques ainsi que les données de résistivité apparente corrigées des trois électrodes (M8, M16, M32) de réception en fonction de la profondeur au niveau du forage BC84-5. Les lignes bleues représentent quelques positions des discontinuités.

La Figure 5 - 14, montre que les discontinuités repérées par les images acoustiques et optiques sont également identifiées par une baisse de la résistivité apparente au niveau des différentes électrodes, telles qu'à 114.1 et à 115.8 m. De plus, il est observé que l'effet de la présence d'une discontinuité devient de moins en moins visible lorsqu'on augmente la distance entre les électrodes d'injection et l'électrode de réception. En effet, les variations sont plus élevées pour M8 que pour M32. On observe également que les discontinuités se manifestent par des résistivités faibles, qui apparaissent sous forme de plateau sur la courbe et dont la largeur correspond à l'espacement entre les sondes. Ceci est conforme à l'analyse faite en section 3.2.4 pour une discontinuité conductrice. Ces observations indiquent que la sonde de résistivité électrique est sensible aux discontinuités, qui peuvent être significativement bien identifiées et localisées.

Afin de comparer le potentiel des deux techniques de diagraphies acoustiques FWS et électriques DN, la Figure 5 - 15 représente les logs électriques corrigés et acoustiques traitées sur une distance de 40 mètres entre 82 mètres et 120 mètres.



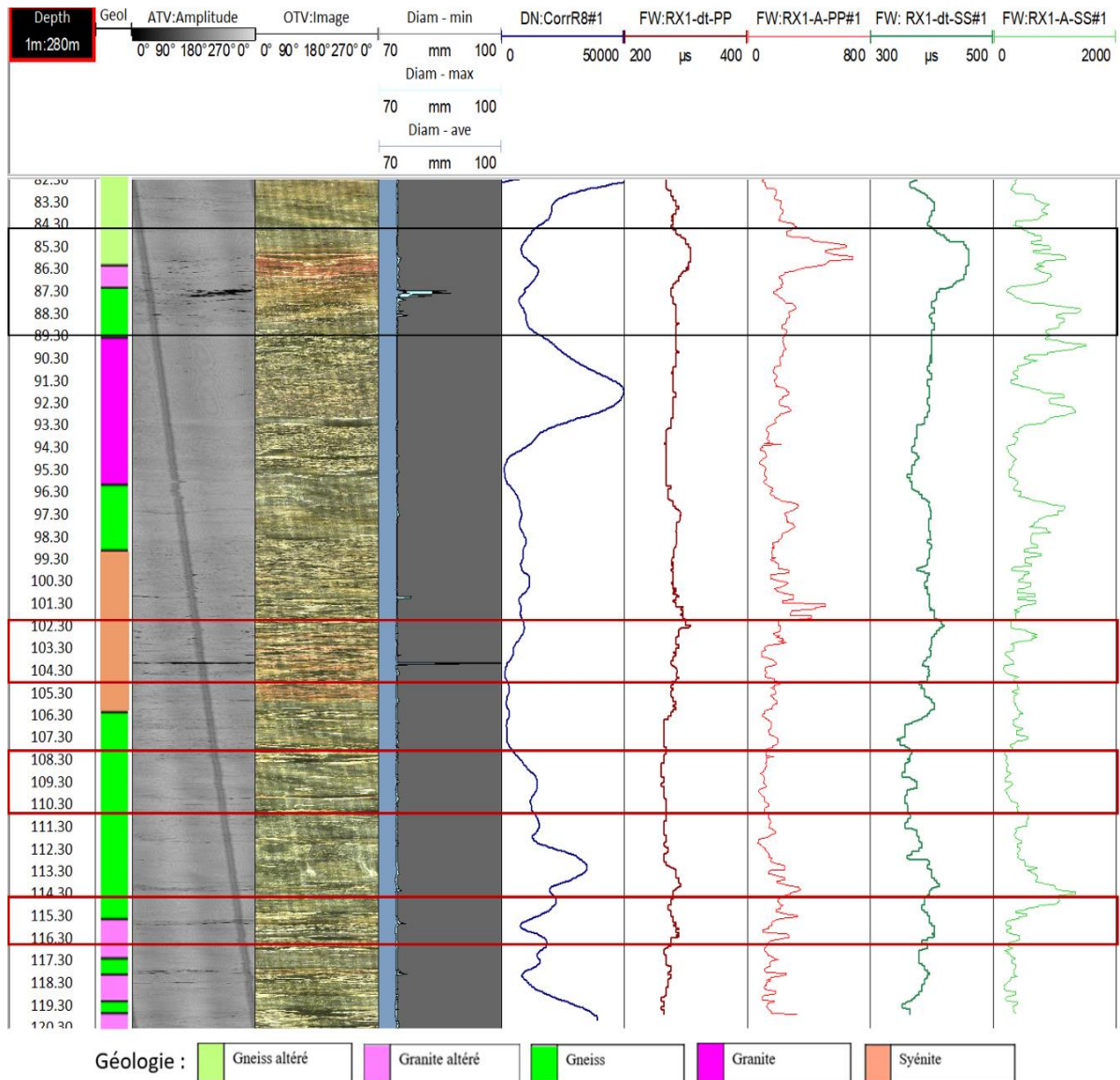


Figure 5 - 15 : Visualisation des images acoustiques et optiques, données de résistivité apparente corrigées pour l'électrode M8, et les enregistrements du temps d'arrivée et d'amplitude de la première ondelette des ondes acoustiques P et S, pour la zone de forage BC84-5 à une profondeur de 82 à 120 m. Le cadre noir représente une zone alertée du massif rocheux et les cadres rouges représentent quelques position des discontinuités.

Les logs diagraphiques dans la Figure 5 - 15 présente en fonction de profondeurs, le log stratigraphiques, les images acoustiques et optiques capturées à l'intérieur du forage BC84-5, ainsi que les résultats électriques sous forme d'un log de résistivité apparente corrigé pour la toute petite normale AM de 8 pouces (en Ohm.m). En outre, les résultats de la sonde acoustique FWS sont également présentés, avec les tracés pour le premier récepteur (offset = 0.9 m), les signaux pour les ondes P et S respectivement, les données de  $\Delta t$  (en  $\mu s$ ) et les données d'atténuation (rapport sans unité).



L'imagerie acoustique permet de détecter les zones présentant des discontinuités, qu'elles soient comblées ou non, que l'on identifie par les traces sinusoïdales plus foncées, correspondant à des pertes d'amplitude. L'allure du sinus est caractéristique de plans inclinés qui recoupent le cylindre du forage. Par exemple, vers 87.2 m, la zone altérée dans les gneiss (identifiée également par le diamètreur comme une discontinuité vide). Les formations reconnues comme des granites et des granites altérés semblent assez homogènes à la vue de ce seul log, contrairement aux gneiss et aux gneiss altérés qui semblent comporter des plans de discontinuités assez nombreux, comme dans le cas de la formation entre 105.6 et 115.2, qui présente des plans régulièrement espacés d'environ 2 m.

L'imagerie optique communique une information complémentaire à l'imagerie acoustique, en fournissant des observations sur la surface des parois du forage. Elle permet de distinguer les variations de couleur de la roche (teinte évoluant du jaune vert au rouge pour la syénite ou le granite altéré à la cote 86.4), ainsi que des éléments sur la texture de la roche (les gneiss ont un grain plus fin que les granites dans notre cas). Cette imagerie permet de confirmer la présence visible de certaines discontinuités (voir les imageries acoustiques et optiques obtenues pour les gneiss entre 105.6 et 115.2), mais semble également révéler d'autres interfaces (par exemple aux cotes 93.2 ou 95.2). On en déduit que ces interfaces sont sans doute remplies (puisqu'on les "voit" dans le visible) et ne représentent plus un plan de faiblesse mécanique (puisque on ne les distingue plus en acoustique).

De manière qualitative, si l'on compare les résultats des méthodes d'imagerie obtenus sur les différentes formations, on peut noter que dans les secteurs identifiés comme des granites ou des granites altérés, on observe la présence de discontinuités d'ouverture décimétrique, comme vers 93.2 avec une ouverture de l'ordre de 30 cm ou encore à 94.4 m. Dans les gneiss ou les gneiss altérés, les discontinuités sont plus nombreuses, avec un espacement qui semble assez régulier à 97.7 m, mais des ouvertures plus réduites, voire des plans de discontinuités feuilletées (traduisant de la roche broyée).

Le diamètreur est un outil qui permet de confirmer ces éléments sur ces secteurs : on observe des singularités au droit des discontinuités révélées par les imageries (voir les cotes 96.4, 114.0 ou encore 117.8, par exemple), contrairement aux interfaces comblées dans les granites pour lesquelles le diamètreur ne mesure pas de variation significative (par exemple à la cote 93.4).

Sur le log électrique, les inflexions de la résistivité semblent légèrement décalées par rapport aux interfaces proposées par le log stratigraphique. Cela peut traduire les transitions progressives entre les formations, mal rendues par le log stratigraphique. Par exemple, l'interface à 95.2 m entre le granite et le gneiss apparaît sur le log électrique comme un banc conducteur d'environ 1.6 m d'épaisseur. On observe également, au sein d'une formation identifiée comme homogène sur la stratigraphie, que la résistivité présente des variations significatives : des variations très progressives des résistivités sont présentes au toit et au mur du banc de granite situé à la cote 92.0, ainsi qu'entre la partie haute du gneiss à la cote 109.0 et la partie basse de cette même formation vers la cote 113.0. On peut associer cela à des variations de propriétés de la roche. Cela indique que la roche n'est pas homogène à toutes les échelles que l'on peut considérer. Dans le secteur situé au-delà de la cote 105.6, on observe une bonne corrélation entre les données d'imageries visibles (permettant d'identifier la présence de plans de discontinuité) et le log de résistivité : au droit de chaque interface visible, on note une baisse de la résistivité ; cela est très clair aux cotes 112.0, 114.0, ou encore 115.60. Ce phénomène n'est pas observable pour les discontinuités dans le granite, confirmant ainsi le fait que ces dernières sont comblées, et les traces sur l'imagerie doivent correspondre à des "cicatrices" comblées plutôt qu'à des interfaces actives (mécaniquement ou hydrauliquement). La configuration de l'électrode M8, avec un faible espacement entre l'électrode d'injection et de mesure (20 cm), offre une meilleure résolution et une plus grande sensibilité aux discontinuités, en permettant de s'approcher d'un cas de discontinuité isolée. Cette précision permet également de mieux comprendre la distribution spatiale des fractures dans le sous-sol, en réduisant les effets de perturbation des autres anomalies géologiques.

Par ailleurs, en ce qui concerne les résultats acoustiques, pour les ondes P, les variations maximales sont de l'ordre de 60  $\mu$ s pour une valeur moyenne d'environ 260  $\mu$ s, ce qui représente une variation de 23% sur l'ensemble de la plage. En termes de vitesse, cela se traduit par des fluctuations de l'ordre de plus de 900 m/s pour une plage de vitesses d'environ 4000 m/s. Avec le même raisonnement, pour les ondes S, les fluctuations de +/- 100  $\mu$ s sur une plage de 390  $\mu$ s, soit une variation de 25%, entraînent des variations de vitesse de +/- 700 m/s sur une vitesse moyenne d'environ 2700 m/s. Dans les deux cas, les variations de vitesse sont liées aux hétérogénéités de la roche (comme la dérive naturelle des propriétés liées à l'altération ou aux caractéristiques naturelles de la roche), ainsi qu'aux hétérogénéités dans la roche (comme les discontinuités). Elles peuvent également être attribuées aux incertitudes de mesure. Par exemple, dans des zones non altérées comme le gneiss et le

granite, les temps d'arrivée des ondes P et S sont les plus courts, ce qui correspond à une vitesse de propagation plus élevée. De plus, on constate que les résultats acoustiques sont plus difficiles à interpréter que les résultats électriques, notamment en ce qui concerne l'onde S, étant donné qu'ils sont plus sensibles aux variations du milieu environnant. Lors du passage de la sonde à travers une zone altérée entre 84.8 et 88.8 m de profondeur, on observe une forte perturbation de la réponse des ondes P et S, se manifestant par une augmentation simultanée du temps d'arrivée et de l'amplitude des ondes P et S (Figure 5 - 15). Cette observation est liée au phénomène d'interférences des ondes qui se produit lorsque la sonde rencontre une discontinuité.

La technique de diagraphie FWS est clairement sensible à la présence de discontinuités dans le massif rocheux. En effet, la présence de fractures ou de failles dans le massif rocheux a un impact significatif sur les enregistrements obtenus. À titre d'exemple, pour une fracture localisée à 104 m de profondeur dans la couche de syénite, on peut observer une diminution de l'amplitude des ondes ainsi qu'une augmentation du temps d'arrivée en dessous de la position de la discontinuité sur une distance d'environ 60 cm (voir Figure 5 - 15). Cependant, l'effet d'interférence des ondes lorsque la position de la discontinuité est proche du récepteur (à 90 cm au-dessous de la position de la discontinuité par rapport au relevé d'imagerie) complique l'interprétation des résultats acoustiques dans un cas d'ouvrage réel. Ce phénomène a été modélisé numériquement à la section 3.1.3 du chapitre 3 et a été validé expérimentalement. Par conséquent, lors de l'interprétation des résultats, il est crucial de prendre en compte l'effet d'interférence. De plus, la résolution de la sonde peut varier en fonction de la distance entre les récepteurs et l'émetteur, comme dans le cas d'une sonde acoustique FWS avec un récepteur éloigné du transmetteur à 90 cm. Dans ce cas, la résolution sera moins fine en raison de la plus grande distance entre les deux transducteurs, ce qui rend la mesure moins localisée.

### 5.3.2. Synthèse

La comparaison de deux techniques de diagraphies électriques et acoustiques FWS pour détecter des discontinuités a été réalisée sur une distance de 40 mètres, entre 80 mètres et 120 mètres, avec des images acoustiques et optiques capturées dans le forage BC84-5. Les résultats électriques montrent une variation considérable de la résistivité apparente corrigée

due à la diversité des types de roches présentes, leur altération et la présence de discontinuités. La géologie du milieu environnant le forage est donc le principal facteur de variation. La présence d'hétérogénéités dans la roche et de discontinuités affecte également la valeur de résistivité. Le faible espacement entre les électrodes de mesure et permet de mieux comprendre la distribution spatiale des fractures dans le sous-sol. Les résultats acoustiques dépendent également en grande partie de la géologie du milieu étudié : leur sensibilité à la présence d'une discontinuité, par un retard de temps d'arrivée et une diminution de l'amplitude des ondes P et S a été observée. Les deux techniques représentent une complémentarité pour la détection de discontinuités dans un massif rocheux. Notons que les résultats acoustiques sont plus complexes à interpréter que les résultats électriques, étant donné qu'ils sont plus sensibles aux hétérogénéités du milieu environnant (Pardo et al, 2021). Il convient de noter que les diagraphies d'imagerie sont des méthodes qui permettent également de mettre en évidence les variations acoustiques FWS et de résistivité, mais ces méthodes sont limitées à une information provenant uniquement de la paroi.

## 5.4. Validation de la méthodologie de travail

Pour valider l'approche de travail décrite dans le chapitre 3 et les modèles de prédiction élaborés dans le chapitre 4, cette partie sera consacrée à l'application de ces modèles pour caractériser trois discontinuités isolées. Les discontinuités seront sélectionnées de manière à respecter un espacement minimal de 1.2 m, qui correspond à la distance entre l'émetteur et le récepteur R2 de la sonde FWS, afin de se rapprocher du cas d'une discontinuité isolée. Dans le cas du site réel, il n'est pas possible d'accéder aux informations sur le remplissage ou l'extension de la discontinuité. Seule l'ouverture peut être estimée avec une possibilité de validation par imagerie. Nous limitons donc notre validation à l'évaluation de la valeur de ce paramètre.

### 5.4.1. Application de l'approche de travail

#### 5.4.1.1. *Position des discontinuités*

D'après les logs d'imagerie acoustique et optique, nous avons pu identifier trois discontinuités isolées présentant un espacement suffisant par rapport aux autres discontinuités avoisinantes. Nous avons sélectionné ces trois discontinuités d'ordre

centimétrique comme ouverture. Les relevés nous ont permis de déterminer l'ouverture apparente et l'inclinaison des différentes discontinuités sélectionnées par rapport à la normale au forage ( $\beta$  en  $^\circ$ ). La première, nommée D1, correspond à une fracture dans la zone de gneiss à une profondeur de 97.2 m. Elle présente une ouverture apparente d'environ 2.56 cm et un pendage de 65.6 degrés. La seconde, nommée D2, est située dans la zone de syénite à une profondeur de 104 m. Elle présente une ouverture apparente d'environ 5.07 cm avec une inclinaison de 37.7 degrés. Enfin, la troisième, nommée D3, est une fracture dans la zone de granite altéré à une profondeur de 115.7 m. Elle présente une ouverture d'environ 1,85 cm et une inclinaison de 52.1 degrés (voir Figure 5 - 16). A partir de l'ouverture apparente et de l'inclinaison des discontinuités par rapport au forage on a calculé une valeur réelle de l'ouverture, ( $e_{réelle} = e_{apparent} * \cos(\beta)$ ). Les pointés des discontinuités se fait automatiquement sous WellCAD V5.4. Il ne nous est donc pas possible d'évaluer une incertitude autour de ces estimations.

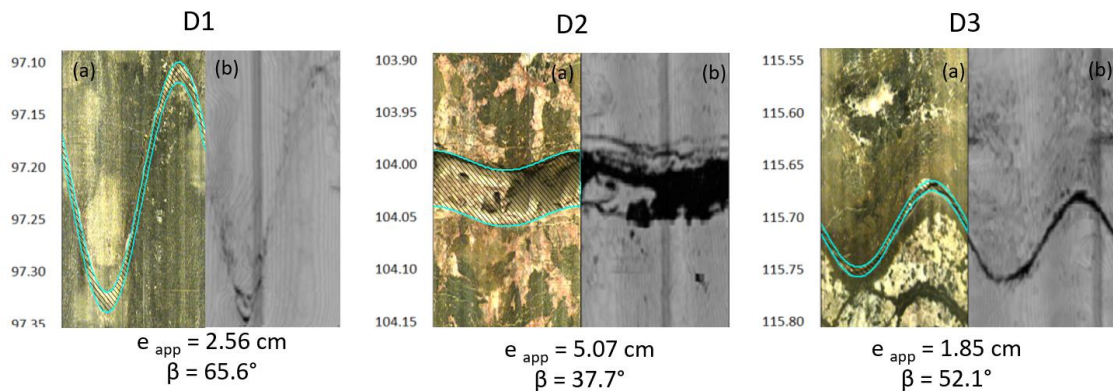


Figure 5 - 16 : Images optiques (a) et acoustiques (b) de trois discontinuités sélectionnées.

#### 5.4.1.2. Calcul des facteurs de pertes

Nous avons adopté une approche visant à estimer les paramètres de discontinuité, à partir d'enregistrement acoustique FWS et électrique DN, en utilisant quatre facteurs de pertes acoustiques ( $VV_P$  ;  $VV_S$  ;  $\gamma'_P$  ;  $\gamma'_S$ ) et un facteur de perte électrique ( $Vr$ ). Ces facteurs ont été déterminés par comparaison des réponses FWS et DN dans des milieux homogènes et discontinus. Le calcul des facteurs de perte a été effectué en utilisant une approche définie dans la section 3.1.5 du chapitre 3 pour les facteurs de perte acoustique (Éq 3-8 :  $VV = (V_H - V_D) \cdot 100 / V_H$  ; Éq 3-9 :  $\gamma' = -20 \text{ LOG}(A_D / A_H)$ ) et dans la section 3.2.6 du même chapitre pour le facteur de perte électrique (Éq 3-16 :  $Vr (\%) = (R_H - R_D) \cdot$

$100/R_H$ . La Figure 5 - 17 illustre la détermination des propriétés acoustiques et électriques dans la zone de discontinuité et dans la zone homogène adjacente à la discontinuité D2. Les valeurs prises pour la partie discontinue sont représentées par des lignes bleues tandis que les valeurs pour le milieu homogène sont en rouge. Il convient de souligner que pour calculer les facteurs de perte relatifs à la variation de la vitesse des deux types d'ondes, il est nécessaire de déterminer au préalable la vitesse de propagation, en utilisant l'Équation 3-7 présentée dans le Chapitre 3, section 3.1.5 :  $V = \Delta x / (dt - t_{forage})$ . Le Tableau 5 - 7 synthétise les propriétés déterminées pour chaque milieu (discontinu et homogène) et les valeurs de facteurs de perte calculées pour les trois discontinuités.

Tableau 5 - 7 : Propriétés des milieux discontinus et homogènes ainsi que les facteurs de perte liés à la présence des discontinuités D1, D2 et D3.

| <b>Propriétés du milieu discontinu</b>  |                |                |                  |                  |               |
|---|----------------|----------------|------------------|------------------|---------------|
|   | $V_{DP}$ (m/s) | $V_{DS}$ (m/s) | $A_{DP}$         | $A_{DS}$         | $R_D$ (Ohm.m) |
| D1  | 3573           | 2464           | 220              | 578              | 8404          |
| D2  | 3655           | 2570           | 125              | 203              | 3198          |
| D3  | 3663           | 2565           | 137              | 283              | 7596          |
| <b>Propriétés du milieu homogène</b>  |                |                |                  |                  |               |
|   | $V_{HP}$ (m/s) | $V_{HS}$ (m/s) | $A_{HP}$         | $A_{HS}$         | $R_H$ (Ohm.m) |
| D1  | 3628           | 2515           | 251              | 760              | 8513          |
| D2  | 3801           | 2686           | 187              | 423              | 4952          |
| D3  | 3742           | 2620           | 238              | 537              | 20358         |
| <b>Facteurs de perte</b>  |                |                |                  |                  |               |
|   | $VV_P$ (%)     | $VV_S$ (%)     | $\gamma'_P$ (dB) | $\gamma'_S$ (dB) | $Vr$ (%)      |
| D1  | 1.5            | 2.1            | 1.1              | 2.3              | 1.3           |
| D2  | 3.8            | 4.3            | 3.5              | 6.4              | 35.4          |
| D3  | 2.2            | 2.1            | 4.7              | 5.6              | 48.6          |
| $VV_{(i)}$ : Facteur de variation de la vitesse ; $\gamma'_{(i)}$ : Facteur d'atténuation de l'amplitude ; $V_{H(i)}$ : Vitesse d'onde du milieu homogène ; $V_{D(i)}$ : Vitesse d'onde du milieu discontinu ; (i) : représente les ondes de compression P et de cisaillement S ; $Vr$ : facteur de perte électrique ; $R_H$ : résistivité du milieu homogène ; $R_D$ : résistivité du milieu discontinu. |                |                |                  |                  |               |

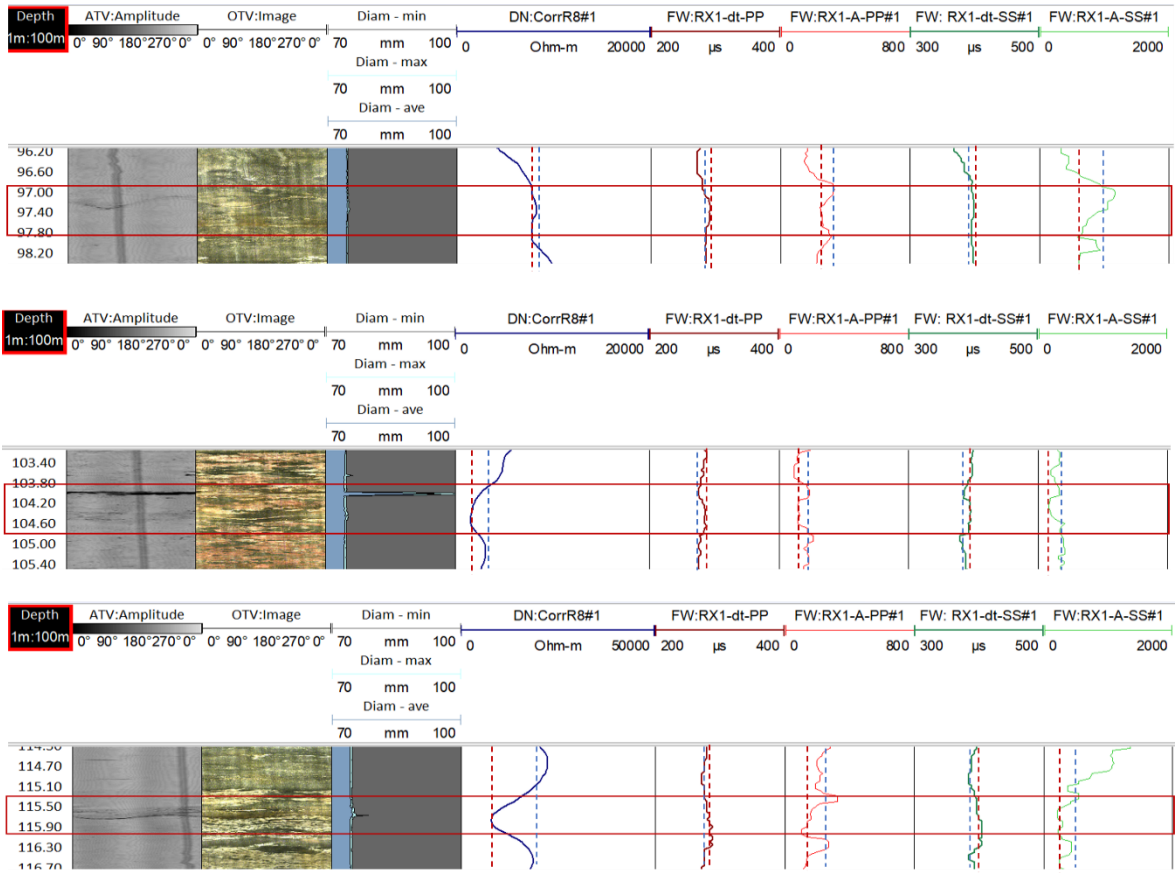


Figure 5 - 17 : Schéma de détermination des propriétés du milieu discontinu (ligne rouge) et homogène (ligne bleue) pour les trois discontinuités.

#### 5.4.2. Prédiction des ouvertures des discontinuités

Afin de vérifier l'efficacité de notre approche de travail, nous avons mis en pratique l'équation de prédiction (Éq 4-6 :) obtenue par la régression multiple non linéaire présentée dans la section 4.3.1.2 du chapitre 4, en vue de prédire l'ouverture des discontinuités sélectionnées :

$$\begin{aligned}
 e = & 19.95 + 1.88 \frac{VV_{P1}}{R_V} - 44.27 R_{VV_P} - 0.28 \gamma'_{P1} + 0.65 VV_{S1} - 3.49 R_{VV_S} + 0.10 \gamma'_{S1} - \\
 & 0.032 V r_{M8} - 0.28 \left( \frac{VV_{P1}}{R_V} \right)^2 + 37.01 R_{VV_P}^2 - 0.01 \gamma'_{P1}{}^2 - 0.03 VV_{S1}^2 - 0.78 R_{VV_S}^2 - \\
 & 0.05 \gamma'_{S1}{}^2 + 0.008 V r_{M8}^2 + 0.01 \left( \frac{VV_{P1}}{R_V} \right)^3 - 9.98 R_{VV_P}^3 + 0.003 \gamma'_{P1}{}^3 + 0.0005 VV_{S1}^3 + \\
 & 0.74 R_{VV_S}^3 + 0.003 \gamma'_{S1}{}^3 - 5.39 \cdot 10^{-6} V r_{M8}^3
 \end{aligned}$$

Le Tableau 5 - 8 présente les valeurs d'ouverture réelle et prédite par le modèle pour les discontinuités D1, D2 et D3. Les écarts entre la prédiction et la réalité sont également présentés.

Le premier constat est que les valeurs estimées à partir du modèle sont relativement cohérentes avec les valeurs mesurées issues des logs d'imagerie. Nous avons observé que les discontinuités D1 et D3 présentent des ouvertures de l'ordre de 2 cm, tandis que D2 présente une ouverture d'environ 4 cm. Bien que le classement des discontinuités entre elles ne soit pas strictement respecté lorsqu'on considère D1 et D3, les valeurs prédites sont tout de même relativement proches de la réalité. Le modèle propose des solutions qui surestiment l'ouverture réelle de certaines discontinuités (cas de D1) et qui la sous-estiment pour d'autres (cas de D2 et D3), mais il n'y a pas de biais constant significatif dans la solution.

Dans l'ensemble, cette validation est plutôt satisfaisante car elle démontre la cohérence entre les prédictions basées sur les mesures en forage et les observations réelles, malgré le non-respect strict de toutes les hypothèses du modèle (discontinuité isolée, normale au forage symétrique et régulière, etc.).

Tableau 5 - 8 : Valeurs d'ouvertures réelles et prédites pour les trois discontinuités, et l'écart entre les deux valeurs.

|                     | <b>D1</b> | <b>D2</b> | <b>D3</b> |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|
| $e_{apparent}$ (cm) | 2.56      | 5.07      | 1.85      |
| $\beta$ (°)         | 65.6      | 37.7      | 52.1      |
| $e_{réelle}$ (cm)   | 1.06      | 4.01      | 1.13      |
| $e_{Prédit}$ (cm)   | 1.21      | 3.54      | 0.87      |
| Ecart (cm)          | + 0.15    | - 0.47    | - 0.26    |

Le Tableau 5 - 8 montre que les différences entre les valeurs réelles et prédites des discontinuités sont inférieures à 0,5 cm. Selon la section 4.3.3 du chapitre 4, l'erreur moyenne de prédiction pour une plage d'ouverture de discontinuité de 1 cm à 5 cm est estimée à 20%, et elle est d'environ 3% pour les ouvertures supérieures à 5 cm. L'expérimentation a montré que l'erreur de prédiction pour D1 est d'environ 15%, ce qui est en accord avec cette moyenne. Cependant, pour D2 et D3, l'erreur de prédiction est supérieure à l'erreur de prédiction calculée. Malgré cela, ces résultats sont satisfaisants pour une résolution centimétrique.



### 5.4.3. Synthèse et discussion

Dans le travail de validation, les écarts entre estimation et réalité doivent être discutés, mais il serait maladroit de ne pas intégrer les valeurs des incertitudes afin d'évaluer les seuils de significations de ces écarts. Dans la méthodologie retenue, on évalue les facteurs de pertes (tous incertains) qui sont combinées dans l'équation permettant l'évaluation du paramètre de discontinuité visée (Éq 4-6). Ainsi ces différentes incertitudes vont se combiner de manière complexe et se traduire par une incertitude finale du processus d'analyse. Selon que les données d'entrée soient numériques ou issues des mesures on identifie la justesse du processus. Ce travail est donc mené avec l'objectif de comparer les valeurs à des seuils de signification, afin peut être d'identifier les besoins d'amélioration du processus pour améliorer le diagnostic.

Pour cela, l'étude de la propagation des erreurs est menée par une simulation Monte Carlo. Il s'agit de simuler pour chaque facteur de perte un nombre important de tirages aléatoires, mais qui correspondent bien aux lois statistiques qui les décrivent (à partir de la moyenne et de l'intervalle d'incertitude estimée) (Lataste, 2016 ; Dérobert et al., 2017). Mille tirages pour chaque observables sont donc simulés, de manière que la statistique des 1000 tirages pour chacun des facteurs de perte correspondent bien à celle estimées. Pour chacun des 1000 tirages, les valeurs des facteurs de perte sont combinées à travers l'équation 4-6 afin d'aboutir à 1000 estimations de  $e$ . On peut donc en déduire une valeur moyenne et un intervalle d'incertitude autour de la valeur de  $e$  déterminée. On distingue d'une part l'incertitude de modélisation éléments finis lors de l'étude numérique (2%) ; l'incertitude liée au processus d'analyse et de traitement associée aux approximations sur les valeurs extraites des données des observables (4%) ; ces incertitudes présentes lors du processus numérique doivent donc s'ajouter pour composer l'incertitude numérique (6%). D'autre part, l'incertitude de mesure liée à la variabilité naturelle des mesures in situ et estimées à 5% pour la diagraphie FWS et 3% pour la diagraphie DN. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5 - 9.

Tableau 5 - 9 : Tableau de synthèse des données sur les discontinuités issus de modèle de prédiction développé.

|  |              | <b>D1</b> | <b>D2</b> | <b>D3</b> |
|--|--------------|-----------|-----------|-----------|
| $e_{réelle}$                               | (cm)         | 1.06      | 4.01      | 1.13      |
| $e_{Prédit}$                               | (cm)         | 1.21      | 3.54      | 0.87      |
| $e_{Prédit}$<br>(Incertitude<br>numérique) | Moyenne (cm) | 1.22      | 3.56      | 0.91      |
|  | CV (%)       | 17.4      | 10.1      | 26.7      |
| $e_{Prédit}$<br>(Incertitude mesure)       | Moyenne (cm) | 1.23      | 3.54      | 0.91      |
|  | CV (%)       | 14.1      | 6.1       | 22.4      |

Le Tableau 5 - 9 montre que l'évaluation de l'ouverture de la discontinuité détectée est cohérente que les données soient issues de simulations numériques ou de mesures expérimentales : les valeurs moyennes, sont comparables pour les deux approches quelles que soient la discontinuité considérée entre une approche simulée et l'approche expérimentale. A ce titre on peut considérer que nos résultats sont donc bien validés. L'erreur semble plus être liée à une incertitude du processus de combinaison qu'aux données initiales. Néanmoins, une marge d'incertitude élevée est observée, environ 25 % pour D3, 15 % pour D1 et 7 % pour D2. Comme mentionné précédemment, ces incertitudes ne sont pas du même ordre que l'incertitude relative à la prédiction déterminée dans le chapitre 4 (section : 4.3.3). Cette différence est probablement due aux écarts entre le milieu réel et le milieu modélisé, qui peuvent entraîner davantage d'erreurs dans nos modèles de prédiction.

Il est essentiel de noter que les discontinuités dans le milieu environnant sont associées à des hétérogénéités, telles que des zones de porosité, qui rendent l'environnement non homogène. De plus, le remplissage des discontinuités varie en fonction de leur environnement, ce qui complique l'évaluation des caractéristiques apparentes de la fissure (en termes soniques ou électriques, une fissure ne se manifestant que par son effet résultant). La notion de variabilité dans leur longueur ou dans le temps (en cas d'évolution) n'est pas abordée ici.

De plus, les discontinuités sélectionnées peuvent présenter une inclinaison par rapport à l'axe de forage, ce qui engendre des différences significatives avec les conditions de simulation numérique. Les angles observés ici par rapport à la normale au forage sont élevés, et deux sur trois sont supérieurs à 45°, impliquant que nos discontinuités sont plus proches de la verticale que de l'horizontale. Cela nous éloigne très fortement de l'hypothèse idéalisée retenue pour les travaux numériques.

Enfin, la surface des discontinuités dans la réalité présente une rugosité, contrairement à la surface lisse du modèle numérique. Notre approche numérique idéalisée ne saurait être

représentative de toutes les variabilités possibles, issues par exemple de la rugosité naturelle que l'on observerait le long d'une discontinuité naturelle.

## 5.5. Conclusion

Dans le but de valider notre méthodologie de travail, nous avons évalué l'ouverture de discontinuités en nous appuyant sur les diagraphies FWS et DN. Dans un premier temps, nous avons déterminé l'incertitude expérimentale liée au bruit de mesure et au paramètre de mesure appliqué pour les deux techniques. Un seuil d'incertitude de 5% a été déterminé pour les mesures acoustiques et 3% pour les mesures électriques. De plus, les deux techniques ont montré une sensibilité à la présence d'un endommagement ou d'une discontinuité, en particulier dans le milieu environnant, tout en comparant les logs de mesure avec les logs d'imagerie acoustique et électrique.

Troisièmement, pour la validation, nous avons pu déterminer trois discontinuités qui répondent au mieux aux hypothèses de notre étude. Il est important de noter qu'il est difficile de détecter des discontinuités normales à l'axe de forage dans un cas d'ouvrage réel, qui ne sont pas entourées d'hétérogénéités (porosité). L'ouverture réelle de ces trois discontinuités a été calculée selon leur ouverture apparente sur les logs d'imagerie et selon leur inclinaison par rapport à la normale au forage. Notre méthodologie de travail a présenté un potentiel satisfaisant pour évaluer l'ouverture d'une discontinuité avec un ordre de précision de l'ordre centimétrique (0,5 cm d'écart). Cependant, le niveau d'incertitude reste critique, car une partie de l'incertitude est liée au processus de combinaison des données et une autre partie est liée au fait que nous n'avons pas bien respecté les hypothèses de notre étude. En effet, la variabilité naturelle de tout phénomène ou milieu réel ne peut être prise en compte, et le poids des hétérogénéités du milieu ou de celui de la discontinuité ne peuvent être négligés.

## Chapitre 6 : Conclusion

La présence de discontinuités dans les massifs rocheux peut avoir un impact significatif sur la stabilité et le comportement du massif, et par extension, la performance des structures d'ingénierie. Par conséquent, il est crucial de comprendre complètement la distribution et les caractéristiques des discontinuités dans les massifs rocheux afin de garantir la conception, la construction et l'exploitation sûres et durables des structures d'ingénierie dans les environnements géologiques

Bien que les techniques d'imagerie acoustique et optique soient couramment utilisées pour explorer l'intérieur des ouvrages en géophysique, mais elles présentent des inconvénients importants. Elles ne permettent pas de caractériser les discontinuités en termes d'extension ou de propriétés de remplissage, mais fournissent plutôt une image des parois du forage. Par conséquent, les informations obtenues à partir de ces méthodes sont souvent insuffisantes pour établir un diagnostic complet de l'état de dégradation du massif, ce qui peut conduire à des erreurs d'interprétation et à des risques de sécurité. De plus, ces techniques peuvent être coûteuses et chronophages, ce qui peut restreindre leur utilisation à grande échelle.

Dans cette thèse, nous avons visé à améliorer la caractérisation des discontinuités dans les massifs rocheux en utilisant une combinaison de la diagraphie acoustique sonique FWS (Fullwave) et du dispositif électrique DN (dispositif normal). Bien que ces deux techniques aient été développées à des fins pétrolières, des études antérieures ont montré leur sensibilité à la présence de discontinuités. La réponse FWS en termes de temps d'arrivée des ondes et d'amplitude d'onde dépend du milieu de propagation et des interfaces/discontinuités rencontrées dans un milieu, tandis que la méthode de résistivité est sensible à certains facteurs révélateurs d'une altération (variation de la porosité, présence de singularités).

Le deuxième chapitre de notre étude nous a permis de mettre en évidence la relation entre les propriétés acoustiques et électriques d'un massif rocheux et son état de fracturation, à partir d'une revue de la littérature. Il en ressort que les conditions de contact entre les éléments du massif influencent les propriétés acoustiques, tandis que l'architecture du réseau de pores affecte les propriétés électriques. Nous avons également étudié deux techniques diagraphiques utilisées dans l'étude des massifs rocheux, à savoir la diagraphie acoustique Full waveform (FWS) et la diagraphie de résistivité normale (DN). La diagraphie acoustique sonique permet d'obtenir des informations lithologiques et mécaniques en évaluant la vitesse

de propagation du son. Elle est également utile pour détecter les discontinuités qui ont un impact sur la propagation des ondes sismiques. Nous avons souligné l'importance de prendre en compte la réponse des ondes de compression P et des ondes de cisaillement S, qui présentent une sensibilité à la présence de discontinuités en retard d'arrivée d'onde ou en atténuation d'amplitude. Quant à la diagraphie de résistivité normale DN, elle permet d'identifier les discontinuités les plus étendues jusqu'à un rayon d'investigation d'environ 1m, mais sa résolution verticale diminue, rendant plus difficile la détection de fines unités. Cependant, la réponse obtenue par cette technique est sensible à différentes natures d'hétérogénéités du milieu (variabilité naturelle des propriétés du milieu : gradient naturel de propriétés, dégradations diffuses, ...), ce qui peut rendre difficile la détection et la caractérisation des discontinuités dans un massif rocheux. Nous avons conclu que ces deux techniques sont complémentaires en termes de volume d'investigation et de paramètres d'étude, ce qui a motivé notre étude de la réponse diagraphique des deux outils face à la présence d'une discontinuité dans une matrice rocheuse par le biais de modélisation.

La modélisation numérique menée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics (chapitre 3), a permis de mieux comprendre l'impact d'une couche fine horizontale, isolée, idéale, compliant, remplie et conductrice (électriquement) sur la réponse de deux outils diagraphiques FWS et DN. Deux modèles ont été réalisés avec des caractéristiques similaires : un en acoustique et un en électrique. Les niveaux d'incertitude numérique ont été déterminés : Pour le modèle acoustique, le seuil d'incertitude a été fixé à 2%, tandis que pour le modèle électrique, il a été fixé à 3%. Il convient de noter que le seuil d'incertitude relatif au traitement des signaux des données acoustiques a été établi à 4%.

Nous avons mené une analyse paramétrique en faisant varier plusieurs facteurs géométriques de la discontinuité (tels que l'ouverture ( $e$ ), la longueur ( $L$ )), ou physiques (tels que la vitesse de compression ( $VP_F$ ), la vitesse de cisaillement ( $VS_F$ ), la masse volumique ( $\rho_F$ ) des discontinuités remplies et le rapport de résistivité entre la matrice rocheuse et la discontinuité ( $C_{\left(\frac{RM}{DF}\right)}$ ). En considérant les propriétés mécaniques de la matrice rocheuse, nous avons développé une méthode pour évaluer les facteurs de perte de transmission en acoustique et en électricité. Ceux-ci sont construits comme un rapport entre la réponse du milieu discontinue, rapporté à la réponse du milieu homogène. Avec ces nouveaux observables l'analyse nous a permis de mesurer les variations de vitesse (facteur de variation de vitesse

:  $VV$ ) ainsi que l'atténuation des ondes P et S (facteur d'atténuation d'amplitude :  $\gamma'$ ) en acoustique, et la diminution de la résistivité (facteur de perte électrique :  $Vr$ ) en électrique.

En ce qui concerne les résultats acoustiques, nous avons observé une relation quasi-proportionnelle et non-linéaire entre le facteur de variation de vitesse ( $VV$ ) pour les ondes P et S et l'ouverture de la discontinuité. De plus, nous avons constaté que les ondes S sont deux fois plus sensibles à la présence et aux propriétés d'une discontinuité remplie que les ondes P en termes d'atténuation d'amplitude. Nous avons également noté que le facteur d'atténuation d'amplitude est insensible aux changements d'ouverture de la discontinuité lorsque celle-ci est plus grande que 1 cm, la réponse étant quasiment constante. Nous avons également remarqué une dépendance entre la longueur de la discontinuité, les facteurs de perte et la longueur d'onde des ondes. Nous avons perdu la sensibilité à la longueur de la discontinuité pour une longueur supérieure à deux fois la longueur d'onde prédominante. Par ailleurs, nous avons observé que la présence d'une discontinuité est plus remarquable en termes de facteurs de perte d'atténuation pour une matrice rocheuse plus rigide. Le rapport  $V_P/V_S$  et l'impédance acoustique de la matrice rocheuse influent sur le facteur de perte acoustique. Nous avons également constaté une complémentarité entre les facteurs de perte acoustique, avec chaque facteur révélant une sensibilité plus significative à une propriété géométrique ou mécanique de la discontinuité. Les facteurs de perte de l'onde de compression ( $VV_P$  et  $\gamma'_P$ ) sont plus sensibles aux changements de la vitesse de compression du remplissage, tandis que l'inverse est vrai pour les ondes S. D'autre part, la masse volumique du remplissage influence plus significativement les facteurs de perte d'atténuation ( $\gamma'$ ) et pas les facteurs de perte liés à la diminution de la vitesse de propagation d'onde ( $VV$ ). Le Tableau 6 - 1 résume les sensibilités entre les facteurs de perte acoustique et les propriétés géométriques et mécaniques d'une discontinuité remplie retenue de l'étude paramétrique. Enfin, nous avons souligné l'importance de prendre en compte les résultats de plusieurs récepteurs, car la différence de réponse entre les récepteurs augmente avec l'augmentation de l'ouverture et de la longueur de la discontinuité (pour  $L$  plus petit que la longueur d'onde de compression).

Tableau 6 - 1 : Sensibilités des facteurs de perte acoustique aux propriétés géométriques et mécaniques d'une discontinuité remplie. (+ représente que les facteurs sont sensibles, - représente qu'il n'y a pas de sensibilité).

|          | $VV_P$  | $VV_S$  | $\gamma'_P$   | $\gamma'_S$   |
|----------|---|---|---|---|
| $e$      | ++  | +++   | -<br>(Réponse constant pour $e > 0.5\text{cm}$ )    | -<br>(Réponse constant pour $e > 1\text{cm}$ )      |
| $L$      | +<br>$L < 2$ fois la longueur d'onde de compression | +<br>$L < 2$ fois la longueur d'onde de compression | +<br>$L < 2$ fois la longueur d'onde de compression | +<br>$L < 2$ fois la longueur d'onde de compression |
| $VP_F$   | +++   | +   | +++   | -   |
| $VS_F$   | -   | +++   | -   | ++  |
| $\rho_F$ | -   | -   | ++  | +++   |

En ce qui concerne les résultats électriques, nous avons observé que le facteur de perte électrique ( $Vr$ ) augmente avec l'augmentation des propriétés géométriques de la discontinuité et avec l'augmentation du contraste (massif/discontinuité). Nous avons également déduit que la sensibilité à la longueur de la discontinuité et au contraste augmente avec l'augmentation de l'espacement entre les électrodes d'injection. Ce qui souligne l'intérêt de prendre en compte la réponse pour plusieurs espacements.

En raison de la sensibilité de chaque facteur de perte acoustique ou électrique à une ou plusieurs propriétés de la discontinuité remplie, une étude d'analyse de données a été menée dans le chapitre 4. Pour cela une base de données numériques est constituée. Composée de 880 cas d'étude, elle est issue de la combinaison des cas des études paramétriques. L'étude visait à passer de la simple description des sensibilités respectives des méthodes acoustiques et électriques à l'évaluation des propriétés de la discontinuité par une approche multitechnique.

Les degrés de corrélation entre les différentes observables représentant les facteurs de pertes (acoustiques et électriques) et les différentes propriétés de la discontinuité (géométriques, mécaniques et électriques) ont été exploités pour identifier les facteurs de perte les plus sensibles à chaque propriété, dans le but d'optimiser le nombre de paramètres à prendre en compte et d'éliminer toute redondance dans les modèles de prédiction. L'analyse de données

a validé nos discussions en termes de sensibilités entre les paramètres et déterminés au chapitre 3. Avec la technique sonore, nous avons constaté que  $VV$  est fortement corrélé à l'ouverture de la discontinuité, tandis que les différents facteurs de perte sont corrélés à la longueur de la discontinuité. Les tests de corrélation ont également montré l'importance de considérer le rapport  $VP/VS$  et l'impédance acoustique de la matrice rocheuse pour une meilleure évaluation des propriétés géométriques de la discontinuité. De plus, la prise en compte du rapport de facteur de perte entre le premier et le deuxième récepteur acoustique a été mise en évidence comme étant importante pour identifier les propriétés géométriques de la discontinuité.

De même avec la technique électrique, le rapport des réponses des sondes de mesure électrique pour évaluer la longueur et le contraste de résistivité (matrice/discontinuité) a pu être exploité. Pour évaluer l'ouverture de la discontinuité, nous avons retenu la réponse de M8 qui fournit une réponse plus précise grâce à l'espacement réduit entre l'électrode de mesure et l'électrode d'injection. Nous avons exploité également la réponse de l'électrode M32 pour évaluer le contraste de résistivité, car un espacement plus important permet d'obtenir une sensibilité accrue au contraste.

Enfin, l'analyse de données a clairement mis en évidence l'intérêt de combiner les données acoustiques et électriques pour caractériser avec précision les propriétés géométriques d'une discontinuité remplie.

Après avoir identifié les observables les plus sensibles à chaque propriété, un travail de combinaison de données a été mis en place en utilisant deux approches, la régression multilinéaire non linéaire (RMNL) et les réseaux de neurones artificiels (RNA). Les résultats de prédiction pour les deux modèles sont relativement similaires, mais le modèle RNA a montré un potentiel plus élevé pour prédire les contrastes (matrice/discontinuité) surtout pour les contrastes inférieurs à 10, (avec une erreur de prédiction de 6% pour RNA et 250% pour RMNL). De même, le modèle RNA a montré une meilleure performance pour la prédiction de faible ouverture de la discontinuité pour  $e < 1$  cm (avec une erreur de prédiction de 35% pour RNA et 65% pour RMNL) ; ainsi que pour la longueur de la discontinuité de longueur intermédiaire entre 50 cm et 200 cm, (avec une erreur de 15% pour RNA et 85% pour RMNL). Le modèle RMNL est plus performant pour les contrastes de masse volumique supérieurs à 1.5 et pour les contrastes de cisaillement supérieurs à 4. En résumé, les deux modèles de prédiction ont montré un potentiel élevé pour prédire les propriétés des discontinuités.



L'application in situ sur le site de Bells Corner au Canada, à travers le forage BC84-5, a permis de démontrer l'efficacité de notre approche méthodologique. Le forage a été investigué de manière classique avec chacune des deux sondes (sonique FWS et électrique DN) en plus d'autres techniques (imagerie, ...). En l'absence d'éléments nous permettant d'évaluer l'extension ou les propriétés du matériau de remplissage de la discontinuité, seule l'estimation de l'ouverture est testée avec l'approche élaborée dans ces travaux de recherche et confrontées aux données issues de l'imagerie (donnant un élément sur l'ouverture de la discontinuité dans le forage).

Avant de confronter notre approche à l'ouverture observable, une étude a été menée pour évaluer la sensibilité de deux techniques face aux altérations dans la formation environnante. Nous avons constaté que les deux sondes permettent une approche qualitative efficace pour détecter les discontinuités dans un massif rocheux. Au cours de cette étude, des seuils d'incertitude ont été établis sur site et en conditions réelles pour les deux techniques. Un seuil de 5% a été déterminé pour les mesures acoustiques en termes d'amplitude et de 1% pour les temps d'arrivée des ondes. Quant aux mesures électriques, un seuil de 3% a été établi. La dernière étape de validation de cette thèse a consisté à sélectionner trois discontinuités présentant des ouvertures (d'ordre centimétrique entre 0.5 à 5 cm). La sélection de ces discontinuités a été contrainte par la nécessité de maintenir une distance minimale de 1.2 mètre entre chaque discontinuité à l'extrémité afin de se rapprocher de la situation où une discontinuité serait isolée. En outre l'inclinaison des discontinuités réelles sélectionnées, ou encore la variabilité naturelle du massif rocheux en fonction de la profondeur sont des éléments qui nous éloignent du cas idéal modélisé qui supporte cette étude : En dépit de ces écarts, les résultats obtenus montrent une cohérence satisfaisante entre les prédictions basées sur les mesures FWS et DN et les observations, soulignant ainsi la pertinence de notre méthodologie de travail pour évaluer avec une précision centimétrique l'ouverture de la discontinuité.

Les perspectives de notre travail se décomposent selon trois dimensions : modélisation, combinaison de données et validation :

- En ce qui concerne la modélisation, à court terme, nous envisageons d'élargir le domaine des paramètres en étudiant l'ouverture de l'ordre du millimètre, en modifiant le diamètre de forage et la nature du fluide de forage. À moyen terme, nous souhaitons réaliser une modélisation en 3D pour représenter des cas plus complexes où la fissure n'est pas

horizontale, homogène et centrée sur le forage, en intégrant rapidement le paramètre d'inclinaison dans les simulations.

- En ce qui concerne la combinaison de données, nous envisageons de réintégrer la sensibilité différente entre les sondes de différentes dimensions pour une même méthode. Les premiers travaux visaient à réduire les redondances d'information, et ont donc conduit à supprimer certaines informations en première approche. À moyen terme, réintégrer les sensibilités à un même objet (la discontinuité) pour différents volumes d'investigations semble une voie prometteuse pour renforcer la capacité de description de la discontinuité. Au-delà des aspects techniques de mesures, l'utilisation d'autres méthodes de combinaison, comme l'utilisation d'outils d'apprentissage artificiel bayésien, est une option intéressante à envisager. Le fait que cette approche ouvre la voie à la prise en compte de la variabilité et de l'incertitude des données en utilisant des probabilités plutôt que des valeurs précises semble adapté à la prise en compte des nombreuses sources non maîtrisées dans le milieu réel.
- En termes de validation et d'application à plus long terme, un travail sur banc d'essai maîtrisé serait très pertinent pour notamment pouvoir valider l'approche sur les paramètres d'extension ( $L$ ) ou les paramètres physiques (mécaniques et électriques) non contrôlables en conditions réelles.

La recherche a montré que la combinaison de deux techniques, à savoir les sondes FWS et DN électrique normale, peut être utilisée pour caractériser les propriétés géométriques, mécaniques et électriques d'une discontinuité remplie et isolée dans un massif rocheux. Cette approche a permis d'accéder à des paramètres de discontinuité qui ne pouvaient pas être évalués auparavant à l'aide de la méthode FWS seule ou de la méthode DN seule. C'est la seule méthode à ce jour qui permettent d'estimer une ouverture (de manière validée avec une résolution d'ordre centimétrique) et d'accéder à d'autres caractéristiques normalement non recherchées par manque d'outil. Cela permet de mieux comprendre et diagnostiquer les propriétés d'un endommagement dans un massif rocheux.

L'approche de combinaison de données a été validée sur un cas réel avec des résultats encourageants, malgré certaines simplifications des hypothèses. Bien que la méthode ait été développée pour une discontinuité isolée et normale au forage, centrée et homogène dans un milieu homogène, elle offre des perspectives prometteuses pour la caractérisation des discontinuités dans des conditions réelles. Cependant, cette recherche souligne la nécessité

de réaliser des études spécifiques pour évaluer l'influence des paramètres de réalité (hétérogénéité du massif, de la discontinuité, etc.).

Les résultats de cette étude peuvent être généralisés à d'autres types de supports géologiques, tels que les massifs calcaires présentant des schémas de fracturation différents de ceux des massifs cristallins. Toutefois, cette recherche ne traite pas de la question de l'évolution des propriétés mécaniques et des équilibres dans le massif, qui est pertinente pour des sujets tels que le stockage de CO<sub>2</sub> ou l'exploitation de certains réservoirs. En outre, cette recherche peut être mise en relation avec les études sur les transferts dans les massifs pour explorer les applications possibles du couplage géomécanique-propriétés de transferts dans les travaux futurs.

# Annexe

## Annexe 1

- Synthèse des caractéristiques des diagraphies sonique (FWS) et électrique (DN)

Le Tableau A1 - 1 ci-contre est un tableau synthétique dans lequel on présente les résultats obtenus, l'intérêt et les inconvénients des diagraphies soniques et électrique.

*Tableau A1 - 1 : Synthèse et évaluation des méthodes de mesure par diagraphies différées.*

| <b>Outil</b> | <b>Données inférées</b>   | <b>Intérêt</b>  | <b>Inconvénients</b>                         |
|--------------|---|---|--|
| Sonique      | -Porosité et lithologie;<br>-Fracturation;<br>-Perméabilité, à partir de l'analyse des ondes de Stoneley.                 | -Données obtenues et profondeur d'investigation importante<br>-Mesure rapide qui peut être couplée aux autres mesures puits ouvert.<br>-Estimation de la perméabilité de fractures. | -Faible résolution verticale en mode dipôle. |
| Résistivité  | -Détermination de la résistivité de la formation;<br>-Détermination du profile d'invasion;<br>-Estimation de la porosité. | -Estimation de la résistivité in situ;<br>-Localisation des zones potentiellement productrices en comparant résistivité proche et lointaine;  | -Pas d'estimation directe de la porosité.    |

Le Tableau A1 - 2 présente les différents paramètres mécaniques et géométriques du massif rocheux qu'on peut déterminer en se basant sur les différents outils d'auscultations.

Tableau A1 - 2 : Synthèse des équations existant qui relient les différents paramètres mécaniques et géométriques du massif rocheux et les différents outils d'auscultations.

| Paramètres   | Symbol e                            | Fonction  | Commentaire   |   |
|--|-------------------------------------|---|---|---|
| <b>Acoustique</b>  |                                     |   |   |   |
| Coefficient de Poisson   | $\nu$                               | $\frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2}{1 - \left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2}$ | Il est indispensable de mesurer la valeur de $V_P$ et $V_S$ pour obtenir la valeur de $\nu$ |   |
| Module de Young  | $E$                                 | $\rho \frac{V_P^2 (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$  | $\rho$ est déterminé de la diaggraphie Rhob, mesuré au laboratoire.                         |   |
| Porosité   | $\Phi$<br><i>Porosité primaire</i>  | $\frac{(\Delta t_{mat} - \Delta t_{mes})}{(\Delta t_{mat} - \Delta t_{fl})}$              |   |   |
| <b>Électrique</b>  |                                     |   |   |   |
| Degré de saturation  | $S_w$                               | $\left(\frac{a R_w}{R_t \phi^m}\right)^{\frac{1}{n}}$                                     | Paramètre   | Détermination                             |
|  |                                     |   | $R_t$   | Outil de résistivité profonde             |
|  |                                     |   | $R_w$   | SP, échantillon                           |
|  |                                     |   | $\phi$  | Densité, sonique,                         |
|  |                                     |   | $m$   | Mesuré au laboratoire, estimé             |
| Porosité   | $\Phi$<br><i>Porosité effective</i> | $\left(\frac{a R_t}{R_w}\right)^{\frac{1}{m}}$  | Paramètre   | Détermination                             |
|  |                                     |   | $R_t$   | Pour une formation saturé : zone de lavée |
| a et m sont estimés selon la lithologie, n généralement est d'environ 2. |                                     |   |   |   |

## Annexe 2

- Annexe 2 A

- Amortissement de Rayleigh

L'amortissement de Rayleigh est représenté par la matrice suivante qui dépend de deux composants proportionnels à la masse (M) et à la rigidité (K).

$$C = \alpha M + \beta K$$

- $\alpha$  : représente la constante d'amortissement proportionnelle à la masse  $\alpha = \xi \omega_{min}$  ;
- $\beta$  : représente la constante d'amortissement proportionnelle à la rigidité  $\beta = \xi / \omega_{min}$  ;
- $\xi$  : représente l'amortissement ;
- $\omega_{min}$  : représente la pulsation propre  $\omega_{min} = \frac{f_{min}}{2\pi}$ .

On doit donc introduire une couche absorbante hétérogène avec un coefficient d'amortissement croissant. Si l'on choisit une couche absorbante homogène, le contraste de vitesses entre la couche élastique et la couche absorbante pourrait avoir un effet trop important. Notons que l'épaisseur de la couche absorbante est égale à la longueur de l'onde associée à la plus haute fréquence (Semblat et al., 2011) (Tableau A2 - 1).

Tableau A2 - 1 : Coefficients d'amortissement de différentes couches absorbantes.

|          | Unité | 1 <sup>ère</sup> couche | 2 <sup>e</sup> couche | 3 <sup>e</sup> couche |
|----------|-------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| $\xi$    | %     | 35                      | 70                    | 100                   |
| $\alpha$ | 1/s   | 2.7                     | 5.6                   | 8                     |
| $\beta$  | S     | 0.04                    | 0.08                  | 0.12                  |

## Annexe 3

- Annexe 3 A
  - Test d'hypothèse

Un test d'hypothèse pour un test de corrélation est utilisé pour déterminer s'il existe une relation statistiquement significative entre deux variables. L'hypothèse nulle d'un test de corrélation est généralement qu'il n'y a pas de corrélation entre les deux variables, représentée par le symbole "rho" ( $\rho$ ) égal à zéro. L'hypothèse alternative est qu'il existe une corrélation entre les deux variables, représentée par le symbole "rho" ( $\rho$ ) différent de zéro.

Pour effectuer un test d'hypothèse pour un test de corrélation, premièrement il faut calculer le coefficient de corrélation de l'échantillon ( $r$ ) et la taille de l'échantillon ( $n$ ) à partir des données. Deuxièmes, un test statistique doit être appliqué, telle que la statistique  $t$ , pour déterminer la probabilité d'observer un coefficient de corrélation aussi grand ou plus grand que celui calculé à partir des données de l'échantillon, en supposant que l'hypothèse nulle est vraie. La valeur  $p$  est utilisée pour représenter cette probabilité.

Si la valeur  $p$  est inférieure au niveau de signification choisi (généralement 0.05 ou 0.01), vous rejetterez l'hypothèse nulle et conclurez qu'il existe une corrélation statistiquement significative entre les deux variables. Si la valeur  $p$  est supérieure au niveau de signification choisi, vous ne rejetterez pas l'hypothèse nulle et conclurez qu'il existe une corrélation statistiquement significative entre les deux variables.

Le test  $t$  est un test statistique utilisé pour déterminer s'il existe une différence significative entre les moyennes de deux groupes. Il existe plusieurs types de tests  $t$ , notamment le test  $t$  de Student, le test  $t$  indépendant et le test  $t$  apparié. Le test  $t$  de Student (test  $t$ ), est utilisé pour déterminer si la moyenne d'un seul échantillon est différente de la moyenne d'une population connue.

Le test  $t$  est basé sur la distribution  $t$ , qui représente une distribution probabiliste utilisée pour calculer la probabilité d'observer une certaine valeur de la statistique  $t$ , en supposant que l'hypothèse nulle est vraie. La statistique  $t$  est calculée en prenant la différence entre la moyenne de l'échantillon et la moyenne de la population, divisée par l'erreur standard de la moyenne.

Le test t est utilisé pour déterminer si la moyenne de l'échantillon est différente d'une moyenne de population connue. Le test t est utilisé pour déterminer si les moyennes de deux échantillons indépendants sont différentes l'une de l'autre. Il est également utilisé pour déterminer si les moyennes de deux échantillons liés ou dépendants sont différentes l'une de l'autre. Les résultats d'un test t sont généralement présentés sous la forme d'une valeur p, qui représente la probabilité d'observer une statistique t aussi grande ou plus grande que celle calculée à partir des données de l'échantillon, en supposant que l'hypothèse nulle est vraie. Il est important de noter que le test t suppose que les données sont normalement distribuées et ont des variances égales. Si ces hypothèses ne sont pas respectées, d'autres tests, tels que des tests non paramétriques, doivent être utilisés.

- Annexe 3 B

- Analyse des composantes principales ACP

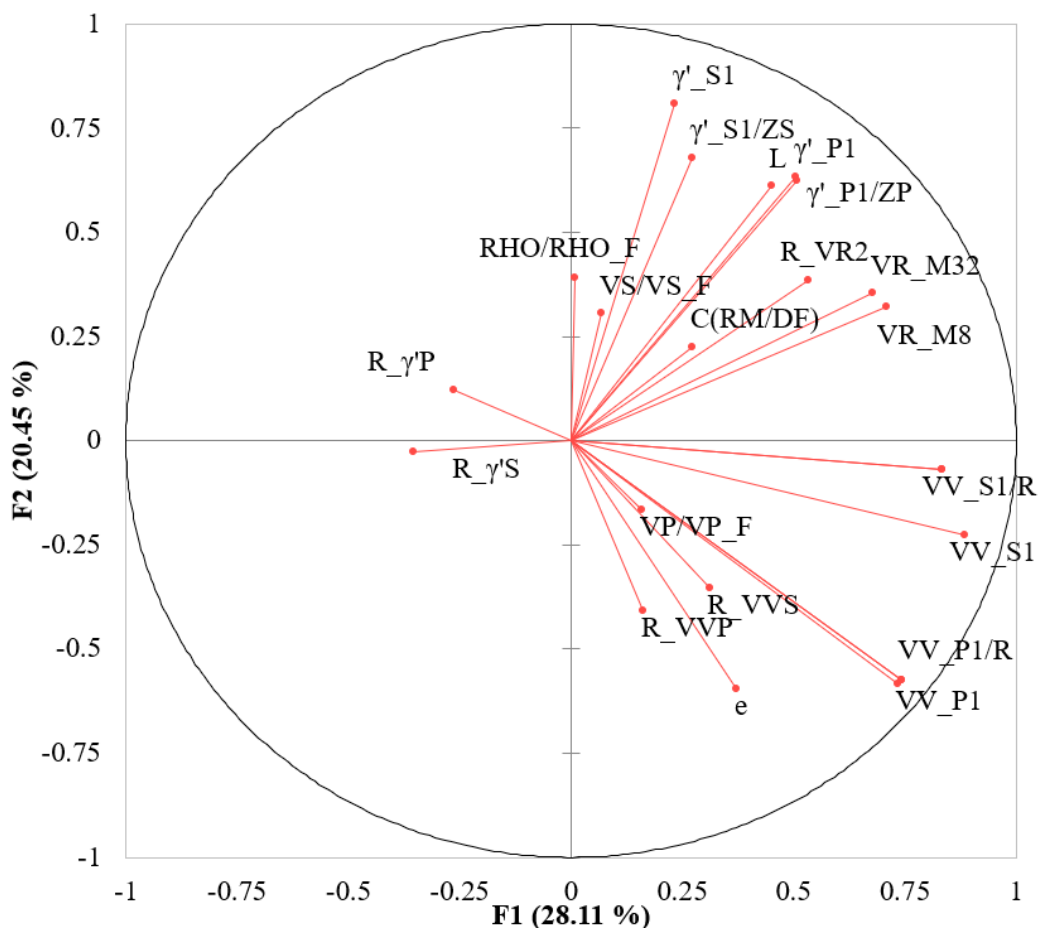


Figure A3 - 1 : Analyse (ACP) sur les axes F1, et F2. Pour les différentes variables de sorties et d'entrées déterminées par l'analyse de corrélation sont représentés.



- Annexe 3 C

- Régression simple

Les tableaux (35 ; 39) présentent les coefficients de détermination entre les différentes propriétés mécaniques, électriques et géométriques d'une discontinuité remplie et les différentes variables qui sont les plus corrélées à chaque propriété, pour différents types de fonction.

Tableau A3 - 1 : Coefficient de détermination  $R^2$  de la régression simple entre la longueur de la discontinuité et les différentes variables d'entrées ( $VV_{P1}/R_V; VV_{S1}; \gamma'_{P1}; \gamma'_{S1}; R_{VV_P}; R_{VV_S}; Vr_{M16}$ ) pour différents types de fonction.

|                    | 1ère ordre | 2ème ordre | 3ème ordre | Exp  | Puiss | Log  |
|--------------------|------------|------------|------------|------|-------|------|
| $VV_{P1}$          | 0.01       | 0.05       | 0.11       | 0.01 | 0.01  | 0.04 |
| $VV_{S1}$          | 0.12       | 0.14       | 0.26       | 0.11 | --    | --   |
| $\gamma'_{P1}/Z_P$ | 0.57       | 0.59       | 0.65       | 0.52 | --    | --   |
| $\gamma'_{S1}/Z_S$ | 0.5        | 0.52       | 0.56       | 0.45 | --    | --   |
| $R_{VV_P}$         | 0.05       | 0.21       | 0.24       | 0.03 | 0.12  | 0.02 |
| $R_{\gamma'S}$     | 0.09       | 0.13       | 0.19       | 0.08 | --    | --   |
| $Vr_M$             | 0.22       | 0.22       | 0.23       | 0.21 | 0.2   | 0.2  |
| $R_{Vr2}$          | 0.03       | 0.13       | 0.18       | 0.02 | --    | --   |

Tableau A3 - 2 : Coefficient de détermination  $R^2$  de la régression simple entre ( $VP/VP_F$ ) est les différentes variables d'entrées ( $VV_{P1}/R_V; VV_{S1}; \gamma'_{P1}; \gamma'_{S1}; R_{VV_P}; R_{VV_S}; Vr_{M16}$ ) pour différents types de fonction.

|                | 1ère ordre | 2ème ordre | 3ème ordre | Exp  | Puiss | Log  |
|----------------|------------|------------|------------|------|-------|------|
| $VV_{P1}$      | 0.43       | 0.73       | 0.75       | 0.54 | 0.27  | 0.12 |
| $VV_{S1}$      | 0.02       | 0.04       | 0.11       | 0.02 | --    | --   |
| $\gamma'_{P1}$ | 0.06       | 0.23       | 0.36       | 0.06 | --    | --   |

Tableau A3 - 3 : Coefficient de détermination  $R^2$  de la régression simple entre ( $VS/VS_F$ ) est les différentes variables d'entrées ( $VV_{P1}/R_V; VV_{S1}; \gamma'_{P1}; \gamma'_{S1}; R_{VV_P}; R_{VV_S}; Vr_{M16}$ ) pour différents types de fonction.

|                | 1ère ordre | 2ème ordre | 3ème ordre | Exp  | Puiss | Log  |
|----------------|------------|------------|------------|------|-------|------|
| $VV_{S1}/R_V$  | 0.19       | 0.48       | 0.5        | 0.21 | --    | --   |
| $\gamma'_{S1}$ | 0.04       | 0.14       | 0.15       | 0.05 | --    | --   |
| $VV_{P1}$      | 0.01       | 0.03       | 0.10       | 0.01 | 0.01  | 0.04 |

Tableau A3 - 4 : Tableau 1: Le coefficient de détermination  $R^2$  de la régression simple entre  $(\rho/\rho_F)$  est les différentes variables d'entrées ( $VV_{P1}/R_V; VV_{S1}; \gamma'_{P1}; \gamma'_{S1}; R_{VV_P}; R_{VV_S}; Vr_{M16}$ ) pour différents types de fonction.

|                | 1ère ordre | 2ème ordre | 3ème ordre | Exp  | Puiss | Log |
|----------------|------------|------------|------------|------|-------|-----|
| $\gamma'_{P1}$ | 0.05       | 0.3        | 0.33       | 0.06 | --    | --  |
| $\gamma'_{S1}$ | 0.06       | 0.3        | 0.38       | 0.1  | --    | --  |

Tableau A3 - 5 : Tableau 2: Le coefficient de détermination  $R^2$  de la régression simple entre  $C_{(RM/DF)}$  est les différentes variables d'entrées ( $VV_{P1}/R_V; VV_{S1}; \gamma'_{P1}; \gamma'_{S1}; R_{VV_P}; R_{VV_S}; Vr_{M16}$ ) pour différents types de fonction.

|            | 1ère ordre | 2ème ordre | 3ème ordre | Exp  | Puiss | Log |
|------------|------------|------------|------------|------|-------|-----|
| $Vr_{M32}$ | 0.31       | 0.41       | 0.46       | 0.42 | --    | --  |
| $R_{Vr2}$  | 0.28       | 0.29       | 0.59       | 0.17 | --    | --  |

Forme des équations :

- ✓ Polynomial 1ère ordre :  $pr1+pr2*X1$
- ✓ Polynomial 2ème ordre :  $pr1+pr2*X1+pr3*X1^2$
- ✓ Polynomial 3ème ordre :  $pr1+pr2*X1+pr3*X1^2+pr4*X1^3$
- ✓ Exponentielle :  $pr1*\exp(pr2*X1)$
- ✓ Puissance :  $X1^{pr1}$
- ✓ Logarithmique :  $pr1*\text{Log}10(X1)+pr2$

- Annexe 3 D

- Optimisation du code :

L'optimisation par lots (batch) est un outil nécessaire pour accélérer le processus d'optimisation pour les grands ensembles de données. Lorsque l'ensemble de formation est relativement petit, nous pouvons simplement utiliser tous les échantillons pour régler le modèle simultanément. Cependant, lorsque l'ensemble de formation est trop grand, il est très lent d'évaluer la contribution de tous les échantillons à chaque mise à jour. Ceci est critique pour les réseaux neuronaux car les paramètres sont mis à jour lors de passages répétés en avant et en arrière. Normalement, nous n'évaluons qu'une petite proportion des échantillons de formation, que l'on appelle un mini-batch, pour chaque mise à jour.

L'optimisation Adam est un optimiseur récemment proposé pour les réseaux neuronaux il est largement considéré comme le meilleur optimiseur actuellement disponible. Lorsque nous utilisons l'optimiseur Adam, nous avons 4 hyperparamètres :  $\beta_1$  (paramètre de décroissance du gradient, normalement fixé à 0.9) ;  $\beta_2$  (paramètre de décroissance du gradient au carré, normalement fixé à 0.999) ;  $\alpha$  (taux d'apprentissage) et  $\epsilon$  (une très petite valeur pour éviter la division par 0, par exemple  $10^{-6}$ ). Adam est souvent recommandé comme optimiseur par défaut (Chenhao, 2018 ; LeCun et al., 2015 ; Kingma et al., 2014).

La Figure A3 - 2 représente comment la perte d'apprentissage de validation diminue et se converge au cours des itérations pour la prédiction des différentes propriétés de la discontinuité. Ce qui implique que notre modèle n'est pas sur-ajusté.

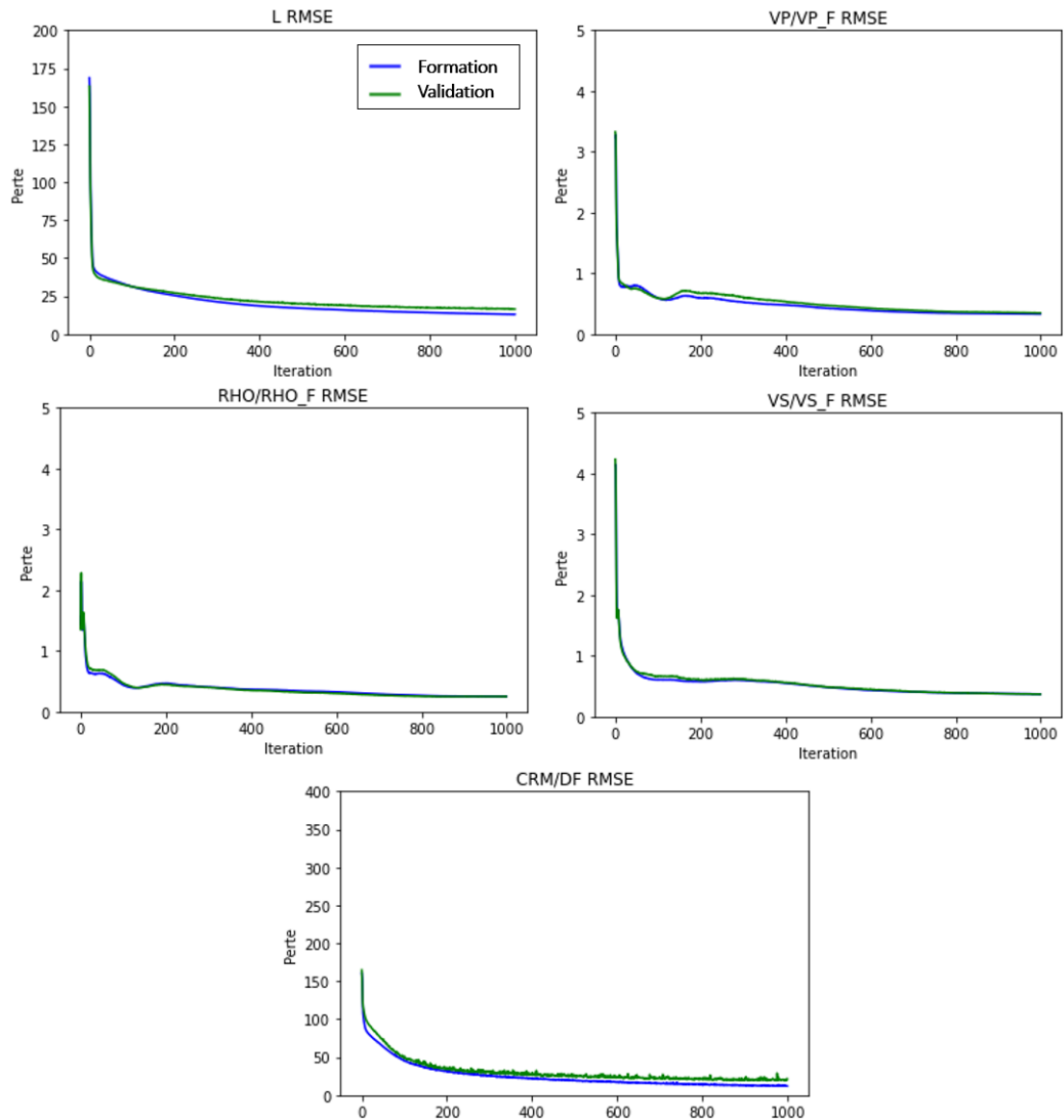


Figure A3 - 2 : (RMSE) du réseau en fonction du nombre d'itération pour les différentes propriétés d'une discontinuité.

- Code : Réseaux de neurones (multi-input ; multi-output)

```
# Use seaborn for pairplot.
import pandas as pd
import tensorflow as tf
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from tensorflow.keras.models import Model
from tensorflow.keras.layers import Dense, Input
from sklearn.model_selection import train_test_split
print(tf.__version__)
```

```

#data
raw_dataset = pd.read_excel('fichier_donnes3.xlsx')
dataset = raw_dataset.copy()
dataset.tail()

#clean the data
dataset.isna().sum()
dataset = dataset.dropna()

#train and test
train,test = train_test_split(dataset, test_size=0.2, random_state = 1)
train,val = train_test_split(train, test_size=0.2, random_state = 1)

#norm equation
# Helper functions
def norm(x):
    return (x - train_stats['mean']) / train_stats['std']

#separate the y fromthe rest of the data
def format_output(dataset):
    y1 = dataset.pop('e')
    y1 = np.array(y1)
    y2 = dataset.pop('L')
    y2 = np.array(y2)
    y3 = dataset.pop('VP/VP_F')
    y3 = np.array(y3)
    y4 = dataset.pop('VS/VS_F')
    y4 = np.array(y4)
    y5 = dataset.pop('RHO/RHO_F')
    y5 = np.array(y5)
    y6 = dataset.pop('C(RM/DF)')
    y6 = np.array(y6)

```

```

return y1, y2, y3, y4, y5, y6

#normalizer
train_stats = train.describe()
train_stats.pop('e')
train_stats.pop('L')
train_stats.pop('VP/VP_F')
train_stats.pop('VS/VS_F')
train_stats.pop('RHO/RHO_F')
train_stats.pop('C(RM/DF)')
train_stats = train_stats.transpose()
train_Y = format_output(train)
test_Y = format_output(test)
val_Y = format_output(val)

# Normalize the training and test data
norm_train_X = np.array(norm(train))
norm_test_X = np.array(norm(test))
norm_val_X = np.array(norm(val))

#dnn model definition
def build_model():
    input_layer = Input(shape=(len(train .columns),))
    first_dense = Dense(units='200', activation='relu')(input_layer)
    y1_output = Dense(units='1', name='e_output')(first_dense)
    y2_output = Dense(units='1',name='L_output')(first_dense)
    y3_output = Dense(units='1',name='VP/VP_F_output')(first_dense)
    y4_output = Dense(units='1',name='VS/VS_F_output')(first_dense)
    y5_output = Dense(units='1',name='RHO/RHO_F_output')(first_dense)
    y6_output = Dense(units='1',name='CRM/DF_output')(first_dense)

    # and a list of output layers
    model = Model(inputs=input_layer,outputs=[y1_output, y2_output, y3_output,
y4_output, y5_output, y6_output])

```

```

return model

model = build_model()# Specify the optimizer, and compile the model with loss functions
for both outputs
optimizer = tf.keras.optimizers.SGD(learning_rate=0.001)
model.compile(optimizer=optimizer,loss={'e_output': 'mse', 'L_output': 'mse',
'VP/VP_F_output': 'mse', 'VS/VS_F_output': 'mse', 'RHO/RHO_F_output': 'mse',
'CRM/DF_output': 'mse'},
metrics={'e_output':tf.keras.metrics.RootMeanSquaredError(),'L_output':tf.keras.metrics.R
ootMeanSquaredError(),'VP/VP_F_output':tf.keras.metrics.RootMeanSquaredError(),'VS/
VS_F_output':tf.keras.metrics.RootMeanSquaredError(),'RHO/RHO_F_output':tf.keras.me
trics.RootMeanSquaredError(),'CRM/DF_output':tf.keras.metrics.RootMeanSquaredError(
)})

# Train the model for 100 epochs
history = model.fit(norm_train_X, train_Y, epochs=10000,validation_split=0.2,
validation_data=(norm_test_X, test_Y))

# Test the model and print loss and rmse for both outputs
loss,Y1_loss,Y2_loss,Y3_loss,Y4_loss,Y5_loss,Y6_loss,Y1_rmse,Y2_rmse,Y3_rmse,Y4_
rmse,Y5_rmse,Y6_rmse=model.evaluate(x=norm_val_X, y=val_Y)

```

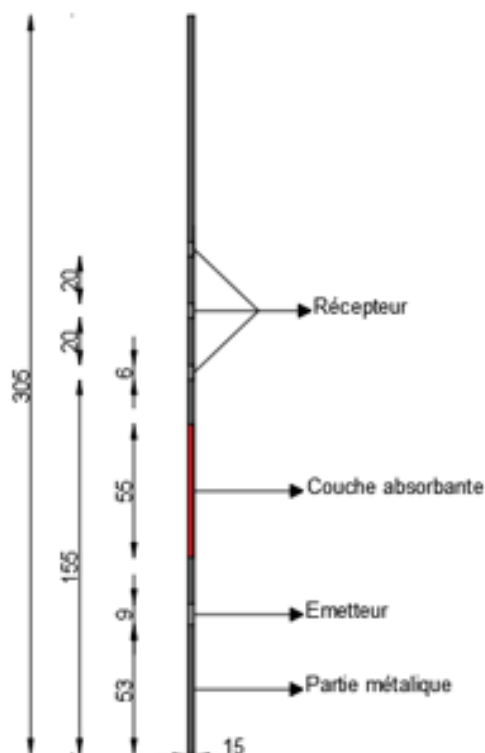
## Annexe 4

- Annexe 4 A
- Protocole expérimentale pour la sonde FWS

# Protocole de mesure avec la sonde FWV 2SAA-1000-F

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 diaggraphie 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.



## Matériel utilisé

### FWV 2SAA-1000-F

- 1- La sonde FWV 2SAA-1000-F sert à collecter la réponse du massif représenté par la pression en fonction du temps (donc de collecter la vitesse et l'amplitude de différents types des ondes).

La sonde est formée d'un transmetteur, 3 récepteurs et une couche absorbante.

### Câble

- 2- 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.

### Treuil Principal

- 3- Le treuil principal peut dérouler plusieurs dizaine de mètres de câble.

### Système d'acquisition Matrix

- 4- Le système d'acquisition Matrix est un composé électronique moderne permettant de recueillir des informations analogiques et de les transformer en numérique de sorte à être utilisés par un ordinateur.

### Ordinateur

- 5- L'ordinateur permet de recueillir toutes les informations de manière numérique à l'aide du logiciel Matrix. Ce dernier contrôle également le système d'acquisition et à fortiori, l'enregistrement des mesures.

## Mise en place

- 1- Connection le treuil et le sonde

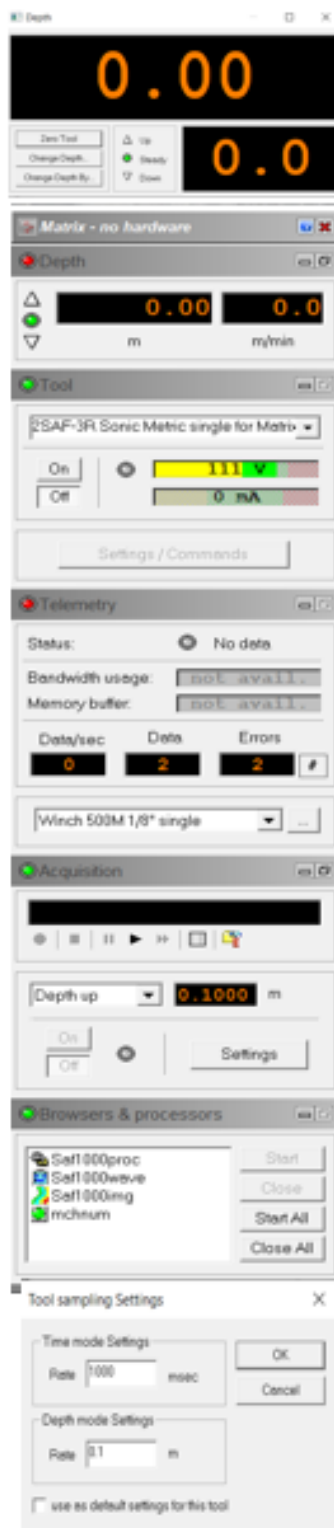
- 2- Mise en plase du système:

- Connection Matrix avec le treuil
- Connection Mtarix avec l'ordinateur
- Alimentation de la centrale et du PC
- Allumer le PC

- 3- Configuration de la prise d'acquisition:

- Démarrer le logiciel Matrix: Il faut avoir préalablement charger les fichiers de l'outil pour qu'une reconnaissance du PC soit possible
- Mise sous tension de l'outil
- Vérification des communications et du fonctionnement de l'outil
- Mettre l'outil dans le trou du forage et définir le point de référence

## 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 Matrix en cliquant sur **Depth change**
- 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 ( $L_s = 3.05$  m).

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

#### Setting and commands du tool (annexe 1):

#### • **Transmitter :**

**Fréquence :** Fréquence central de l'onde, dépend des ondes qu'on voudrait les récupérer

**Stack interval :** temps nécessaire pour que l'énergie en cours de propagation se dissipe avant de transmettre une autre pique d'énergie.

**Number of stacks:** le nombre de fois qu'on répète l'analyse au niveau de la même position

#### • **Receiver :**

**Gain:**

**Holdoff time:** est la période entre le déclenchement de l'émetteur et le début de l'échantillonnage des données.

**Sample rate:** est l'intervalle de temps auquel le récepteur échantillonne l'onde incidente et convertit l'amplitude de l'onde actuelle en un nombre numérique. Plus la fréquence de l'émetteur est élevée, plus la fréquence d'échantillonnage nécessaire est élevée.

**Number of samples:** le **Number of samples** avec le **Sample rate** détermine la durée pendant laquelle le récepteur enregistrera.



### 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

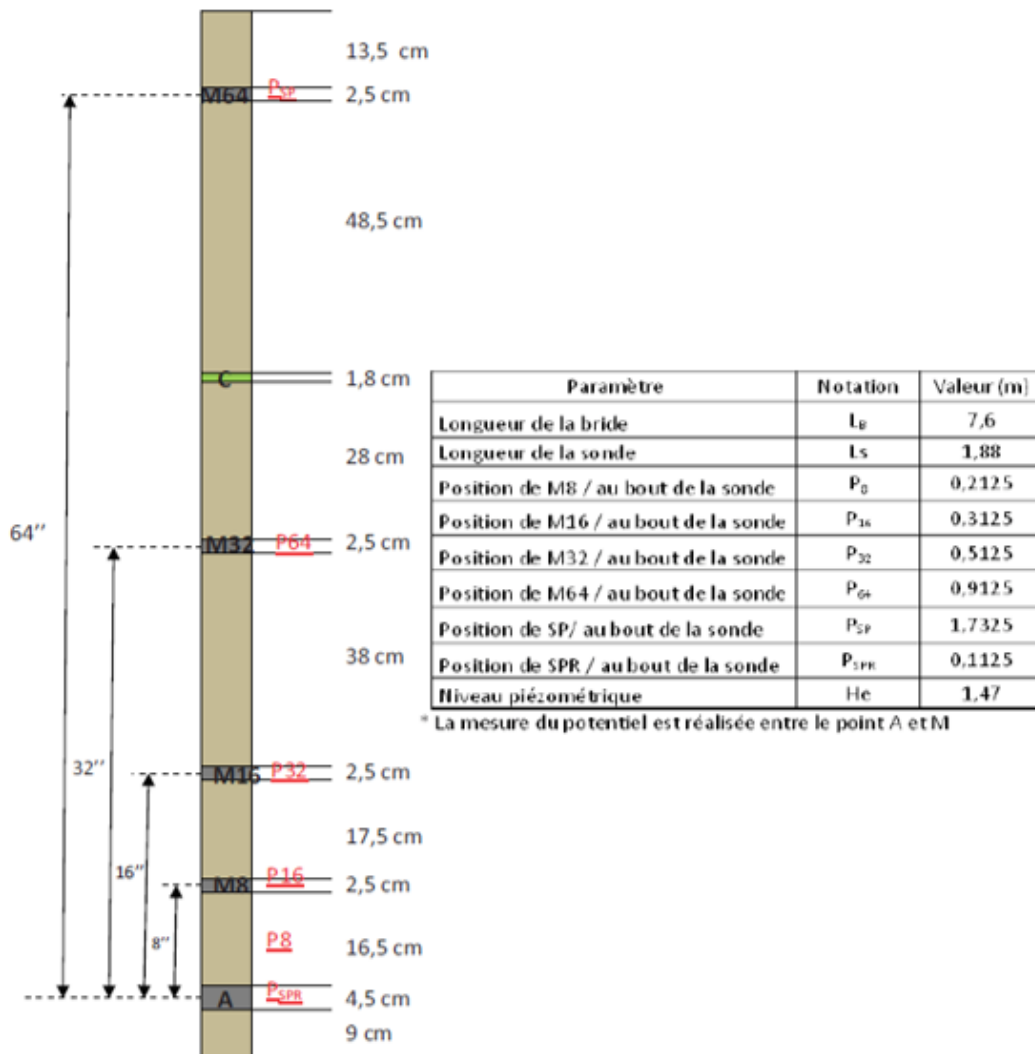
### 5- Pour terminer l'acquisition, appuyer sur **Stop**

- Annexe 4 B
- Protocole expérimentale pour la sonde DN

## Protocole de mesure avec 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*

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

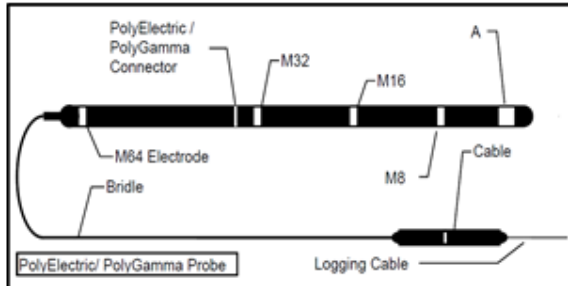
*La présence d'une prise terre entre 8 m et 25 m du forage*

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

- La diaggraphie 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.
- La géométrie du forage, de parts 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 15 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 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.
- 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.

## Matériel utilisé

### Sonde 2PEA-1000



- 1- La sonde PolyElectric 2PEA-1000 effectue 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)

### Bride

- 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.

### Treuil Secondaire

- 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.

### Câble

- 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.

### Treuil Principal

- 5- Le treuil principal peut dérouler plusieurs dizaine de mètres de câble.

### Système d'acquisition Matrix

- 6- Le système d'acquisition Matrix est un composé électronique moderne permettant de recueillir des informations analogiques et de les transformer en numérique de sorte à être utilisés par un ordinateur.

### Electrode B

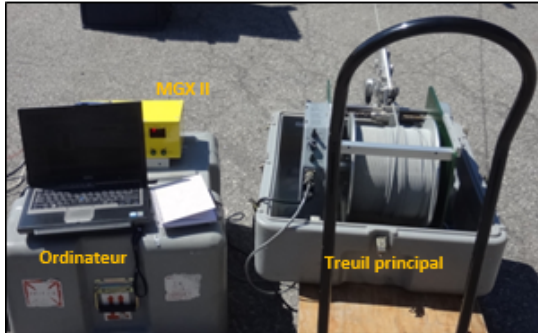
- 7- Le mudplug représente l'électrode B. Il est directement relié au système d'acquisition et est planté dans le sol afin d'avoir un bon couplage électrique.

### Ordinateur

- 8- L'ordinateur permet de recueillir toutes les informations de manière numérique à l'aide du logiciel Logger©. 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 :



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

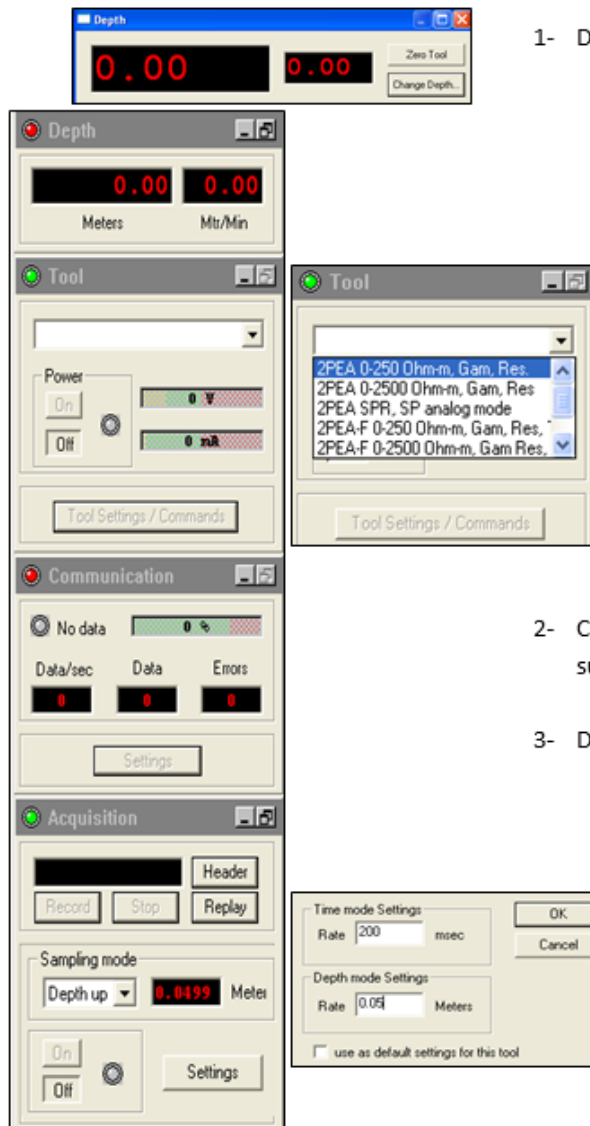
- 4- Configuration de la prise d'acquisition:

- Démarrer le logiciel Logger©: Il faut avoir préalablement chargé 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.

Au niveau de l'installation du matériel, la position de B et de la sonde dans le forage sont deux critères à prendre en compte. De parts les études effectuées sur un même forage, on peut, aujourd'hui, 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.**

Même si les diamètres des forages sont petits, il est conseillé de **placer des centreurs** pour une bonne répartition du courant dans le fluide et la structure. Ils devront être **non-conducteurs** pour éviter tous biais de mesure et suffisamment ajuster au forage pour faciliter le passage de la sonde et éviter l'appui sur un côté du forage.

## 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 Logger 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



- Annexe 4C

- Fiche technique: QL40-ABI-2G-Acoustic televiewer

### Description

The QL40-ABI-2G is the latest generation of acoustic televiewers based on 20 years of experience and market leadership. The new system consists of a completely redesigned acoustic sensor and new electronics.

The acoustic borehole imager records a 360°unwrapped and 3D image of the borehole wall. The tool emits an ultrasonic beam towards the formation and records the amplitude and the travel time of the reflected signal. The amplitude record is representative of the impedance contrast between the rocks and fluid. The travel time is used to determine accurate borehole diameter data, which makes the tool ideal for borehole deformation description – stress field analysis and casing inspection.

A built in high precision orientation package incorporating a 3 axis fluxgate magnetometer and 3 accelerometers allows orientation of the images to a global reference and determination of the borehole’s azimuth and inclination. Sophisticated algorithms and real time processes are also implemented to extend the tool applications for casing thickness measurement, corrosion evaluation and measurement behind a PVC casing.

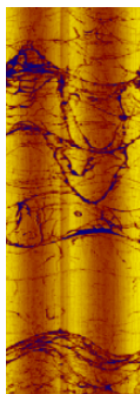
There are three acoustic televiewer options available:

- **QL40-ABI-2G:** Newest high resolution, slim acoustic televiewer. It is stackable within the Quick Link (QL) product line or it can be run as a standalone tool.
- **ABI40-GR:** Standalone tool integrating a built in natural gamma sensor.
- **QL40-ABI-VLB:** Very Large Borehole (VLB) acoustic televiewer specially designed to assess the integrity of large diameter wells. Implements the latest hardware/firmware to perform casing thickness measurement, corrosion evaluation and cement bond mapping in one run.

Read the [Release Note](#) for the latest QL40-ABI-2G!

### Applications

- Detailed and oriented caliper and structural information
- Borehole deformation (stress field analysis)
- Fracture detection and evaluation
- Breakout analysis
- Detection of thin beds
- Determination of bedding dip
- Lithology characterizations
- Rock strength
- Casing inspection and corrosion evaluation
- Steel casing thickness



### Operating Conditions

#### Borehole Fluid

- Water
- Mud
- Dry

#### Casing

- Uncased
- PVC Borehole
- Steel

#### Centralization

- Required
- Not Necessary





## Features & Benefits

- Higher logging speed – speed of rotation of the mirror can reach up to 35 rps
- Choice of azimuthal resolutions extended up to 360 acoustic traces per mirror revolution – higher image resolution obtained in bigger diameter boreholes
- Dynamic range of the measurement extended to 16 bits
- Improved signal/noise ratio – better results obtained in adverse borehole conditions
- Casing thickness algorithms and process refined
- Behind PVC operating mode available
- Acoustic head ruggedized to prevent coax failure
- Software interface reviewed for optimizing the tool settings

## Specifications – Metric/English

| Specification | Metric  | Imperial  |
|---------------|---------|-----------|
| Diameter      | 40 mm   | 1.57 in.  |
| Length        | 1.61 m  | 63 in.    |
| Weight        | 6.7 kg  | 14.7 lbs. |
| Max. Temp.    | 70 °C   | 158 °F    |
| Max. Pressure | 200 bar | 2900 psi  |

**Acoustic Sensor:** Fixed transducer, rotating focusing mirror

**Focus Optimized For:** 15.2 cm (6 in.) borehole

**Frequency:** 1.2 MHz

**Acoustic Beam Width:** 1.5 mm focal distance

**Rotation Speed:** Up to 35 revolutions/sec.

**Samples per Rev.:** 72, 144, 216, 288, and 360

**Measurement Ranges:**

Standard ABI-2G or ABI40-GR: 5 to 51 cm (2 to 20 inch) open or cased borehole

QL40-ABI-VLB : 25 to 76 cm (10 to 30 inch) in a cased borehole, minimum thickness 5 mm

**Caliper Resolution:** 0.08 mm (.003 in.)

**Orientation Sensor:** APS 544, 3-Axis Magnetometer and Accelerometer

**Inclination Accuracy:** ± 0.5 °

**Azimuth Accuracy:** ± 1.2 °

## - Fiche technique: QL40-OBI-2G – Optical Televiewer

### The New 2nd Generation Optical Televiewer is Here!

#### Description

The QL40-OBI-2G and OBI40GR-2G are the new generation of Optical Borehole Imagers. The new televiewer comprises a completely redesigned optical assembly with new electronics. It implements a high resolution CMOS digital image sensor combined with a fisheye lens. The tool produces an extraordinarily clear, sharp, 360° continuous- upwrapped digital picture of the borehole wall, either in air or clear water. Resolutions up to 1800 pixels over the borehole circumference can be achieved, which makes this televiewer ideal for lithological, mineralogical, and structural analyses.

A built in high precision orientation package incorporating a 3-axis magnetometer and 3-axis accelerometer allows orientation of the images to a global reference and determination of the borehole's azimuth and inclination. Optical televiewer images can complement and even replace a coring survey and its associated problems of core recovery and orientation.

The new QL40-OBI-2G televiewer is fully digital and can operate on standard wirelines. It can be either combined with other logging tools of the QL (QuickLink) product line to build tool strings or operated as a standalone tool.

The OBI40GR-2G is a standalone tool version integrating a natural gamma sensor thereby enabling the measurement of gamma radiation emitted naturally from within the formations crossed by a borehole.

For more detailed information on the differences between the 1st and 2nd generation optical televiewers, please see the [Release Note](#).

#### Applications

- Detailed and oriented structural information
- Reference for core orientation
- Fracture detection and evaluation
- Breakout analysis
- Detection of thin beds
- Determination of bedding dip
- Lithology and mineralogical characterization
- Casing inspection



## Operating Conditions

### Borehole Fluid

Water (Clear)

Mud

Dry

### Casing

Open Hole

PVC Borehole

Steel

### Centralization

Required

Not Necessary

## Features & Benefits

- Unlike standard video systems, televiewers operate on any standard wireline
- Higher televiewer image resolution- up to 1800 pixels over the borehole circumference
- 40 mm OD for logging small diameter boreholes
- Can replace or support a coring survey and the associated problems of core recovery and orientation
- Digital data transmission up to 500 kbits per second
- Real time automatic telemetry tuning according to the cable length/ type
- Lifetime factory color calibration

## Specifications – Metric/English

| Specification | Metric  | Imperial  |
|---------------|---------|-----------|
| Diameter      | 40 mm   | 1.57"     |
| Length        | 1.47 m  | 57.9"     |
| Weight        | 5.3 Kg  | 11.7 lbs. |
| Max. Temp.    | 70°C    | 158°F     |
| Max. Pressure | 200 bar | 2900 psi  |

**Optical Sensor:** 1/3" high sensitivity CMOS digital image sensor

**Azimuthal Resolution:** 120, 180, 360, 600, 900, 1800 pixels

**Vertical Resolution:** User definable minimum 1 mm. Function of depth encoder resolution.

**Color Resolution:** 24 bits RGB true colors

**Responsivity:** 5.48 V/lux-sec

**Light Source:** High efficiency LEDs

**Color Temperature:** 5600 K

**Light Intensity:** 750 lm

**Color Rendering Index:** 80%

**Power Max:** 5.60 W

**Orientation Sensor:** APS 544 – 3-Axis Magnetometer and Accelerometer

**Inclination Accuracy:**  $\pm 0.5^\circ$

**Azimuth Accuracy:**  $\pm 1.2^\circ$

## Références

- Abdi Y., Garavand A., & Sahamieh R., (2018). Prediction of strength parameters of sedimentary rocks using artificial neural networks and regression analysis. *Arabian Journal of Geosciences*. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3929-0>
- Achenbach J. D., (1984). *Wave Propagation in Elastic Solids*. Elsevier Science.
- Aguilera R., (1979). *Naturally fractured reservoirs*. Petroleum Publishing Company, Tulsa, Okla.
- Almalikee H., (2019). Predicting Rock Mechanical Properties from Wireline Logs in Rumaila Oilfield, Southern Iraq. *American Journal of Geophysics, Geochemistry and Geosystems*, Vol. 5, No. 2, 2019, pp. 69-77. <http://www.aiscience.org/journal/aj3g>, ISSN: 2381-7143 (Print); ISSN: 2381-7151 (Online).
- Anderson B., (2001). Modeling and inversion methods for the interpretation of resistivity logging tool response. *University of Delft (Netherlands)*.
- Angulo B., Morales T., Uriarte J., & 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.
- Arditty P., Arens G., & Staron P., (1984). Improvements of formation properties and evaluation through processing and interpretation results of the EVA tool records. *SEG 54th Annual Meeting expanded abstracts*.
- Avseth P., Mukerji T., & Mavko, G. (2005). *Quantitative seismic interpretation: Applying rock physics tools to reduce interpretation risk*. Cambridge University Press.
- Baheer I., (2000). Selection of methodology for modeling hysteresis behavior of soils using neural networks. *Journal Computer Aided Civil Infrastructure Engineering* 5 (6), 445–463.
- Bakku S. K., Fehler M., & Burns D., (2013). Fracture compliance estimation using borehole tube waves. *Geophysics*, 78, 249–260.
- Baouche R., (2017). Prediction of permeability and porosity from well log data using the nonparametric regression with multivariate analysis and neural network, Hassi R'Mel Field, Algeria. *Egyptian Journal of Petroleum* (2017) 26, 763–778, Production and hosting by Elsevier B.V.

- Barbosa N., Caspari E., Rubino G., Greenwood A., Baron L., & Holliger K. (2019). Estimation of Fracture Compliance From Attenuation and Velocity Analysis of Full-Waveform Sonic Log Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 10.1029/2018JB016507.
- Barbosa N., Greenwood A., Caspari E., Dutler N., & Holliger K., (2021). Estimates of Individual Fracture Compliances Along Boreholes From Full-Waveform Sonic Log Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 10.1029/2021JB022015.
- Barton N., (1974). A model study of rock-joint deformation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 9:579–582. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(72\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(72)90010-1)
- Beck M., Girardet D., Chapellier D. & Descloitres M. (2001). Diagraphies électriques pour l'optimisation de l'hydrofracturation en zone de socle. *Premiers résultats au Burkina Faso*.1-5 p.
- Bernius G.R., (1981). Boreholes near Ottawa for the development and testing of borehole logging equipment – a preliminary report; in Current Research, Part C. *Geological Survey of Canada, Paper 81-1C*, p. 51-53. <https://doi.org/10.4095/116175>
- Bernius G.R., (1996). Borehole geophysical logs from the GSC Borehole Geophysics Test Site at Bell's Corners, Nepean, Ontario. *Geological Survey of Canada, Open File 3157*, 38 p. <https://doi.org/10.4095/207617>
- Bieniawski Z.T., (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *The Civil Engineer in South Africa*, 15(12), 335-343.
- Bjørlykke K., (2015). Petroleum Geoscience: From Sedimentary Environments to Rock Physics (Second Edition). *Springer Heidelberg New York Dordrecht London*. DOI 10.1007/978-3-642-34132-8.
- Brie A., Endo T., Johnson D., & Pampuri F., (2000). Quantitative formation permeability evaluation from Stoneley waves. *SPE Reservoir Eval. & Eng.*, 3, 109-117.
- Cai J.G. & Zhao J. (2000). Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 37, 661-682
- Caritg S., Bugarel F., Goyénèche O., & Audouin O., (2016). Recommandations pour l'acquisition de données sur l'aquifère carbonaté du Lusitanien traversé à l'occasion des dorages géothermiques au Dogger (bassin de Paris)- projet RECOMFOR. *Rapport final. BRGM/RP-65639-FR*, 50 pages.

- Chabot L., (2003). Single-well imaging using full-waveform sonic data. *Thèse de maîtrise de l'université de Sherbrooke*, 97 pages.
- Chalhoub M., (2006). Apports des méthodes d'homogénéisation numériques à la classification des massifs rocheux fracturés. *École Nationale Supérieure des Mines de Paris*.
- Chang C., Zoback M., & Khaksar A., (2005). Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 51 (2006) 223–237.
- Chenhao C., (2018). Nonlinear Multiple Regression Methods for Spectroscopic Analysis: Application to NIR Calibration. *Doctoral thesis from University College London*.
- Cohen J. (1988). Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd ed.). *Lawrence Erlbaum Associates*. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>
- Comité Français de Mécanique des Roches (2000). Manuel de mécanique des roches. Tome 1 : Fondements. *Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris*, coordonné par F. Homand et P. Duffaut, 265 pages.
- Comsol (2012). mechanics module user's guide, version 4.3. *U.S. Patents 7,519,518; 7,596,474; and 7,623,991. Patents pending*.
- Core Logging Committee of the South Africa Section of The Association of Engineering Geologists, CLC-SAS-AEG, (1976). A guide to core logging for rock engineering. *Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering*. Page 71 – 86.
- Crow H.L., Brewer K.D., Cartwright T.J., Gaines S., Heagle, D., Pugin A.J.-M., & Russell H.A.J., (2021). New core and downhole geophysical data sets from the Bells Corners Borehole Calibration Facility, Ottawa, Ontario. *Geological Survey of Canada, Open File 8811, 1 .zip file*. <https://doi.org/10.4095/32883>
- Dasios A., Astin T. R., & McCann C., (2001). Compressional-wave Q estimation from full-waveform sonic data. *Geophysical Prospecting*, 49, 353–373.
- David C., (1991). La perméabilité et la conductivité électrique des roches dans la croûte : expérience en laboratoire et modèles théoriques. *Thèse de doctorat Université Louis Pasteur Strasbourg*, 255 p.
- David C. (1998). Compaction, fissuration et propriétés physiques des roches : expériences et modèles. *HDR, Université de Strasbourg*.
- Day-Lewis F.D., Slater L.D., Robinson J., Johnson C.D., Terry N., & Dale Werkema., (2017). An overview of geophysical technologies appropriate for characterization and

monitoring at fractured-rock sites. *Journal of Environmental Management, Volume 204, Part 2.* <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.033>.

- Deng SG., Li L., Li ZQ., He ZQ., Fan YR., (2015). Numerical simulation of high-resolution azimuthal resistivity laterolog response in fractured reservoirs. *Petroleum Science* 12(2). DOI: 10.1007/s12182-015-0024-y.
- Desbrandes R., (1982). Diagraphies dans les sondages. *Technip*.
- Desbrandes R., (1985). *Encyclopedia of Well Logging*. Graham & Trotman, London.
- Dérobert X., Lataste JF., Balayssac JP., Laurens S., (2017). Evaluation of chloride contamination in concrete using electromagnetic nondestructive testing methods. *NDT&E International*, 89, pp. 19-29. DOI:10.1016/j.ndteint.2017.03.006.
- Di Prisco G., & Springer J.S., (1991). The Precambrian-Paleozoic unconformity and related mineralization in southeastern Ontario. *Ontario Geological Survey, Open File Report 5751, 122p. Retrieved June 23, 2021 from <http://www.geologyontario.mndmf.gov.on.ca/mndmfiles/pub/data/imaging/OFR5751/OFR5751.pdf>*
- Dupuy B., De Barros L., Garambois S., Virieux J., (2011). Wave propagation in heterogeneous porous media formulated in the frequency-space domain using a discontinuous Galerkin method. *Geophysics* 76 (4), N13-N28. <https://doi.org/10.1190/1.3581361>.
- Durville JL., & Héraud H., (1997). Description des roches et des massifs rocheux. *Techniques de l'ingénieur : Construction et travaux publics, Mécanique des sols et géotechnique. Réf. : C352 VI*.
- Doll H.G., (1951). The laterolog: A new resistivity logging method with electrodes using an automatic focusing system; *J Pet Technol* 3 (11): 305–316.
- Eitzenberger A., (2012). Wave Propagation in Rock and the Influence of Discontinuities. *Doctoral thesis, Division of Mining and Geotechnical Engineering, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Luleå University of Technology, SE-971 87 Luleå, Sweden*.
- Gasc-Barbier M., (2011). Comportement mécanique des roches : du laboratoire à l'ouvrage. *Rapport de synthèse présenté devant l'Université Bordeaux. HAL Id: tel-00584240 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00584240>*
- Goldberg D., & Gant WT., (1988). Shear-wave processing of sonic log waveforms in a limestone reservoir. *Geophysics* 53(53):9.

- 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.
- Goueygou M., Abraham O., Lataste JF., (2008). A comparative study of two non destructive methods to assess near surface mechanical damage in concrete structure, *NDT&E international*, vol. 41(6), pp. 448-456.
- Greenacre M., Patrick J.F., Groenen P.J.F., Hastie T., Iodice d'Enza A., Angelos Markos A., & Tuzhilina E., (2022). Principal Component Analysis. *Nature Reviews Methods Primers*. DOI: [10.1038/s43586-022-00184-w](https://doi.org/10.1038/s43586-022-00184-w).
- Gudmundsson A., (2011). Rock fractures in geological processes. *Cambridge University Press*. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511975684>
- Hallenburg J., (1984). Geophysical logging for mineral and engineering applications. *PennWells édition*.
- Hecht-Nielsen R., (1987). Kolmogorov's mapping neural network existence theorem. *In: Proceedings of the First IEEE International Conference on Neural Networks, San Diego, CA, USA, pp. 11–14*.
- Huang H.H., & He Q., (2022). Nonlinear Regression Analysis. *Department of Statistics and Data Science, University of Central Florida, United States preprint submitted to International Encyclopedia of Education 4th Edition April 11, 2022*.
- Jaber J., (2020). Application de la fabrication additive à la modélisation physique des joints et des massifs rocheux, par approches expérimentales et numériques. *Thèse doctorat de l'université de Lorraine. 238 pages*.
- Jackson J., & Edward. A., (1991). User's Guide to Principal Components. *Wiley*.
- James G., Witten D., Hastie T., & Tibshirani R., (2013). An Introduction to Statistical Learning. *Springer*.
- Jamtlid A., Magnusson K.A., Olsson O. & Stenberg L. (1984). Electrical borehole measurements for mapping of fracture zones in crystalline rock. *Geoexploration*, volume 22, p. 203-216.
- Killeen P.G., Bernius G.R., Schock L., & Mwenifumbo C. J., (1984). New developments in the GSC borehole geophysics test area and calibration facilities; in Current Research, Part B. *Geological Survey of Canada, Paper 84-1B, p. 373-374*. <https://doi.org/10.4095/119597>
- Killeen P.G., (1986). A system of deep test holes and calibration facilities from developing and testing new borehole geophysical techniques; in *Borehole Geophysics*



- for Mining and Geotechnical Applications, e.d. P.G. Killeen. *Geological Survey of Canada, Paper 85-27*, p. 29-46. <https://doi.org/10.4095/123596>
- Kimura N., Yoshinaga I., Sekijima K., Azechi I., & Baba D. (2019). Convolutional Neural Network Coupled with a Transfer-Learning Approach for Time-Series Flood Predictions. *Water*, 12(1), 96. doi:10.3390/w12010096.
  - Kingma D., & Ba J., (2014). Adam: A method for stochastic optimization. *ArXiv Preprint ArXiv:1412.6980*.
  - Kleinbaum D. G., & Klein M. (2010). Applied regression analysis and other multivariable methods (5th ed.). *Cengage Learning*.
  - Lagabrielle R., (2007). Diagraphies et géophysique de forage. *Techniques de l'ingénieur : Construction et travaux publics | Mécanique des sols et géotechnique Réf. : C225 V3*.
  - Lataste JF., Abraham O., Breyse D., Sirieix C., (2003). Sensitivity to crack parameters of two Non Destructive Techniques : Electrical resistivity measurements and acoustic methods, Colloque NDT-CE 2003, Berlin (D), 16-19 Sept. 2003.
  - Lataste JF., (2011). Contrôle Non Destructif des ouvrages d'arts : Un point de vue français sur l'organisation, les besoins et les développements en cours.
  - Lataste JF., (2016). Electrical investigations for moisture assessment on civil engineering structures. *Materials, Systems and Structures in Civil Engineering – MSSCE 2016, 15-29 august 2016, Lyngby, Denmark, 10p*.
  - LeCun Y., Bengio Y., & Hinton G., (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553):436– 444.
  - Li S. J., Feng X.-T., Wang C. Y., & Hudson J. A., (2012). ISRM Suggested Method for Rock Fractures Observations Using a Borehole Digital Optical Televiewer. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46(3), 635–644. doi:10.1007/s00603-012-0344-9.
  - Liu P.H., Wu J.H., & Lee D.H., (2022). New rock strength-based UCS-V p correlation equation for different rock types by statistical regression methods. *Geomechanics for Energy and the Environment*. DOI: 10.1016/j.gete.2022.100403.
  - Luthi S., & Souhaité P. (1990). Fracture apertures from electrical borehole scans. *Geophysics, volume 55, numéro 7, p. 821-833*.
  - Mari J., Arens G., Chapellier D., & Gaudiani P., (1998). Géophysique de gisement et de génie civil. *Éditions Technip, Paris*.
  - Mari J., Gaudiani P., & Delay J., (2011). Characterization of geological formations by physical parameters obtained through full waveform acoustic logging. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 1438-1449, Elsevier Ltd.

- Mari J., Gavin P., Coppens F., & Wicquart E., (1992). Traitement des diagraphies acoustiques. *Éditions Technip, Paris*.
- Mari J., & Vergniault Ch., (2018). Sismique en forage et diagraphies acoustiques. *EDP Sciences, 2018*. DOI: [10.1051/978-2-7598-2262](https://doi.org/10.1051/978-2-7598-2262).
- Martin F., & Saitta A. (2012). Mécanique des Roches et Travaux Souterrains. *Cours ENS Cachan*.
- Matuszyk P., Torres-Verdín C., Pardo D., (2013). Frequency-domain finite-element simulations of 2D sonic wireline borehole measurements acquired in fractured and thinly bedded formations. *Geophysics, vol. 78, no. 4 ; p. D193–d207, 14 figs., 3 tables*. [10.1190/geo2012-0397.1](https://doi.org/10.1190/geo2012-0397.1)
- Michler C., Demkowicz L., & Torres-Verdin., (2008). Numerical simulation of borehole acoustic logging in the frequency and time domains with hp-adaptive finite elements. *Elsevier*.
- Molyneux J.B., & Schmitt D.R., (2000). Compressional-wave velocities in attenuating media: A laboratory physical model study. *Geophysics, 65(4), 1162–1167*. <https://doi.org/10.1190/1.1444809>
- Morris C., Little P., & Letton W., (1984). A new sonic array tool for full waveform logging. *59th Annual Conference of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Houston, Texas, expanded abstracts, pp. 16-19*.
- Morris R.L., Grine D.R., & Arkfeld T.E., (1964). Using compressional and shear acoustic amplitudes for the location of fractures. *Journal of Petroleum Technology, 16, 623–632*.
- Mount Sopris instruments co., (2009). Inc, 2SAA-1000/F, Sonic Probe, Golden CO, U. S. A.
- Mwenifumbo C.J., Elliott B.E., Hyatt W.G., & Bernius G.R., (2005). Bells Corners calibration facilities for downhole and surface geophysical equipment. *Geological Survey of Canada, Open File 4838, 17 p*. <https://doi.org/10.4095/216755>
- Paillet F., & Cheng C., (1991). Acoustic waves in boreholes. *CRC Press, Boca Raton, 264 pp*.
- Paillet F., & Turpening R., (1984). Borehole and surface to borehole seismic applications in fracture characterization. *SEG 54th Annual Meeting expanded abstracts*.
- Paillet FL., Barton C., Luthi S., Rambow F., Zemanek JR., (1990). Borehole imaging and its application in well logging-an overview. *Borehole Imaging, Society of*

- Professional Well Log Analysts, Inc., 6001 Gulf Freeway, Suite C129, Reprint Series, Houston, Texas, pp 3–23.
- Palacky G.V., (1987). Resistivity characteristics of geologic targets. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol 1, Theory, 1351*.
  - Pan B., Yuan M., Fang C., Liu W., Guo Y., & Zhang L., (2017). Experiments on acoustic measurement of fractured rocks and application of acoustic logging data to evaluation of fractures. *Springer, Pet. Sci. (2017) 14:520–528, DOI 10.1007/s12182-017-0173-2*.
  - Pardo D., Matuszyk P., Puzyrev V., Torres-Verdín C., Nam M., & Calo V., (2021). Modeling of Resistivity and Acoustic borehole Logging Measurements Using Finite Element methods. *2021 Elsevier Inc. ISBN: 978-0-12-821454-1*.
  - Parra J. O., Xu P.C., & Hackert C.L., (2007). A borehole-model-derived algorithm for estimating QP logs from full-waveform sonic logs. *Geophysics, 72, 107–117*.
  - Peng S., & Zhang J., (2007). Engineering Geology for Underground Rocks. *Springer*.
  - Pirson, S., (1967). Geologic well log analysis. *Gulf Publishing Company, Houston, Texas*.
  - Puth M.-T., Neuhäuser M., & Ruxton G. D. (2015). Effective use of Spearman’s and Kendall’s correlation coefficients for association between two measured traits. *Animal Behaviour, 102, 77–84. doi:10.1016/j.anbehav.2015.01.010*.
  - Pyrak-Nolte L.J., Myer L.R. & Cook N.G.W. (1990a). Transmission of seismic waves across single natural fractures. *Journal of Geophysical Research, 95(B6), 8617- 8638*.
  - Pyrak-Nolte L.J., Myer L.R. & Cook N.G.W. (1990b). Anisotropy in seismic velocities and amplitudes from multiple parallel fractures. *Journal of Geophysical Research, 95(B7), 11345-11358*.
  - Qinghua L., (2022). Impact of fracture normal and shear stiffnesses on the scattering attenuation of P and S waves in a naturally fractured rock. *Journal of Applied Geophysics, Volume 206, November 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104784>*
  - Rajabi M., & Bohloli B., (2010). Intelligent approaches for prediction of compressional, shear and Stoneley wave velocities from conventional well log data: A case study from the Sarvak carbonate reservoir in the Abadan Plain (Southwestern Iran). *Computers & Geosciences 36 (2010) 647–664. DOI:10.1016/j.cageo.2009.09.008*.
  - Rider M., (1996). The Geological Interpretation of Well Logs. 2nd Edition, Rider-French Consulting Ltd., Sucherland.

- Roy A., & Apparao A. (1971). Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, volume 36, numéro 5, p. 943-959.
- Roy A., & Dhar R., (1971). Radius of investigation in dc resistivity well logging. *Geophysics*, volume 36, numéro 4, p. 754-760.
- Scheidegger A., (1974). The physics of flow through porous media, 3rd edition. *University of Toronto Press*.
- Schlumberger, (1950). Electrical Well Logging 72 p.
- Schlumberger, (1997). DSI™ – Dipole Shear Sonic Imager. *Corporate brochure SMP-9200*, 36 pages.
- Schock L.D., Killeen P.G., Elliott, B.E., & Bernius G.R., (1996). A review of Canadian calibration facilities for borehole geophysical measurement, in Borehole geophysics in mineral exploration: Short course manual, (ed.) P.G. Killeen, C.J. Mwenifumbo, B.E. Elliot, K.A. Pflug, L.D. Schock, and G.R. Bernius. *Geological Survey of Canada, Open File 3247*, p. 40-51 (also *Proceedings of the 4th international symposium on borehole geophysics for mineral and geotechnical logging, August 18-22, 1991, Toronto, Ontario*, p. 191-202). <https://doi.org/10.4095/207612>
- Schoenberg M., (1980). Elastic wave behavior across linear slip interfaces. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 68(5), 1516– 1521. <https://doi.org/10.1121/1.385077>.
- Semblat J-F., Lenti L., & Gandomzadeha A. (2011). Simple multi-directional absorbing layer method to simulate elastic wave propagation in unbounded domains. *International journal for numerical methods in engineering*, 28 september 2010, wiley online library.
- Serra O., (1979). Diagraphies différencées - Bases de l'interprétation, Tome 1 : Acquisition des données diagraphiques. *Elf Exploration édition Paris*.
- Serra O., (1982). Fundamentals of Well-Log Interpretation, Volume 1: The Acquisition of Logging Data. Developments in Petroleum Science, 15A. *Elsevier Science Publishing Co. Inc*.
- Sidler R., Carcione J.M., & Holliger K., (2013). A pseudo-spectral method for the simulation of poro-elastic seismic wave propagation in 2D polar coordinates using domain decomposition. *Journal of Computational Physics*, 235, 846–864. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2012.09.044>
- Société Suisse de Géomorphologie (SSGm) – Schweizerische Geomorphologische Gesellschaft Fiches – Géomorphologie de la montagne – (2009).

- Tahiri, A. (1992). Modélisation des massifs rocheux fissurés par la méthode des éléments distincts *Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, France.*
- Taillet E., (2013). Caractérisation des discontinuités dans des ouvrages massifs en béton par la diagraphie électrique de résistivité. *Thèse de doctorat en cotutelle entre l'université de Sherbrooke et l'université de Bordeaux.*
- 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.
- Talebi S., (1987). Mesures in situ de vitesse et d'atténuation des ondes P et S dans un massif granitique. *Revue Française de Géotechnique*, 40(40), 7–21. <https://doi.org/10.1051/geotech/1987040007>.
- Tang J., Zhang C., & Xin Y., (2017). A fracture evaluation by acoustic logging technology in oil-based mud: A case from tight sandstone reservoirs in Keshen area of Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China. *Petroleum exploration and development journal*, Volume 44, Issue 3.
- Telford W.M., Geldart L.P., & Sheriff R.E., (1990). *Applied Geophysics*. London: Cambridge University Press, 522 - 577.
- Thivierge P., (2011), Caractérisation des infrastructures à l'aide des diagraphies d'imagerie optique et acoustique. *Thèse de maîtrise de l'université de Sherbrooke*, 185 pages.
- Tselentis G., (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.
- Tselentis G., (1985). 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.
- Von Gonten W. D., & Osoba J. S., (1969). A method of predicting saturation exponents in logging, 7 p.
- Wellcad, Manuel utilisation V5.4.
- Williams J. H., & Johnson, C. D. (2004). Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies. *Journal of Applied Geophysics*, 55(1-2), 151–159. doi:10.1016/j.jappgeo.2003.06.009.
- Wilson A.E. (1946). Geology of the Ottawa-St. Lawrence Lowland, Ontario and Quebec, Memoir 241, Department of Mines and Technical Surveys, Ottawa.

- Wood D., (2020). Predicting porosity, permeability and water saturation applying an optimized nearest-neighbour, machine-learning and data-mining network of well-log data. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 184 (2020) 106587, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106587>
- Wyllie M.R.J., Gregory A.R. and Gardner L.W., (1956). Elastic Wave Velocities in Heterogeneous and Porous Media. *Geophysics*, 41-70. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1438217>
- Xu J., Liu Q.H., Hu H., & Zhong Y., (2021). Simulation of borehole acoustic wavefields in fractured media by combining the spectral element method and linear-slip model. *Geophysics* 86(5). DOI: 10.1190/geo2020-0840.1.
- Xu W., Hou Y., Hung Y. S., & Zou Y. (2013). A comparative analysis of Spearman's rho and Kendall's tau in normal and contaminated normal models. *Signal Processing*, 93(1), 261–276. doi:10.1016/j.sigpro.2012.08.005.
- Yagiz S., Sezer E.A., & Gokceoglu C., (2009). Artificial neural Networks and nonlinear regression techniques to assess the influence of slake durability cycles on the prediction of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity for carbonate rocks. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 36(14):1636-1650. DOI: 10.1002/nag.1066.
- Yan B., Ou W., Huang X., & da Silva N.V., (2020). Numerical simulation of shear wave attenuation in borehole inserted by a horizontal fracture. *Acta Geophysica*, <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00503-3>.
- Yang F., Ward S., (2013). Inversion of borehole normal resistivity logs. *Geophysics* 1984;49(9):1541–8.
- Yang K., Yuan L., Qi L., & Liao B., (2013). Establishing predictive model for rock uniaxial compressive strength of No.11-2coal seam roof in Huainan mining area. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 32(10):1991-1998.
- Zhang G., Shen L., (2013). Response of a normal resistivity tool in a borehole crossing a bed boundary. *Geophysics* 1984;49(2):142–9.
- Zhao J., Zhao X.B. & Cai, J.G. (2006). A further study of P-wave attenuation across parallel fractures with linear deformational behaviour. *Inter-national Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 43, 776-788.

- Zimmerman R., & Main I. (2004). Hydromechanical behavior of fractured rocks. *International Geophysics Series*, 89, 363–421. [https://doi.org/10.1016/s0074-6142\(03\)80023-2](https://doi.org/10.1016/s0074-6142(03)80023-2)
- Zlatev P., Poeter E., & Higgins J., (1988). Physical modeling of the full acoustic waveform in a fractured, fluid-filled borehole. *Geophysics* 53(9):1219–1224.