

THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE

Spécialité :
Géophysique Appliquée

Ecole doctorale
ED398 Géosciences et Ressources Naturelles

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE (PARIS 6)

Sujet de la thèse :

Caractérisation des hétérogénéités texturales et hydriques des géomatériaux argileux par la méthode de Polarisation Provoquée : Application à l'EDZ de la station expérimentale de Tournemire

Gonca OKAY

Soutenue le 25 mars 2011

Jury

Mme. M. Zamora	Professeur à l'IPGP	Rapporteur
M. P. Côte	Directeur de recherche au LCPC	Rapporteur
M. J. Cabrera	Ingénieur chercheur à l'IRSN	Examineur
M. R. Guérin	Professeur à l'Université de Paris 6	Examineur
M. P. Cosenza	Professeur à l'Université de Poitiers	Directeur de thèse
M. N. Florsch	Professeur à l'Université de Paris 6	Directeur de thèse
M. A. Revil	Professeur à l'Université de Colorado School of Mines	Directeur de thèse
M. C. Camerlynck	Maître de conférences à l'Université de Paris 6	Invité
M. A. Ghorbani	Maître de conférences à l'Université de Yazd	Invité

Caractérisation des hétérogénéités texturales et hydriques des géomatériaux argileux par la méthode de Polarisation Provoquée : Application à l'EDZ de la station expérimentale de Tournemire.

Science is the most reliable guide in life...

M.K.Atatürk

Caractérisation des hétérogénéités texturales et hydriques des géomatériaux argileux par la méthode de Polarisation Provoquée : Application à l'EDZ de la station expérimentale de Tournemire.

A ma soeur...

RESUME

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire de thèse s'inscrit dans la problématique générale de la sûreté des stockages de déchets radioactifs en formations argileuses profondes. Le creusement d'ouvrages souterrains dans les argilites induit la création d'une *zone endommagée* ou *perturbée* dont la caractérisation constitue un enjeu de sûreté majeur.

La caractérisation de l'extension spatiale de cette zone endommagée et de son évolution dans le temps a été effectuée par le suivi de la résistivité électrique et de la Polarisation Provoquée (PP) dans trois galeries de la station expérimentale de Tournemire (Aveyron, France) de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN). Les résultats obtenus montrent que les anomalies PP mises en évidence dans le domaine temporel (PPT) s'expliquent par la présence de minéralisations (plus particulièrement de pyrite) localisées dans des discontinuités structurales suivantes : fractures tectoniques (*mm-cm*), faille tectonique (*m*) et nodules calcaires (*cm*). Avec la résistivité électrique, nous avons montré que la méthode PPT était sensible aux modifications texturales liées à la désaturation de la roche, provoquée par la ventilation de la galerie. Cet effet a été particulièrement bien mis en évidence aux parois verticales des ouvrages. Les résultats acquis dans le domaine spectral (PPS) ont permis de discriminer dans la réponse PP, la contribution de la désaturation de la roche et celle liée à la fracturation purement mécanique.

Le volet expérimental de cette thèse conduit en laboratoire a concerné des mesures PPS (1,4 Hz - 12 kHz) sur des échantillons argilo-sableux non-consolidés saturés. Ils ont montré que les phénomènes de polarisation dans un mélange argilo-sableux sont liés au premier ordre aux propriétés surfaciques (*i.e.*, *capacité d'échange cationique*, *surface spécifique*) du matériau et à la teneur en argile. Ces phénomènes de polarisation sont indépendants de la concentration de l'électrolyte utilisé. La réponse PPS des mélanges est également très sensible à la minéralogie des différentes familles d'argiles impliquées ; elle met en évidence une diversité des comportements électriques d'argiles de même famille minéralogique.

Mot clés : *polarisation provoquée temporelle et spectrale, zone endommagée, argilite, tomographie électrique*

ABSTRACT

This Ph-D thesis investigates the potential of clay rocks for deep geological disposal of radioactive waste. Underground excavations are responsible in their vicinity a region, where the clay-rock is damaged or disturbed. This region must to be characterized to ensure the safety of repositories. The extension of the excavation damaged zone (EDZ) and its evolution over time have been investigated through electrical resistivity and induced polarization methods from three galleries belonging to the French Institute of Radioprotection and Nuclear Safety (IRSN)'s experimental underground research laboratory of Tournemire (Aveyron, France). Time domain induced polarisation indicates the presence of mineralization (e.g., especially pyrite) located in the structural discontinuities such as tectonic fractures (mm-cm), tectonic fault (m) and calcareous nodules (cm). Combined electrical resistivity and Induced Polarization methods show the possibility to delineate textural changes associated to desaturation of the clay-rock induced by the ventilation of galleries. The impact of the desaturation is particularly observed on the gallery's walls. In addition, Spectral Induced Polarization (SIP) tomography results can be used to discriminate the responses of the desaturated zones from the fractured zones.

We have performed laboratory experiments (in the range 1.4 mHz - 12 kHz) using saturated unconsolidated sand-clay mixtures. The results illustrate that the amplitude of polarization is strongly affected by the surface properties of these mixtures (e.g., cation exchange capacity, specific surface area) and by the volumetric clay content. However, the amplitude of polarization is independent of the concentration of electrolyte. The SIP response is also strongly sensitive to the mineralogy of the clays.

Key words: *Time domain and Spectral domain Induced Polarization, excavation damaged zone, clay rock, electrical tomography*

TABLES DES MATIERES

RESUME	iv
ABSTRACT	v
REMERCIEMENTS	29
INTRODUCTION GENERALE	32
Chapitre 1. Etude bibliographique.....	37
Introduction.....	38
1.1. Bref historique de la méthode de Polarisation Provoquée (PP)	39
1.2. Principes de la mesure PP	42
1.2.1. Mesure dans le domaine temporel	42
1.2.2. Mesure dans le domaine fréquentiel.....	46
1.3. Rappel sur les équations de Maxwell	50
1.4. Aspects phénoménologiques de l'effet PP	54
1.4.1. Les acquis expérimentaux.....	54
1.4.2. La polarisation associée à la présence de minéraux métalliques.....	68
1.4.3. Les phénomènes de polarisation associés à la double (ou triple) couche électrique	69
1.4.3a. Eléments de la théorie de la double (ou triple) couche électrique	69
1.4.3b. Polarisation de la couche de Stern	70
1.4.3c. Polarisation de la double couche électrique.....	71
1.4.3d. Polarisation de membrane.....	71
1.4.4. Polarisation d'interface (effet Maxwell-Wagner).....	73
1.5. Modèles de représentation de l'effet PP.....	76
1.5.1. Modèles empiriques	79
1.5.2. Modèles théoriques	87
1.6. Notion de zone endommagée ou d'« Excavation Damaged Zone » (EDZ).....	91
1.7. Apports des méthodes électriques à la caractérisation de l'EDZ.....	95
1.7.1. Relation entre propriétés électriques (résistivité et phase) et caractéristiques pétrophysiques de l'EDZ	96
1.7.2. Les résultats acquis en galerie souterraine	97
1.7.3. Synthèse et conclusion	108
Conclusion	111

Chapitre 2. Applications géoélectriques in situ dans la Station Expérimentale de Tournemire (Aveyron, France).....	113
2.1. Contexte géologique.....	115
2.2. Contexte minéralogique et pétrophysique.....	119
2.3. Contexte géotechnique.....	121
2.4. L'EDZ de Tournemire et méthodes de caractérisation appliquées.....	126
2.4.1. Tunnel ferroviaire (1882-88).....	126
2.4.2. Galerie Est-96.....	128
2.4.3. Galerie Est-03.....	135
2.4.4. Galerie Nord-08.....	139
2.4.5. Synthèse de l'EDZ autour des ouvrages de la station expérimentale de Tournemire.....	140
2.5. Applications des méthodes PP à l'échelle de la galerie.....	143
2.5.1. Stratégie d'acquisition et méthodologie générale.....	143
2.5.2. Etudes méthodologiques.....	161
2.5.2a. Etude de l'impact de la tension de sortie : 12 V, 25 V, 50 V, 100 V.....	161
2.5.2b. Etude de l'impact du temps d'injection : 1 s et 2 s.....	163
2.5.2c. Étude de la réponse temporelle entre les électrodes Cu/CuSO ₄ impolarisables et les électrodes en acier.....	164
2.5.2d. Étude de la réponse spectrale entre les électrodes Cu/CuSO ₄ impolarisables et les électrodes en acier.....	166
2.5.2e. Synthèse et conclusion.....	175
2.6. Les campagnes expérimentales dans la galerie Est-96.....	175
2.6.1. La géométrie des dispositifs et les paramètres d'acquisition.....	175
2.6.2. Mesures expérimentales préliminaires : calibration, effet du couplage électromagnétique, filtrage (domaine spectral).....	179
2.6.3. Résultats des prospections PPT et résistivité électrique sur le profil au radier.....	180
2.6.4. Résultats des prospections PPS sur le profil au radier.....	184
2.6.5. Synthèse et discussion des résultats du profil au radier.....	194
2.6.6. Résultats des prospections PPT et résistivité électrique sur le profil en arc.....	199
2.6.7. Résultats des prospections PPS sur le profil en arc.....	208
2.6.8. Synthèse et discussion des résultats du profil en arc.....	216
2.6.9. Synthèse et discussion des prospections géoélectriques réalisées dans la galerie Est-96.....	218
2.7. Les campagnes expérimentales dans la galerie Nord-08.....	220
2.7.1. Résultats des prospections PPT et résistivité électrique sur les profils au radier.....	222

2.7.2. Résultats des prospections PPS sur les profils au radier.....	227
2.7.3. Résultats des prospections PPT et Résistivité électrique sur le profil en arc	230
2.7.4. Synthèse et discussion des résultats obtenus dans la galerie Nord-08.....	236
2.8. Les campagnes expérimentales dans la galerie Est-03	239
2.8.1. Introduction : stratégie d'acquisition et de la méthodologie.....	239
2.8.2. Résultats des prospections PPT et résistivité électrique sur le profil au radier (électrodes à 5 cm de profondeur)	243
2.8.3. Résultats des prospections PPT et résistivité électrique sur le profil au radier (électrodes à 30 cm profondeur)	247
2.8.4. Synthèse des prospections géoélectriques réalisées dans la galerie Est-03	251
2.9. Conclusion des prospections géoélectriques dans les galeries radiers bétonnés et non-bétonnés	251
2.10. Applications des méthodes PP à l'échelle des hétérogénéités	254
2.10.1. Méthodologie.....	254
2.10.2. Hétérogénéités (artificielles)	259
2.10.2a. Fractures de désaturation.....	259
2.10.2b. Fractures néoformées	265
2.10.3. Hétérogénéités naturelles.....	268
2.10.3a. Fractures remplies de calcite.....	268
2.10.3b. Nodule calcaires.....	272
2.11. Conclusion des prospections géoélectriques à l'échelle des hétérogénéités	275
2.12. Suivi géoélectrique de l'évolution temporelle de la zone endommagée à la galerie Est-96 (Juin 2008-Février 2009).....	276
2.12.1. Résultats des prospections PPT et résistivité électrique sur le profil au radier.....	277
2.12.1a. Inversion classique au radier (Res2DInv)	277
2.12.1b. Inversion time lapse au radier (Res2DInv).....	281
2.12.2. Résultats des prospections PPT et résistivité électrique sur le profil en arc.....	285
2.13. Conclusion du suivi temporel	293
2.14. Conclusion sur les prospections géoélectriques menées à la station expérimentale de Tournemire.....	294

Chapitre 3. Applications au laboratoire : Propriétés électromagnétiques aux basses fréquences des échantillons argilo – sableux non-consolidés saturés.....	296
Introduction.....	297
3.1. Etudes méthodologiques préliminaires	299
3.1.1. Présentations générales des appareils de mesure	300
3.1.2. Etude au niveau des appareils de mesure : effet instrumental.....	303
3.1.2a. SIP FUCHS II	304
3.1.2b. PSM1735 NumetriQ	306
3.1.2c. SECR-1	309
3.1.3. Etude au niveau du contact : échantillon-électrode (SECR-1)	312
3.1.4. Etude du porte-échantillon (SIP FUCHS II)	314
3.1.4a. Influence de la hauteur de l'échantillon.....	315
3.1.4b. Calcul du coefficient géométrique.....	317
3.1.5. Etude des appareils de mesure à partir d'un échantillon commun	319
3.1.5a. Deux teneurs extrêmes en argile (100 % et 1 %) et contrôle de l'homogénéité du mélange (SIP FUCHS II).....	320
3.1.5b. Différentes teneurs en argile (100 %, 20 %, 5 %, 1 %) et contrôle de l'homogénéité du mélange (NumetriQ-SECR-1).....	323
3.1.5c. Différentes minéralogies (SIP FUCHS-NumetriQ).....	325
3.1.5d. Différentes salinités d'électrolyte (SIP FUCHS et NumetriQ)	329
3.1.6. Synthèse et conclusion	332
3.2. Matériaux et protocole expérimental	334
3.2.1. Définition des matériaux utilisées	334
3.2.2. Détermination quantitative des constituants d'un mélange fabriqué	339
3.2.3. Protocole de mesure	340
3.3. Résultats expérimentaux.....	342
3.3.1. Influence de la teneur en argile	342
3.3.1a. Influence de la teneur en argile de type kaolinite (argile non-gonflant)	342
3.3.1b. Influence de la teneur en argile de type bentonite (argile gonflante)	345
3.3.2. Influence de la minéralogie d'argile	348
3.3.3. Influence de la salinité d'électrolyte	353
3.3.3a. Influence de salinité de l'électrolyte sur la conduction ohmique en fonction des teneurs et minéralogies des argiles	354
3.3.3b. Influence de la salinité de l'électrolyte sur les phénomènes de polarisation en fonction de la teneur et de la minéralogie.....	359

3.3.4. Influence d'un traitement thermique	364
3.3.5. Influence du changement de la taille des grains du sable.....	367
Conclusion	371
Conclusion générale et Perspectives	373
Références bibliographiques	378
Annexe A1 : Propriétés microstructurales et surfaciques des argiles	401
Annexe A2 : Mosaïque au radier des galeries Est-96 et Nord-08	406
Annexe A3 : Étude théorique du couplage électromagnétique (CR1Dmod).....	409
Annexe A4 : Calcul du coefficient géométrique sur les profils longitudinaux au radier et en arc des galeries Est-96 et Nord-08.....	412
Annexe A5 : Résultats des analyses de Diffraction des Rayons X	418
Annexe A6 : Synthèse des mesures expérimentales menées en laboratoire.....	424

TABLES DES FIGURES

Chapitre 1. Etude bibliographique

Figure I.1. (A), (B) Courant injecté et différence de potentiel électrique (ddp) mesurée dans la méthode de la résistivité électrique. Le paramètre V_p est la ddp dite « primaire » mesurée lors de l'injection, le paramètre V_{sp} est le potentiel spontané observé ; (C) Différence de potentiel électrique mesurée dans la méthode de Polarisation Provoquée dans le domaine temporel, le paramètre V_s signifie la ddp dite « secondaire » mesurée après la coupure de l'injection (modifié de Binley & Kemna, 2005) ; (D) Courant injecté et ddp mesurée dans la méthode de Polarisation Provoquée Spectrale (modifié de Kruschwitz & Neiderleithinger, 2009).....**43**

Figure I.2. Représentation schématique du quadripôle électrique utilisée pour la mesure PP et la mesure de la résistivité électrique. Les électrodes d'injection sont en A et B (C_1 et C_2 dans la littérature anglaise). Les électrodes de mesure de la différence de potentiel électrique sont en M et N (P_1 et P_2 dans la littérature anglaise).**45**

Figure I.3. Représentation des jeux de données obtenues avec la méthode de Polarisation Provoquée Spectrale (Kruschwitz & Neiderleithinger, 2009 ; dessin modifié). Sur la figure un symbole correspond à des valeurs calculées à une fréquence donnée.....**47**

Figure I.4. Gammes de fréquences des méthodes PP dans le domaine temporel (IP) et dans le domaine spectral (SIP). Le cercle rouge indique la zone de superposition entre la gamme de fréquences de la méthode SIP et celle des méthodes EM traditionnelles (Ghorbani *et al.*, 2007b).**48**

Figure I.5. Représentation d'un milieu tabulaire à multicouches de propriétés électromagnétiques différentes et la mise en place du dispositif (Ghorbani *et al.*, 2007b).....**49**

Figure I.6. La méthode PPS selon l'approche « traitement du signal ».....**53**

Figure I.7. Relation entre constante de temps ($\tau = 1/2\pi f_c$) et taille de grain dans des roches synthétiques sur la base de résultats expérimentaux et de modélisations. Données : De Witt : grains de pyrite ; Mahan *et al.* : grains de pyrite ; Grisseman : grains de chalcopyrite ; Collet : grains de galène (Vanhalala, 1997b).**56**

Figure I.8. Évolution de la conductivité complexe en fonction de la conductivité de la solution porale. A gauche : sable de granulométrie moyenne. À droite : grès argileux (Börner, 2006). La partie réelle rend compte principalement des processus de conduction des charges électriques. La partie imaginaire résulte principalement des processus de polarisation.**59**

Figure I.9. Diamètre des pores de constriction obtenu par porosimétrie au mercure en fonction du pic de phase mesurée par PPS (Scott & Barker, 2003).**59**

Figure I.10. Comparaison entre la taille des pores de constriction mesurée par porosimétrie au mercure sur 4 échantillons de grès (A, B, C et D) prélevés sur le site de l'université de

Birmingham : (i) distribution (en cumulée) de la taille des pores de constriction (ii) spectres basses fréquences de phase mesurés sur les mêmes échantillons (Scott & Barker, 2003). ...60

Figure I.11. Influence des variations du degré de saturation sur le spectre de phase pour trois géomatériaux : un géomatériau purement sableux (100 %) et un mélange sableux-argileux avec respectivement un pourcentage de (5 %) et (20 %) d'argile (Breede *et al.*, 2010, dessin modifié).....62

Figure I.12. Variation de la partie imaginaire de la conductivité complexe σ'' (mesurée à 1 Hz) avec la surface spécifique d'échantillons de grès et de mélanges argilo-sableux (dans une échelle log-log). La ligne pointillée signifie le meilleur fit $\sigma'' \propto S_{por}^n$ ($n = 0.74$, $r^2 = 0.68$) (Kruschwitz *et al.*, 2010).....63

Figure I.13. Variations des paramètres du modèle de circuit équivalent de Nover *et al.* (2000) (données à droite). La résistance R_1 exprime la conduction volumique ; les paramètres (R_2, C_2) décrivent les phénomènes de polarisation; les paramètres (R_3, C_3) sont relatifs aux propriétés électriques volumiques de l'échantillon. Nous notons l'augmentation drastique de C_2 à l'approche de la rupture.65

Figure I.14. Partie imaginaire de la conductivité complexe mesurée à 1,5 kHz (à gauche) et à 0,18 Hz (à droite) sur différents échantillons d'argilites. Les phases dites de « desaturation » et de « heating » correspondent respectivement à une désaturation à l'air ambiant et un chauffage de l'échantillon jusqu'à 105 °C (Ghorbani *et al.*, 2009). La fissuration produite lors du chauffage a été attestée par CIN (Corrélation d'Images Numériques) (Hedan *et al.*, 2010).65

Figure I.15. Relations entre facteurs externes et internes aux géomatériaux, paramètres PP et propriétés pétrophysiques. En pointillés rouges, nous indiquons les relations spécifiques impliquées avec les paramètres PP.67

Figure I.16. Transport électrolytique de charges dans un pore d'un grès sans minéral (pore supérieur). Polarisation en présence d'un grain de minéral (pore inférieur) (Telford *et al.*, 1990).69

Figure I.17. Schéma de la triple couche électrique (Leroy & Revil, 2004). M^+ désigne les cations et A^- les anions. Q_0 représente la densité des charges électrique sur la surface du minérale, Q_β la densité des charges électriques par unité de surface dans la couche de Stern, Q_s la densité équivalente de charges électriques par unité de surface dans la couche de diffuse en (C/m^2). Le potentiel φ_0 (en V) désigne sur la surface du minéral, φ_β est le potentiel sur le plan bêta (plan de Helmholtz interne), φ_d est le potentiel (en V) du plan interne

de la couche diffuse (plan de Helmholtz externe). En général on suppose que le potentiel φ_d est similaire au potentiel de Zeta (ζ) mesuré par des phénomènes électrocinétiques.70

Figure I.18. Schéma simplifié de la polarisation de la double couche.....71

Figure I.19. Schéma de la polarisation de membrane d'un pore coincé entre deux grains (Revil & Florsch, 2010).72

Figure I.20. Polarisation de Maxwell-Wagner (polarisation d'interface) liée aux perturbations des charges ioniques. (A) L'alignement des charges associées à l'interface solide-liquide sous l'application du champ électrique, (B) l'accumulation des charges à l'interface liquide-air lié au contraste des propriétés électriques entre les différentes phases (Chen & Or, 2006a).74

Figure I.21. Phénomènes de conduction et de polarisation induits dans un milieu poreux à l'échelle de l'espace porale ou du grain en fonction de la fréquence (chaque couleur de flèche des charges électriques représente une fréquence ou un intervalle de fréquences de mesure).75

Figure I.22. Trois différents types de matériaux poreux caractérisés par différents mécanismes de polarisation (Revil & Cosenza, 2010 ; dessin modifié).....76

Figure I.23. Les différentes étapes de la modélisation, (1) Mesures dans le domaine spectral, (2) Choix des modèles mathématiques (empiriques) ou physiques, (3) Informations obtenues sur le milieu étudié.78

Figure I.24. Influence de la variation des paramètres du modèle de Cole-Cole sur les spectres de phase et d'amplitude (d'après Washburne, 1982 ; dessin modifié). Les graphiques de gauche représentent les spectres de phase ($mrad$), les graphiques de droites représentent les spectres d'amplitude ($\Omega.m$). L'axe des X désigne les logarithmes de fréquences (Hz). Concernant les deux graphiques de la première ligne, les paramètres ρ, m, c sont constants et τ est variable. La variation de τ change la position du pic de phase. Concernant les deux graphiques du centre de la figure, ρ, τ, m sont constants et c est variable. Plus c augmente plus la concavité du spectre de phase augmente et le spectre d'amplitude diminue plus rapidement. Concernant les deux dernières graphiques à la dernière ligne, ρ, τ, c sont constants et m est variable. L'augmentation de m induit l'augmentation de la pente du spectre de phase, et la diminution du spectre de l'amplitude.82

Figure I.25. Étapes de la modélisation « électrique + pétrophysique » à partir du modèle de Debye (dessin modifié de Revil & Florsch, 2010).83

Figure I.26. Étapes de la modélisation « électrique + pétrophysique » à partir du modèle de Cole-Cole (Leroy *et al.*, 2008).84

Figure I.27. (A) Exemples de spectres ayant un comportement de type modèle à phase constante Vinegar & Waxman (1984) sur un échantillon de grès argileux et (B) Börner *et al.*

(1996) sur deux échantillons de sables limoneux à deux échelles différentes (laboratoire et forage).....87

Figure I.28. Illustration d'un milieu hétérogène et son correspondant selon l'approche des milieux effectifs (Zhdanov, 2008 ; dessin modifié).....88

Figure I.29. Synthèse des approches DEM pour les cas de saturation totale et de saturation partielle. Les inclusions peuvent être sphériques ou ellipsoïdales. L'inclusion sphérique peut correspondre à des sols de grains grossiers, et les inclusions ellipsoïdales représentent le plus souvent les grains fins comme pour le cas des argiles.....90

Figure I.30. (a) Modèle conceptuel simplifié de l'EDZ et l'EdZ, (b) Modèle conceptuel structural de l'EDZ (~ 1 m) et de l'EdZ (~ 2 m) au laboratoire souterrain du Mont Terri (Bossard *et al.*, 2002). (à noter que l'EdZ peut atteindre des profondeurs bien plus importantes que 2 m).91

Figure I.31. Explication simplifiée de l'origine de la zone endommagée (IRSN, 2009).....93

Figure I.32. Processus de modification des propriétés physiques de la roche liés au creusement (Sato *et al.*, 2000).....94

Figure I.33. (a) Sections de résistivités interprétées ($\Omega.m$) (b) et de phases ($^{\circ}$) à 1 Hz (anneau 1 ; acquisition en juillet 2004 Kruschwitz & Yaramanci, 2004). Il convient de souligner que le radier de la galerie a été couvert d'un revêtement en béton d'environ 70 cm d'épaisseur (zone de résistivités élevées sous le radier en a). Les valeurs des résistivités du béton (supérieures à 64 $\Omega.m$) ont été « écrêtées » dans la section.98

Figure I.34. Schéma explicatif du processus de fracturation dans la galerie 04 du laboratoire de Mont Terri. (Kruschwitz & Yaramanci, 2004).100

Figure I.35. Les sections de résistivités inversées. (a) un an après l'excavation, (b) deux ans après l'excavation, (c) trois ans après l'excavation, (d) section de différence de résistivités inversées entre 2 et 1 ans, (e) section de différence de résistivités inversées entre 3 et 1 ans, (f) section de différence de résistivités inversées entre 3 et 2 ans. La différence de résistivités inversées est calculée à partir de la résistivité mesurée à 2 ou 3 ans après l'excavation soustrait par celle mesurée à 1 ans après l'excavation normalisée par cette dernière ($\Delta\rho = (\rho_{(2),(3)} - \rho_{(1)})/\rho_{(1)}$) pour les cas (d) et (e), $\Delta\rho = (\rho_{(3)} - \rho_{(2)})/\rho_{(1)}$ pour le cas (f) (Bor.1 : Forage horizontale creusé afin de réaliser des mesures de diagraphies électriques en parallèle) (Suzuki *et al.*, 2004).....101

Figure I.36. A gauche : creusement de la galerie 04 et les profils électriques circulaires installés (profil horizontal sur la paroi ne figure pas sur la photo), A droite : plan de position de la galerie 04 dans le laboratoire du Mont Terri Gibert *et al.* (2006).....103

Figure I.37. Sections de résistivités interprétées de la galerie 04 (Gibert *et al.*, 2006).....104

Figure I.38. Sections de résistivité inversées obtenus lors de l'expérimentation de ventilation au laboratoire de Mont Terri (Mayor *et al.*, 2007). On distingue les quatre micro-forages radiaux dessinés avec des petits cercles. Chaque petit cercle correspond à une électrode. **106**

Figure I.39. Section d'un micro-forage possédant une électrode (Mayor *et al.*, 2007).**107**

Figure I.40. Valeurs maximales du tenseur de résistivité obtenues par inversion des données acquises sur 18 zones du front de la galerie (Nicollin *et al.*, 2010). La faille tectonique sur le front est indiquée en gris.....**108**

Chapitre 2. Applications géoélectriques *in situ* dans la Station Expérimentale de Tournemire (Aveyron, France)

Figure II.1. Localisation de la Station Expérimentale de Tournemire. Le tunnel ferroviaire du site est indiqué en rouge (longueur 1885 m.)**115**

Figure II.2. Coupe géologique générale de la Station Expérimentale de Tournemire le long du tunnel (d'après IRSN, 2009).....**116**

Figure II.3. Position des failles secondaire et principale à l'échelle du tunnel (d'après l'IRSN, 2009).**117**

Figure II.4. Positions des échantillons de calcite acquis par Mathieu *et al.* (2000) (d'après Cabrera, 1995). (A) section verticale dans les forages ID 1994, (B) Plan de localisation dans la galerie Ouest (1996) (en marron : échantillons de la zone saine, en jaune et bleu : échantillons de la zone fracturée associée à la faille secondaire, en vert : échantillon de la zone faillée). **118**

Figure II.5. (a) Framboïdes et cristaux cubiques de pyrite dispersés dans les lits argileux, framboïdes de pyrite incluses dans un bioclaste. (b) Pyrite dans une veine à calcite. (c) Cristaux cubiques de pyrite dans une veine à calcite. (d) Pyrite cubique (Py) avec figures de corrosion et gypse automorphe (Gy) (Charpentier, 2001).**118**

Figure II.6. Localisation des forages et des galeries dans la zone centrale de la Station Expérimental de Tournemire (d'après IRSN, 2009). Les numéros N° 1,2,3,4 correspondent aux forages rayonnants mises en place pour l'étude de l'extension et de l'évolution de la zone endommagée. Il s'agit des forages rayonnants (TM) autour du tunnel (N° 1-2), des forages (GEM) autour de la galerie Est-96 (N° 3) et des for ages (GPM) autour de la galerie Est-03 (N° 4).**122**

Figure II.7. Présentation des dimensions (en mètres) et des sections des diverses galeries présentes sur le site selon l'âge du creusement.....**123**

Figure II.8. (a) Vue de l'intérieur du Tunnel ferroviaire, (b) Zone de transition maçonnerie du tunnel (en blanc)-argilite (en gris foncé) observée à l'entrée de la galerie Est-96. La fracturation induite par le creusement est visible sur la paroi. La maçonnerie est de 40-50 cm d'épaisseur.**125**

Figure II.9. Galerie Est-96 (vue du côté Ouest à partir du tunnel).....	125
Figure II.10. Galerie Est-03 (a) premiers 10 m bétonnés en paroi et au radier, (b) suite de la galerie bétonnée seulement au radier (présence des cintres métalliques).	126
Figure II.11. Différents techniques de caractérisation de la zone endommagée autour du tunnel ferroviaire (1882), (A) Caractérisation structurale de l'EDZ sur des échantillons prélevés à partir des forages rayonnants TM (Cabrera, 2005 ; Millard <i>et al.</i> , 2009), (B) Schéma de la fissuration en forme de pelure d'oignon autour du tunnel (Millard <i>et al.</i> , 2009), (C) Mesures de diagraphies ultrasoniques (Contrucci <i>et al.</i> , 2007), (D) Mesures pétrophysiques et de perméabilité sur des échantillons prélevés à partir des forages rayonnants ID (Cabrera, 1995 ; Rejeb, 2005).	127
Figure II.12. Différents techniques de caractérisation de la zone endommagée autour de la galerie Est (1996), (A) Caractérisation structurale de l'EDZ sur des échantillons prélevés à partir des forages rayonnants GEM (Cabrera, 2005), (B) Schéma de la fissuration parallèles à la stratigraphies (fissures de désaturation) autour de la galerie, (C) Mesures de diagraphies ultrasoniques (Contrucci <i>et al.</i> , 2007), (D) Mesures pétrophysiques et de perméabilité au gaz sur des échantillons prélevés à partir des forages MD3 et MD5 (Matray <i>et al.</i> , 2007).	129
Figure II.13. Différentes types de fracturation observés dans la galerie Est-96 (NB : les fractures tectoniques remplies de calcite se trouvent également au radier à l'échelle millimétrique. Celles-ci ne sont pas présentées sur la figure).	131
Figure II.14. Propagation des ondes sismiques dans un milieu à deux couches de vitesses sismiques V1 et V2.	133
Figure II.15. A gauche : profil sismique parallèle à la fissuration à la galerie Est-96. A droite : le modèle de l'EDZ selon les interprétations sismiques quantitatives.	135
Figure II.16. Différents techniques de caractérisation de la zone endommagée autour de la galerie Est-03, (A) Caractérisation structurale de l'EDZ sur des échantillons prélevés à partir des forages rayonnants GPM, (B) Schéma de la fissuration parallèles à la stratigraphies (fissures de désaturation) autour de la galerie, (C) Mesures de diagraphies ultrasoniques (Contrucci <i>et al.</i> , 2007), (D) Mesures pétrophysiques et perméabilité au gaz (Matray <i>et al.</i> , 2007).	136
Figure II.17. Hétérogénéités sédimentaires et structurales observées à la galerie Nord-08..	140
Figure II.18. Synthèse des résultats expérimentaux pour le tunnel de 1882 (Rejeb, 2006)...	141
Figure II.19. Synthèse des résultats expérimentaux pour la galerie Est 1996 (Rejeb, 2006).	142
Figure II.20. (a) Les électrodes impolarisables Cu/CuSO ₄ de grandes longueurs utilisées au laboratoire, (b) Les électrodes Cu/CuSO ₄ réalisées et utilisées <i>in situ</i>	148
Figure II.21. (a) Réalisation des microforages, (b) Utilisation du laser pour le positionnement des électrodes.	148

Figure II.22. (a) Préparation de la bentonite humide à partir d'argile sous forme de poudre, (b) Injection de la bentonite humide dans les microforages.	149
Figure II.23. Électrodes impolarisables de type Cu/CuSO ₄ installées (a) en paroi verticale et (b), (c) au radier de la galerie après l'injection de la bentonite dans les microforages.	149
Figure II.24. Principe de la tomographie 2D pour une acquisition avec le dispositif Wenner- α (appareil de mesure Syscal Pro). Les points illustrent des positions spatiales des données acquises.	152
Figure II.25. Convention utilisée pour la représentation des résistivités et chargeabilités apparentes (PPT) sur les profils en arc concernant le dispositif Wenner- α (la distribution des données est issue des séquences utilisées à la galerie Est-96).	154
Figure II.26. Maillage sous Res2DInv pour l'inversion d'une tomographie de résistivité avec le dispositif de Wenner- α sur le profil au radier.	156
Figure II.27. Processus d'inversion des paramètres PP apparents temporelles ou fréquentielles avec Res2DInv.	158
Figure II.28. Trois étapes de maillage pour une discrétisation 2D : (à gauche) maillage paramétrique, (au centre) maillage du champ secondaire et (à droite) maillage du champ primaire (Günther <i>et al.</i> , 2006).	159
Figure II.29. Etapes d'inversion. La construction des mailles est réalisée à partir de la topographie. Le potentiel primaire définit les facteurs géométriques et les résistivités apparentes. Le maillage secondaire permet de calculer le modèle direct. Le cadre en noir représente les niveaux du calcul du modèle direct et de l'inversion. Ce calcul continue jusqu'à ce que le résultat soit satisfaisant (Günther <i>et al.</i> , 2006).	160
Figure II.30. Comparaison des résistivités et chargeabilités apparentes acquises pour les différentes intensités de tension de sortie (12 V, 25 V, 50 V, 100 V) sur les profils au radier à la galerie Est-96 et à la galerie Nord-08 à partir des électrodes impolarisables (Cu/CuSO ₄) avec le dispositif Wenner.	162
Figure II.31. Augmentation du potentiel résiduel (de V_{Pa} à V_{Pc}) avec l'augmentation du temps d'injection (de a à c) (Reynolds, 1997).	163
Figure II.32. Comparaison des résistivités et chargeabilités apparentes acquises pour des créneaux d'injection de 1 et 2 s sur le profil au radier à la galerie Est-96 avec des électrodes impolarisables (Cu/CuSO ₄) pour les dispositifs Wenner- α et Wenner-Schlumberger.	164
Figure II.33. Comparaison des résistivités et chargeabilités apparentes acquises à partir des différents types d'électrodes (électrodes impolarisables Cu/CuSO ₄ et électrodes en acier) pour 1 et 2 s créneaux d'injection sur les profils au radier dans la galerie Est-96 et dans la galerie Nord-08 avec le dispositif Wenner- α	166

Figure II.34. Spectre de phase et d'amplitude d'un échantillon saturé en eau du robinet mesuré avec un dispositif composé de deux électrodes et à partir des électrodes de Cu/CuSO ₄ , Ag/AgCl et les électrodes en platine. Densité du courant : $0.3 \times 10^{-2} \text{ A/m}^2$ (Vanhala & Soininen, 1995).	168
Figure II.35. Comparaison des spectres de phase des électrodes impolarisables et en acier à $X_c = 7,3 \text{ m}, 7,5 \text{ m}, 7,7 \text{ m}, 7,9 \text{ m}$ sur les profils longitudinaux à la galerie Nord ($a = 20 \text{ cm}$). On donne également les spectres de tension mesurée et de résistance de contact correspondant au spectre de phase bruité (en $X_c = 7,5 \text{ m}$).	170
Figure II.36. Comparaison des spectres de phase des électrodes impolarisables et en acier à $X_c = 8,1 \text{ m}, 8,3 \text{ m}, 8,5 \text{ m}, 8,7 \text{ m}$ sur les profils longitudinaux à la galerie Nord ($a = 20 \text{ cm}$). On donne également les spectres de tension mesurée et de résistance de contact correspondant aux spectres de phase bruités.	171
Figure II.37. Comparaison des spectres de phase des électrodes impolarisables et en acier à $X_c = 10,7 \text{ m}, 11,5 \text{ m}, 12,1 \text{ m}, 12,3 \text{ m}$ sur les profils longitudinaux à la galerie Nord ($a = 20 \text{ cm}$). On donne également les spectres de tension mesurée et de résistance de contact correspondant aux spectres de phase bruités ou à des situations intéressantes discutées dans le texte.	172
Figure II.38. Comparaison des spectres de phase des électrodes impolarisables et en acier à $X_c = 7,5 \text{ m}, 10,7 \text{ m}$ sur les profils longitudinaux et une mesure en paroi Ouest sur le profil transversal à la galerie Nord ($a = 20 \text{ cm}, n = 2$). On donne également les spectres de tension mesurée et de résistance de contact correspondant aux spectres de phase bruités.	173
Figure II.39. Illustration du profil en arc et longitudinal au radier dans la Galerie Est-96 (en bleu : profil des mesures PPS).	176
Figure II.40. Schéma structural simplifié du radier de la Galerie Est-96 (modifié de Cabrera <i>et al.</i> , 2001) et positions des profils électriques.	176
Figure II.41. (a) Vue générale du profil au radier, (b) Équipement Syscal-Pro et son bornier sur lequel sont connectés les 43 électrodes du profil en arc dans la galerie Est-96.	177
Figure II.42. (a) Vue générale de l'acquisition des données PPS au radier (b) les bobines d'injection et de réception de l'équipement SIP FUCHS II. Exemple d'acquisition (dispositif Wenner- α) avec un espacement ($AM=MN=NB$) de 20 cm ($1 \times a$) au profil longitudinal au radier. (A, B) : les électrodes d'injection ; (M, N) : les électrodes de potentiel.	178
Figure II.43. Spectre d'amplitude et de phase des résistances pures de 30 Ω et 221 Ω avec et sans utilisation du filtre pour 50 Hz.	179
Figure II.44. Il s'agit du forage PFG1. La profondeur est de 75 cm. Les points violets correspondent à la localisation des électrodes. Les petits points concernent la localisation des capteurs pour les profils sismiques du LCPC.	181

Figure II.45. Sections des résistivités et des chargeabilités inversées pour les dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle sur le profil longitudinal au radier dans la galerie Est-96 en Juin 2008 (le dispositif dipôle-dipôle est acquis seulement en mode de résistivité, C : fracture remplie de calcite, les flèches indiquent un chemin probable du processus de désaturation, créneau d'injection : 1 s, nombre d'itérations utilisée pour l'inversion : 4).....**182**

Figure II.46. Spectres de l'amplitude de la résistivité complexe, de la phase et de la partie imaginaire de la conductivité apparente pour l'ensemble des mesures spectrales réalisées sur le profil PPS au radier dans la galerie Est-96 pour l'espacement inter-électrode égal à 20 cm (dispositif : Wenner- α). La zone en gris indique les fréquences susceptibles de présenter un effet instrumental parasite lié aux basses résistivités du milieu.**186**

Figure II.47. Spectres de l'amplitude de la résistivité complexe, de la phase et de la partie imaginaire de la conductivité apparente pour l'ensemble des mesures spectrales réalisées sur le profil PPS au radier dans la galerie Est-96 pour l'espacement inter-électrode égal à 40 cm (dispositif : Wenner- α). La zone en gris indique les fréquences susceptibles de présenter un effet instrumental parasite lié aux basses résistivités du milieu.**187**

Figure II.48. Spectres de l'amplitude de la résistivité complexe, de la phase et de la partie imaginaire de la conductivité apparente pour l'ensemble des mesures spectrales réalisées sur le profil PPS au radier dans la galerie Est-96 pour l'espacement inter-électrode égal à 60 cm (dispositif : Wenner- α). La zone en gris indique les fréquences susceptibles de présenter un effet instrumental parasite lié aux basses résistivités du milieu.**188**

Figure II.49. Spectres de l'amplitude de la résistivité complexe, de la phase et de la partie imaginaire de la conductivité apparente pour l'ensemble des mesures spectrales réalisées sur le profil PPS au radier dans la galerie Est-96 pour l'espacement inter-électrode égal à 80 cm (dispositif : Wenner- α). La zone en gris indique les fréquences susceptibles de présenter un effet instrumental parasite lié aux basses résistivités du milieu.**189**

Figure II.50. Spectres de l'amplitude de la résistivité complexe, de la phase et de la partie imaginaire de la conductivité apparente pour l'ensemble des mesures spectrales réalisées sur le profil PPS au radier dans la galerie Est-96 pour l'espacement inter-électrode égal à 100 cm (dispositif : Wenner- α). La zone en gris indique les fréquences susceptibles de présenter un effet instrumental parasite lié aux basses résistivités du milieu.**190**

Figure II.51. Sections de résistivité complexe et de la phase inversée sur le profil longitudinal au radier dans la galerie Est-96 pour 23 Hz, 46 Hz, 93 Hz, 187 Hz, 375 Hz, 750 Hz (dispositif : Wenner- α), nombre d'itération : 4).....**192**

Figure II.52. Sections de résistivité et de phase inversée sur le profil longitudinal au radier à la galerie Est-96 pour 11 Hz, 23 Hz, 46 Hz, 93 Hz, 187 Hz, 375 Hz, 750 Hz (dispositif : Wenner-Schlumberger, nombre d'itération : 4).**193**

Figure II.53. Comparaison des représentations de résistivité, chargeabilité et phase inversée sur le profil au radier de la galerie Est-96 (NB : les coordonnées en X des représentations inversées sont bien évidemment ramenées à la même origine).**195**

Figure II.54. Courbe de décroissance de chargeabilité partielle en fonction de temps au niveau d'une fracture tectonique remplie de calcite (nous remarquons la chargeabilité partielle négative mesurée).**197**

Figure II.55. Mesures de la phase pour quatre échantillons provenant d'un déblai minier (d'après Campbell *et al.*, 2000). Les échantillons 'Brown' et 'Yellow' ne contiennent pas de pyrite. L'échantillon 'Rusty' contient des oxydes de fer.**198**

Figure II.56. Pseudosection de résistivité et chargeabilité sur le profil en arc dans la galerie Est-96 en juin 2008 avec le dispositif Wenner- α (créneau d'injection : 1 s). L'interpolation est réalisée à partir du Surfer 8.0 par l'interpolateur de type « triangulation with linear interpolation ».**200**

Figure II.57. Représentation des trois jeux de données préparés pour l'inversion avec Res2DInv. Cet exemple représente la distribution des données issue du dispositif Wenner-Schlumberger acquis en juin 2008 sur le profil en arc de la galerie Est-96 (les points noirs indiquent chaque point de mesure positionné dans l'espace selon la convention Barker (1989). Nous possédons ici 22 données par paroi verticale et 100 pour le radier).**201**

Figure II.58. Sections de résistivité inversée avec Res2DInv sur le profil en arc de la galerie Est-96 avec les dispositifs Wenner- α + Wenner Schlumberger, Wenner Schlumberger, dipôle-dipôle pour trois différentes parties du profil : paroi Nord, paroi Sud, radier (juin 2008). Les lignes en marron indiquent les limites remarquables de l'EDZ, les lignes en bleu indiquent les limites probables de la zone saine. On donne sur les sections les erreurs RMS obtenues (nombre d'itérations : 2). * Les parois verticales comprennent 11 électrodes et le radier comprend 19 électrodes sans la prise en compte des électrodes à l'intersection « paroi verticale-radier ».**203**

Figure II.59. Sections de chargeabilité inversée avec Res2DInv sur le profil en arc de la galerie Est-96 avec les dispositifs Wenner- α + Wenner Schlumberger, Wenner- α et Wenner Schlumberger pour trois différentes parties du profil : paroi Nord, paroi Sud, radier (juin 2008) (créneaux d'injection : 1 s). Les lignes rouges indiquent les limites probables de l'EDZ interprété comme la désaturation.**206**

Figure II.60. Comparaison des sections de résistivité inversée avec les logiciels d'inversion : (A) Res2DInv et (B) BERT sur le profil en arc dans la galerie Est-96 (données juin 2008). Les points en noir sur la section inversée de résistivité avec BERT représentent les électrodes. **207**

Figure II.61. Spectres d'amplitude de la résistivité complexe ($\Omega.m$) pour trois différents écartements inter électrodes a : 20 cm, 40 cm, 60 cm le long de tout le profil en arc de la galerie Est-96 avec le dispositif Wenner- α (juin 2008). Appareil de mesure : SIP FUCHS II. La zone en gris indique les fréquences susceptibles de présenter un effet instrumental parasite lié aux basses résistivités du milieu.**209**

Figure II.62. Spectre de phase (mrad) pour trois différents écartements inter-électrodes a : 20 cm, 40 cm, 60 cm le long de tout le profil en arc de la galerie Est-96 avec le dispositif Wenner- α (juin 2008). Appareil de mesure : SIP FUCHS II. La zone en gris indique les fréquences susceptibles de présenter un effet instrumental parasite lié aux basses résistivités du milieu.**211**

Figure II.63. Spectre de la conductivité imaginaire (S/m) pour trois différents écartements inter électrodes a : 20 cm, 40 cm, 60 cm le long de tout le profil en arc de la galerie Est-96 avec le dispositif Wenner- α (juin 2008). Appareil de mesure : SIP FUCHS II. La zone en gris indique les fréquences susceptibles de présenter un effet instrumental parasite lié aux basses résistivités du milieu.**212**

Figure II.64. Pseudosections de l'amplitude de résistivité complexe, de la phase et de la partie imaginaire de la conductivité sur le profil en arc de la galerie Est-96 suivant les fréquences 1 Hz, 5 Hz, 11 Hz, 23 Hz, 46 Hz (dispositif Wenner- α).**214**

Figure II.65. Pseudosections de l'amplitude de résistivité complexe, de la phase et de la partie imaginaire de la conductivité apparente sur le profil en arc de la galerie Est-96 suivant les fréquences 93 Hz, 187 Hz, 375 Hz, 750 Hz (dispositif Wenner- α).**215**

Figure II.66. Installations des profils électriques dans la galerie Nord-08 (en rouge : N° 1-2 profils longitudinaux au radier, N°3 profil en arc relatif aux mesures de Polarisation Provoquée Temporelle et de résistivité électrique ; en bleu : N° 4-5 profils longitudinaux au radier relatifs aux mesures de Polarisation Provoquée Spectrale).**221**

Figure II.67. Sections de résistivité et chargeabilité inversée sur le profil N° 1 dans la galerie Nord-08 en juin 2009 (ligne pointillée représente la position du profil en arc, N : Nodules calcaires, les flèches en noir indiquent les fractures néoformées au radier, le cercle en noir indique la position de la fracture tectonique, créneau d'injection : 1 s, nombre d'itération : 3).**225**

Figure II.68. Sections de résistivité et chargeabilité inversée sur le profil N° 2 dans la galerie Nord-08 en juin 2009 (la ligne pointillée représente la position du profil en arc, N : Nodules

calcaire, B : Béton, les flèches en noir indiquent les fractures néoformées au radier ; créneau d'injection : 1 s (Wenner-Sch.), 2 s (Wenner- α) ; nombre d'itération : 4).....**226**

Figure II.69. Sections de résistivité et de chargeabilité inversées (en haut) sur le profil N° 1 (temporelle avec le Wenner- α) et sections de résistivité et de phase inversées (en bas) sur le profil N° 4 (spectral avec le Wenner-Schlumberger) pour $f = 15$ Hz, 60 Hz, 244 Hz, 488 Hz.**228**

Figure II.70. Sections de résistivité et de chargeabilité inversées (en haut) sur le profil N° 2 (temporelle avec le Wenner- α) et sections de résistivité et de phase inversées (en bas) sur le profil N° 5 (spectral avec le Wenner-Schlumberger) pour $f = 15$ Hz, 60 Hz, 244 Hz, 488 Hz.**229**

Figure II.71. Section de résistivité et chargeabilité apparente sur le profil en arc à la galerie Nord-08 en juin 2009 avec le dispositif Wenner- α (créneaux d'injection : 1 s). L'interpolation est faite sous Surfer 8.0 par l'interpolateur de type « triangulation with linear interpolation ».**231**

Figure II.72. Sections de résistivité inversée avec Res2DInv sur le profil en arc de la galerie Nord-08 avec les dispositifs Wenner- α +Wenner Schlumberger, Wenner- α , Wenner Schlumberger, dipôle-dipôle pour trois parties différentes du profil : paroi Est, paroi Ouest, radier (juin 2009). Les lignes en marron indiquent des zones de résistivité élevée associées probablement à un endommagement relativement plus important. *Les parois verticales comprennent 11 électrodes et le radier comprend 17 électrodes sans la prise en compte des électrodes à l'intersection « radier-paroi verticale ».....**232**

Figure II.73. Sections de chargeabilité inversée avec Res2DInv sur le profil en arc de la galerie Nord-08 avec les dispositifs Wenner- α + Wenner Schlumberger, Wenner- α , Wenner Schlumberger pour trois différentes parties du profil : paroi Est, paroi Ouest, radier (juin 2009). Les lignes en marron indiquent le toit de la couche de nodule calcaire.**234**

Figure II.74. Comparaison entre les sections de résistivité et chargeabilité inversées au niveau du radier du profil en arc dans la galerie Nord (1 s) (les flèches montrent la corrélation entre les deux paramètres physiques, N : niveau du nodule calcaire).....**235**

Figure II.75. A partir des profils au radier, comparaison des propriétés électriques « résistivités et chargeabilités » de deux galeries d'âge de creusement différent de 12 ans (GE : Galerie Est-96, GN : Galerie Nord-08, dispositif : Wenner- α , C : Fracture remplie de calcite, N : Nodule calcaire).....**238**

Figure II.76. Plan de l'hexapôle (vue du dessous ; unité en mm). Les éléments « carré » sur le plan constituent les pôles d'injection (A et B) et les pôles de mesure du potentiel électrique M_i et N_i ($i = 1, 2$) (photo prise sur un radier non-bétonné).**240**

Figure II.77. Installation sur le profil au radier de la galerie Est-03 pour deux différentes études méthodologiques.	241
Figure II.78. Les trois étapes de l'installation du profil longitudinal au radier de la galerie Est-03 : (1) mise en place des électrodes à 5 cm de profondeur (depuis la surface du béton), (2) prolongation des microforages jusqu'à l'interface argile-béton, (3) mise en place des électrodes à ~30 cm de profondeur.....	242
Figure II.79. Représentation de l'option « underwater survey » utilisé pour l'inversion des données acquises à partir de 30 cm profond (les flèches illustrent les électrodes) (Loke, 2001).	243
Figure II.80. Cas 1 « Electrodes en acier à 5 cm de profondeur » : sections de résistivité inversée avec les dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle sur le profil longitudinal au radier dans la galerie Est-03 (acquisition en août 2009).....	244
Figure II.81. Cas 1 « Electrodes en acier à 5 cm de profondeur » : sections de chargeabilité inversée avec les dispositifs Wenner- α (1 s), Wenner-Schlumberger (1 s), dipôle-dipôle (1 s) sur le profil longitudinal au radier dans la galerie Est-03 (acquisition en août 2009).....	246
Figure II.82. Cas 2 « Électrodes impolarisables à ~ 30 cm de profondeur » : sections de résistivité inversée avec les dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle sur le profil longitudinal au radier de la galerie Est-03 (acquisition en août 2009) (inversion avec Res2DInv à l'aide de l'option « underwater survey ». La résistivité apparente du béton ρ_a est considérée égale à 150 $\Omega \cdot m$).	248
Figure II.83. Cas 2 « Electrodes impolarisables à 30 cm de profondeur » : sections de chargeabilité inversée avec les dispositifs Wenner- α (1 s), Wenner-Schlumberger (1 s), dipôle-dipôle (1 s) sur le profil longitudinal au radier de la galerie Est-03 (acquisition en août 2009).	250
Figure II.84. Synthèse géoélectrique de caractérisation de l'EDZ dans des galeries radiers non-bétonnés (Galerie Est-96, Galerie Nord-08) et bétonné (Galerie Est-03).	253
Figure II.85. Etude locale des hétérogénéités : fractures de désaturation (ouverture ~ 1 mm) au fond de la galerie Ouest-08 (bleu : profil électrique, jaune : présence des hétérogénéités ciblées). Sur l'axe du front de la galerie, on remarque l'extensomètre qui n'est pas en fonctionnement.	255
Figure II.86. Etude locale des hétérogénéités : fractures de désaturation (4 mm) à la paroi Ouest de la galerie Sud-08 (bleu : profil électrique, jaune : présence de l'hétérogénéité, rouge : hétérogénéités parasites non ciblées de type nodules calcaires)	256
Figure II.87. Etude locale des hétérogénéités : fractures néoformées au radier de la galerie Est-96 (bleu : profil électrique).	257

Figure II.88. Etude locale des hétérogénéités : fractures tectoniques remplies de calcite au fond de la galerie Est-96 (bleu : profil électrique, jaune : position des hétérogénéités ciblées)	258
Figure II.89. Etude locale de l'hétérogénéité : nodule calcaire à la paroi Sud de la galerie Ouest-08 (bleu : profil électrique, jaune trait continu : nodule ciblé (10x20 cm), pointillé : nodules calcaires non ciblés ($x = 0,2 \text{ m}, 0,3 \text{ m}, 0,5 \text{ m}, 0,7-0,8 \text{ m}, 0,9 \text{ m}$)	259
Figure II.90. Photo du profil local « fracture de désaturation (ouverture ~1 mm) » en paroi avec les indications par des flèches blanches des positions des fractures de désaturation (la numérotation correspond aux numéros des électrodes) au fond de la galerie Ouest-08 à la paroi Ouest.	260
Figure II.91. Sections de résistivités (à gauche) et de chargeabilités (à droite) inversées pour les dispositifs Wenner- α (1 s, 2 s, 4 s), Wenner-Schlumberger (1 s) et Wenner- β (1 s) sur le profil local « fractures de désaturation (ouverture ~ 1 mm) » au fond de la galerie Ouest-08 à la paroi Ouest (les cercles noirs et rouges correspondent aux anomalies au niveau des fractures).	261
Figure II.92. Photo du profil local « fracture de désaturation (ouverture ~1-4 mm) » dans la galerie Sud-08 en paroi Ouest avec les indications (flèches blanches) des positions des fractures de désaturation (la numérotation correspond aux numéros des électrodes).	263
Figure II.93. Sections de résistivités (à gauche) et chargeabilité (à droite) inversées sur le profil local « fractures de désaturation (~1-4 mm) » pour les dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger et Wenner- β dans la galerie Sud-08 en paroi Ouest (cercles noirs et rouges correspondent aux anomalies au niveau des fractures).	264
Figure II.94. En Haut : Photo du profil local « fractures néoformées » au radier de la galerie Est-96 avec les indications en forme de rectangle noir pour les fractures néoformées (les numérotations correspondent aux numéros des électrodes), En bas : Sections des résistivités inversées pour les dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger et Wenner- β sur le même profil (les polygones noirs correspondent aux anomalies de résistivité élevée au niveau des fractures néoformées).	266
Figure II.95. En haut : Photo du profil local « fractures néoformées » au radier de la galerie Est-96 avec les indications en forme de rectangle noir pour les fractures néoformées (les numérotations correspondent aux numéros des électrodes), En bas : Sections des chargeabilités inversées pour les dispositifs Wenner- α (1 s, 4 s); Wenner-Schlumberger (1 s) et Wenner- β (1 s) sur le même profil (les polygones rouges correspondent aux anomalies de faible chargeabilité au niveau des fractures néoformées).	267
Figure II.96. En Haut : Photo du profil local « fractures tectoniques » en paroi (les numérotations correspondent aux numéros des électrodes), En bas : Sections des résistivités	

inversées pour les dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle sur le profil local « fractures tectoniques » au fond de la galerie Est-96 en paroi (les cercles noirs correspondent aux anomalies de résistivité au niveau des fractures tectoniques).....**270**

Figure II.97. En haut : Photo du profil local « fractures tectoniques » en paroi (numérotations correspondent aux numéros des électrodes), En bas : Sections de chargeabilités inversées pour les dispositifs Wenner- α (1 s, 2 s) ; Wenner-Schlumberger (1 s, 2 s) et dipôle-dipôle (1 s) sur le profil local « fractures tectoniques » au fond de la galerie Est-96 en paroi (les cercles rouges correspondent aux anomalies de chargeabilité au niveau des fractures tectoniques, échelle de couleur limitée).**271**

Figure II.98. Les valeurs de chargeabilités de certains roches et minéraux (Loke, 2001).**272**

Figure II.99. A gauche : Photo du profil local « nodule calcaires » avec les indications des nodules parasites entourés en jaune (cercles pointillés) et nodule ciblé (cercle continu) (les numérotations correspondent aux numéros des électrodes), A droite : Sections de résistivité et chargeabilité inversées pour les dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle sur le profil local « nodule calcaire » dans la galerie Ouest-08 paroi sud (les cercles noirs et rouges correspondent aux anomalies au niveau des nodules).**273**

Figure II.100. Impact des variations saisonnières d'hygrométrie sur la résistivité et la chargeabilité avec le dispositif Wenner- α à partir du profil au radier dans la galerie Est-96 (2 périodes d'acquisition : Juin 2008 - Février 2009). La ligne en marron sur les sections de résistivité inversée indique la profondeur de la zone endommagée. Les cercles en marron sur les sections de résistivité et de chargeabilité désignent la désaturation de la roche (noté D). Les flèches en noir sur la section de résistivité inversée montrent le développement de la désaturation en février 2009. Les cercles en rouge sur les sections de chargeabilité inversée indiquent les anomalies correspondant à la minéralisation dans les fractures tectoniques remplies de calcite (noté C). Sur les sections de différence le bleu indique les zones où les résistivités ou chargeabilités sont plus importantes en février, le rouge indique les zones où les résistivités ou chargeabilités sont plus importantes en juin 2008.....**278**

Figure II.101. Etude de l'impact des variations saisonnières d'hygrométrie sur la résistivité avec le dispositif dipôle-dipôle à partir du profil au radier de la galerie Est-96 (2 périodes d'acquisition : Juin 2008 - Février 2009).....**279**

Figure II.102. Comparaison entre la section inversée de résistivité en février et la section de la variation de chargeabilité. Les zones en rouge indiquent la diminution des valeurs de chargeabilité en février. Les flèches en noir indiquent les zones désaturées probables.**280**

Figure II.103. Comparaison de deux méthodes d'inversion « inversion classique et inversion time-lapse » pour l'étude géoélectrique des variations saisonnières sur le profil au radier dans la galerie Est-96 (dispositifs utilisées : Wenner- α , Wenner-Schlumberger).**283**

Figure II.104. Comparaison de deux méthodes d'inversion « inversion classique et inversion time-lapse » pour l'étude géoélectrique des variations saisonnières sur le profil au radier dans la galerie Est-96 (dispositif utilisé : dipôle-dipôle).....	284
Figure II.105. Variation des résistivités et chargeabilités apparentes sur le profil en arc dans la galerie Est-96 pour les deux périodes de l'année (à 9 mois d'intervalle) : juin 2008 et février 2009 (dispositifs utilisés : Wenner- α , Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle ; créneau d'injection : 1 s). L'interpolation a été réalisée à partir du logiciel Surfer 8.0 avec un interpolateur de type « triangulation with linear interpolation ».....	285
Figure II.106. Variations des résistivités inversées sur la partie au radier du profil en arc de la galerie Est-96 pour deux périodes de l'année (à 9 mois d'intervalle) : juin 2008 (J) et février 2009 (F) (dispositif utilisé : Wenner- α). Les flèches indiquent la direction de la désaturation probable.....	286
Figure II.107. Variations des résistivités inversées aux parois et au radier du profil en arc dans la galerie Est-96 pour deux périodes de l'année (à 9 mois d'intervalle) : juin 2008 (J) et février 2009 (F) (dispositif utilisé : Wenner-Schlumberger). Les flèches indiquent la direction de la désaturation probable.	287
Figure II.108. Variations des résistivités inversées aux parois et au radier du profil en arc dans la galerie Est-96 pour deux périodes de l'année (à 9 mois d'intervalle) : juin 2008 (J) et février 2009 (F) (dispositif utilisé : Wenner- α et Wenner-Schlumberger). Les flèches indiquent la direction de la désaturation probable.	288
Figure II.109. Variations des résistivités inversées aux parois et au radier du profil en arc dans la galerie Est-96 pour deux périodes de l'année (à 9 mois d'intervalle) : juin 2008 (J) et février 2009 (F) (dispositif utilisé : dipôle-dipôle). Les flèches indiquent la direction de la désaturation probable.....	289
Figure II.110. Variations des chargeabilités inversées sur la partie au radier du profil en arc dans la galerie Est-96 pour deux périodes de l'année (à 9 mois d'intervalle) : juin 2008 (J) et février 2009 (F) (dispositif utilisé : Wenner- α). Les flèches indiquent la direction de la désaturation probable.	290
Figure II.111. Variations des chargeabilités inversées aux parois et au radier du profil en arc dans la galerie Est-96 pour deux périodes de l'année (à 9 mois d'intervalle): juin 2008 (J) et février 2009 (F) (dispositif utilisé : Wenner-Schlumberger). Les flèches indiquent la direction de la désaturation probable.....	291
Figure II.112. Variations des chargeabilités inversées aux parois et au radier du profil en arc dans la galerie Est-96 pour deux périodes de l'année (à 9 mois d'intervalle): juin 2008 (J) et février 2009 (F) (dispositif utilisé : Wenner- α et Wenner-Schlumberger). Les flèches indiquent la direction de la désaturation probable.....	292

Chapitre 3. Application en laboratoire: propriétés électromagnétiques aux basses fréquences des échantillons argilo – sableux non-consolidés saturés

Figure III.1. Différents appareils de mesures utilisés lors des mesures en laboratoire : (A) le SIP FUCHS II, (B) le NumetriQ, (C) le SECR-1.....**300**

Figure III.2. Spectre de l'amplitude de résistivité complexe (Ω) et de phase (mrad) pour des résistances pures de $R = 1 \Omega$, 5Ω , 15Ω , 30Ω , 100Ω , 433Ω mesurées par le SIP FUCHS (les barres d'erreur affichées sont calculées par le SIP FUCHS et elles ne sont pas significatives).**304**

Figure III.3. Spectre de l'amplitude de résistivité complexe (Ω) et de phase (mrad) pour des résistances pures de $R = 1 \text{ k}\Omega$, $5 \text{ k}\Omega$, $10 \text{ k}\Omega$ mesurées par le SIP FUCHS (les barres d'erreur affichées sont calculées par le SIP FUCHS).**305**

Figure III.4. Spectre de l'amplitude de résistivité complexe (Ω) et de phase (mrad) pour des résistances pures de l'ordre de $R = 1 \Omega$, 10Ω , 15Ω , 30Ω , 100Ω , 221Ω mesurées par le NumetriQ.....**307**

Figure III.5. Spectre d'amplitude de résistivité complexe (Ω) et de phase (mrad) pour des résistances pures de $R = 681 \Omega$, $1 \text{ k}\Omega$, $5 \text{ k}\Omega$, $10 \text{ k}\Omega$ mesurées par le NumetriQ.....**308**

Figure III.6. Spectre d'amplitude de la résistivité complexe (Ω) et de phase (mrad) pour des résistances pures de $R = 5,1 \Omega$, 100Ω , 200Ω , 511Ω , $1 \text{ k}\Omega$ avec le SECR-1 (mesures effectuées lorsqu'une des électrodes d'injection était connectée en série avec une résistance de $2 \text{ k}\Omega$ pour le contrôle de la densité du courant injectée).**309**

Figure III.7. Comparaison des deux appareils de mesure « SIP FUCHS » et « NumetriQ » en fonction des résistances utilisées (à gauche : spectre de phase (mrad), à droite : tableaux des déphasages correspondants).....**311**

Figure III.8. Etude des différents contacts « échantillon-électrode » (A) contact direct, (B) contact à partir de la bentonite, (C) contact à partir d'une argile non-gonflante (argile rouge).**313**

Figure III.9. Spectres d'amplitude et de phase des mesures PPS acquises à partir d'un contact (a) direct électrode-échantillon, (b) assuré par une argile gonflante (bentonite) et (c) assuré par une argile non-gonflante (argile rouge).....**314**

Figure III.10. Schéma du porte-échantillon cylindrique avec les hauteurs d'échantillons mesurées (A, B : électrodes d'injection ; M, N : électrodes de potentiel) (sans échelle).**315**

Figure III.11. Spectre d'amplitude ($\Omega.m$) et de phase (mrad) de l'échantillon d'eau pour différents niveaux ($h = 10 \text{ cm}$, 18 cm , 23 cm) et salinités ($\sigma_w = 0,514 \text{ mS/cm}$, $7,1 \text{ mS/cm}$). Les barres d'erreur affichées sont calculées par le SIP FUCHS (mesures A. Ghorbani).....**316**

Figure III.12. Modèle 3D construit à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics pour le calcul du coefficient géométrique du porte-échantillon utilisé lors des mesures en laboratoire.....	318
Figure III.13. Stratégie de mesure pour le contrôle de l'homogénéité de l'échantillon synthétique préparé.	320
Figure III.14. Contrôle de l'homogénéité des mélanges de deux teneurs extrêmes en argile (100 % et 1 %) de type kaolinite à partir du SIP FUCHS (saturation en eau déminéralisée).	321
Figure III.15. Contrôle de l'homogénéité des mélanges pour deux teneurs extrêmes en argile (100 % et 1 %) de type bentonite avec le SIP FUCHS (saturation en eau déminéralisée).....	322
Figure III.16. Contrôle de l'homogénéité des mélanges de différents teneurs en argile (100 %, 20 %, 5 %, 1 %) de type Kaolinite à partir du NumetriQ et du SECR-1 (saturation en eau déminéralisée).	324
Figure III.17. Comparaison des réponses spectrales du SIP FUCHS et du NumetriQ sur deux jours successifs à partir d'un échantillon argileux de type kaolinite (saturation en eau déminéralisée).	326
Figure III.18. Comparaison des réponses spectrales du SIP FUCHS et du NumetriQ entre deux jours successifs à partir d'un échantillon argileux de type Bentonite (saturation en eau déminéralisée).	327
Figure III.19. Comparaison des réponses spectrales du SIP FUCHS et du NumetriQ à partir d'échantillons argilo-sableux saturés en eau déminéralisée (il s'agit de deux différentes argiles : Kaolinite & Bentonite).	328
Figure III.20. Etude des réponses spectrales SIP FUCHS et NumetriQ en fonction des électrolytes saturant les échantillons argilo-sableux le premier jour (eau déminéralisée, puis en électrolytes de conductivité : $\sigma_{\omega} = 0,1824 \text{ mS/cm}$, $1,8093 \text{ mS/cm}$).	330
Figure III.21. Etude des réponses spectrales SIP FUCHS et NumetriQ en fonction des électrolytes saturant les échantillons argilo-sableux le premier jour (eau déminéralisée, puis en électrolytes de conductivité : $\sigma_{\omega} = 0,1824 \text{ mS/cm}$, $1,8093 \text{ mS/cm}$).	331
Figure III.22. Spectres d'amplitude ($\Omega \cdot \text{m}$) et de phase (mrad) pour différentes teneurs en argile. Les échantillons sont composés de Kaolinite (N° 1 et N° 2) et de Sable (saturation en eau déminéralisée).	343
Figure III.23. Spectres des parties réelle σ' et imaginaire σ'' de la conductivité complexe pour différentes teneurs en argile. Les échantillons sont composés de Kaolinite (N° 1 et/ou N° 2) et de Sable (saturation en eau déminéralisée).	344
Figure III.24. Spectres d'amplitude ($\Omega \cdot \text{m}$) et de phase (mrad) pour différentes teneurs en argile. Les échantillons sont composés de Bentonite (N° 1 et/ou N° 2) et de Sable (saturation en eau déminéralisée).	345

Figure III.25. Spectres des parties réelle σ' et imaginaire σ'' de la conductivité complexe pour différents teneurs en argile. Les échantillons sont composés de Bentonite (N° 1 et N° 2) et de Sable (saturation en eau déminéralisée).....**347**

Figure III.26. Influence de la minéralogie pour une même famille d'argile de type Kaolinite (argile non-gonflante) dans un mélange saturé en eau déminéralisée sur les phénomènes de conduction et de polarisation (à gauche : spectre de la conductivité réelle, à droite : spectre de la conductivité imaginaire).....**349**

Figure III.27. Influence de la minéralogie pour une même famille d'argile de type Bentonite (argile gonflante) dans un mélange saturé en eau déminéralisée sur les phénomènes de conduction et de polarisation (à gauche : spectre de la conductivité réelle, à droite : spectre de la conductivité imaginaire).....**349**

Figure III.28. Influence de la minéralogie d'argile dans un mélange sur les phénomènes de conduction et de polarisation (à gauche : spectre de la conductivité réelle $\sigma'(S/m)$, à droite : spectre de la conductivité imaginaire $\sigma''(S/m)$).....**352**

Figure III.29. Etude de l'influence de la salinité de l'électrolyte sur la conduction ohmique à partir d'échantillons composés de Kaolinite N°1 (de différents teneurs) et de Sable (σ' : partie réelle de la conductivité complexe). La teneur en Kaolinite N°1 de l'échantillon est indiquée en haut à gauche de chaque figure.....**354**

Figure III.30. Etude de l'influence de la salinité de l'électrolyte sur la conduction ohmique à partir d'échantillons composés de Kaolinite N°2 (de différents teneurs) et de Sable (σ' : partie réelle de la conductivité complexe). La teneur en Kaolinite N°2 de l'échantillon est indiquée en haut à gauche de chaque figure.....**355**

Figure III.31. Etude de l'influence de la salinité de l'électrolyte sur la conduction ohmique à partir d'échantillons composés de Bentonite N° 1 ou Bentonite N° 2 (de différents teneurs) et de sable (σ' : partie réelle de la conductivité complexe). La teneur en Bentonite N° 1 et Bentonite N°2 de l'échantillon est indiquée en bas à gauche de chaque figure.....**356**

Figure III.32. Dépendance de la conduction ohmique à la salinité de l'électrolyte à partir des échantillons composés de Kaolinite N° 1 ou de Bento nite N° 2 (20 % en teneur) et de sable (σ' : partie réelle de la conductivité complexe).....**358**

Figure III.33. Etude de l'influence de la salinité de l'électrolyte sur la polarisation à partir d'échantillons composés de Kaolinite N° 1 (de différents teneurs) et de sable ($\sigma''(S/m)$: conductivité imaginaire).**359**

Figure III.34. Etude de l'influence de la salinité de l'électrolyte sur la polarisation à partir d'échantillons composés de Kaolinite N° 2 (de différentes teneurs) et de sable ($\sigma''(S/m)$: conductivité imaginaire).**360**

Figure III.35. Etude de l'influence de la salinité de l'électrolyte sur la polarisation à partir d'échantillons composés de Bentonite N° 1 ou Bentonite N° 2 (de différentes teneurs) et de sable ($\sigma''(S/m)$: conductivité imaginaire).**361**

Figure III.36. Dépendance de la polarisation à la salinité d'électrolyte à partir d'échantillons composés de Kaolinite N° 1 ou Bentonite N° 2 de 20 % en teneurs et de sable ($\sigma''(S/m)$: conductivité imaginaire).**363**

Figure III.37. (A) Etat de l'échantillon après séchage à l'étuve, (B) Echantillon séché mis en forme de poudre avant la re-saturation.**365**

Figure III.38. Spectres d'amplitude ($\Omega.m$) et de phase (mrad) de la résistivité, de la conductivité réelle (S/m) et de la conductivité imaginaire (S/m) avant et après le traitement thermique (chauffage de l'échantillon à l'étuve à 150 °C pendant deux jours)..... **366**

Figure III.39. Granulométrie de deux Kaolinites (N° 1 et N° 2). Les mesures de granulométrie à laser ont été effectuées à sec au centre de l'INRA Orléans. Deux répétitions ont été faites pour chaque échantillon. L'écart entre les deux répétitions est probablement lié à la ré-humectation de l'argile entre les deux mesures. Lors de la mesure, la désagglomération des particules n'a pas été complètement achevée, il s'agit donc plutôt des tailles d'agrégats.....**368**

Figure III.40. Granulométrie de la Bentonite N° 2. Les mesures de granulométrie à laser ont été effectuées à sec au centre de l'INRA Orléans. Deux répétitions ont été faites pour chaque échantillon. L'écart entre les 2 répétitions est probablement lié à la ré-humectation de l'argile entre les deux mesures. Lors de la mesure, la désagglomération des particules n'a pas été complètement achevée, il s'agit donc plutôt des tailles d'agrégats.**368**

Figure III.41. Influence de variation de la taille des grains de sable sur le spectre d'amplitude ($\Omega.m$) et de phase (mrad) de la résistivité et sur les spectres des parties réelle et imaginaire de la conductivité (S/m).....**369**

TABLES DES TABLEAUX

Chapitre 1. Etude bibliographique

Tableau I.1. Introduction des équations de Maxwell dans les domaines temporel et fréquentiel.	52
Tableau I.2. Principaux minéraux à conduction électronique.	55
Tableau I.3. Organigramme récapitulatif de l'estimation des propriétés pétrophysiques et hydrauliques à partir des paramètres électriques (Slater, 2007).....	67
Tableau I.4. Ordres de grandeur des paramètres Cole-Cole et leurs relations avec des propriétés et/ou processus physico-chimiques du milieu étudié.	81
Tableau I.5. Calendrier des opérations liées à l'excavation et aux mesures électriques dans l'expérimentation de Gibert <i>et al.</i> (2006).	103
Tableau I.6. Tableau récapitulatif des expérimentations réalisées.....	110

Chapitre 2. Applications géoélectriques *in situ* dans la Station Expérimentale de Tournemire (Aveyron, France)

Tableau II.1. Propriétés minéralogique, chimique et pétrophysique de l'argilite de Tournemire (modifié, d'après Boisson, 2005).....	120
Tableau II.2. Caractéristiques des dispositifs utilisés pour la prospection sismique dans la galerie Est-03 (Côte & Leparoux, 2007, 2008).	138
Tableau II.3. Synthèse de la méthodologie appliquée dans les galeries non-bétonnées.	150
Tableau II.4. Profondeur d'investigation pour les dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle d'après Roy & Apparao (1971) et Barker (1989).	153
Tableau II.5. Synthèse des logiciels d'inversion des données de résistivités et de PP (chargeabilité, phase) dans les domaines temporel et spectral.	155
Tableau II.6. Paramètres de maillage et d'inversion utilisés lors des traitements avec Res2DInv.....	158
Tableau II.7. Teneurs minéralogiques indicatives (en % massique) pour trois habitus de l'échantillon prélevé au niveau du remplissage d'une fracture remplie de calcite sur le profil électrique au radier de la galerie Est-96 (analyses DRX réalisées par C. Fontaine, HydrASA-Poitiers, à l'aide d'un dispositif Dremel équipé d'une micro-pointe diamantée).....	197
Tableau II.8. Récapitulatif du nombre de données correspondant à différentes parties du profil en arc à la galerie Est-96 en fonction du dispositif utilisé.	202
Tableau II.9. Synthèse et comparaison de l'extension de l'EDZ sur le profil longitudinal au radier (perpendiculaire aux fracturations) dans la galerie Est-96 estimée à partir de nos expérimentations (en bleu) et de diverses méthodes de caractérisation.	219

Tableau II.10. Synthèse et comparaison de l'extension de l'EDZ sur le profil en arc (parallèle aux fractures sur la partie du radier) dans la galerie Est-96 estimée à partir de nos expérimentations (en bleu) (la profondeur d'investigation aux parois verticales est de 56 cm, au radier de 82 cm) et de diverses méthodes de caractérisation.....	219
Tableau II.11. Récapitulatif du nombre de données correspondant aux différentes parties du profil en arc à la galerie Nord-08 en fonction du dispositif utilisé.	231
Tableau II.12. Caractéristiques du profil localisé sur les fractures de désaturation dans la Galerie Ouest-08 en paroi et des paramètres d'acquisition.	255
Tableau II.13. Caractéristiques du profil localisé sur les fractures de désaturation dans la Galerie Sud-08 en paroi et des paramètres d'acquisition.	256
Tableau II.14. Caractéristiques du profil localisé sur les fractures néoformées à la Galerie Est-96 au radier et des paramètres d'acquisitions.	257
Tableau II.15. Caractéristiques du profil localisé sur les fractures tectoniques remplies de calcite à la Galerie Est-96 en paroi et des paramètres d'acquisitions.	258
Tableau II.16. Caractéristiques du profil localisé sur un nodule calcaire à la Galerie Ouest-08 en paroi et des paramètres d'acquisitions.	259
Tableau II.17. Paramètres d'inversion du profil au radier pour l'étude de deux méthodes d'inversion : inversion classique et inversion time-lapse.....	282

Chapitre 3. Application en laboratoire : propriétés électromagnétiques aux basses fréquences des échantillons argilo – sableux non-consolidés saturés

Tableau III.1. Fréquences et répétitions des mesures utilisées par le SIP FUCHS II.....	301
Tableau III.2. Caractéristiques techniques des différents appareils de mesure utilisés.....	302
Tableau III.3. Gamme des résistances pures utilisées pour le SIP FUCHS, le NumetriQ et le SECR-1.	303
Tableau III.4. Valeurs des déphasages (mrad) obtenues à partir des mesures PPS effectuées sur des résistances pures ($R = 1 \Omega, 5 \Omega, 15 \Omega, 30 \Omega, 100 \Omega, 433 \Omega$) par le SIP FUCHS.	305
Tableau III.5. Valeurs des déphasages (mrad) obtenues à partir des mesures PPS effectuées sur des résistances pures ($R = 1 \text{ k}\Omega, 5 \text{ k}\Omega, 10 \text{ k}\Omega$) par le SIP FUCHS.....	306
Tableau III.6. Valeurs des phases (mrad) obtenues lors de mesures PPS effectuées sur des résistances pures ($R = 1 \Omega, 10 \Omega, 15 \Omega, 30 \Omega, 100 \Omega, 221 \Omega$) par le NumetriQ.	307
Tableau III.7. Valeurs des phases (mrad) obtenues à partir des mesures PPS effectuées sur des résistances pures ($R = 681 \Omega, 1 \text{ k}\Omega, 5 \text{ k}\Omega, 10 \text{ k}\Omega$) par le NumetriQ.	308

Tableau III.8. Valeurs des phases (mrad) obtenues à partir des mesures PPS effectuées sur des résistances pures ($R = 5,1 \Omega$, 100Ω , 200Ω , 511Ω , $1 \text{ k}\Omega$) avec le SECR-1.....	310
Tableau III.9. Déphasages mesurées pour l'échantillon d'eau avec différents remplissages et conductivités à $f = 750 \text{ Hz}$	317
Tableau III.10. Analyses (1) DRX effectuées à partir des échantillons bruts et de la fraction argileuse, (2) BET et (3) CEC des échantillons de Kaolinite (N°1 et N°2) en poudre.....	338
Tableau III.11. Analyses (1) DRX effectuées à partir des échantillons bruts et de la fraction argileuse, (2) BET et (3) CEC des échantillons de Bentonite (N°1 et N°2) en poudre.	338
Tableau III.12. Bilan synthétique des échantillons argilo-sableux préparés (* la mesure n'a pas été effectuée en raison de la sensibilité de l'appareil pour une gamme de conductivité importante, --- déstockage du matériau utilisé).	341

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier **Christian Camerlynck** d'avoir pensé à moi pour ce sujet de thèse sur lequel j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler pendant ces quatre années. Christian, je te remercie également d'avoir partagé toutes tes connaissances scientifiques, tu avais toujours des réponses étoffées (c'est tellement important dans la vie d'une petite thésarde) et je n'oublie pas non plus ton amitié. Ensuite, je remercie infiniment mon directeur de thèse **Philippe Cosenza**. Philippe, ta bonne humeur, ta patience et ta confiance en moi ont canalisé ma nature impatiente et perfectionniste ! Je suis reconnaissante pour toute ta gentillesse, ton amitié, tes accompagnements sur le terrain, tes touches magiques sur mes documents et pour tes précieux conseils qui ont guidé mon travail. Sans toi, ce travail n'aurait pas été accompli. Mon seul regret est de ne pas pouvoir continuer à travailler sous ton aile. Peut-être un mal pour un bien, cette autonomie m'a forgé une autre personnalité. J'exprime aussi ma gratitude envers **Ahmad Ghorbani**. Ahmad, merci pour les encouragements que tu as su faire au bon moment, ta disponibilité, tes explications avec patience et pour m'avoir transmis toutes tes connaissances. Pour moi, ça a été très rassurant et agréable de travailler avec un collègue comme toi. Un grand merci aussi à **Nicolas Florsch**. Nicolas, tu as élargi mon horizon scientifique en me donnant l'occasion de travailler avec toi sur divers aspects de la méthode et de profiter de ton immense culture scientifique, le tout avec bonne humeur, un peu de musique et toute ton amitié. J'exprime également ma reconnaissance envers **André Revil** qui est pour moi un chercheur impressionnant. André, le travail avance aisément grâce à ta générosité scientifique, ton efficacité et en plus avec ta modestie. En tout cas, la science avance à grand pas à tes côtés. Je considère que j'ai été très chanceuse de t'avoir connu et d'avoir profité de tes conseils et de tes commentaires. Je souhaite remercier également l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) d'avoir permis, par son soutien financier et sa collaboration scientifique, de réaliser cette étude. Je n'oublie pas **Jean Claude Gros** qui a été mon premier tuteur à l'IRSN avant de partir à la retraite. Jean Claude, je vous suis reconnaissante de vos efforts que vous avez déployés pour que je puisse bénéficier d'un financement complet auprès de l'IRSN. Je sais bien que malgré votre départ, vous avez toujours veillé de loin à l'avancement de mon travail. Je souhaite remercier également **Justo Cabrera**. Justo, un « muchas gracias » pour votre sympathie, votre collaboration, votre soutien à chaque JDD de l'IRSN et pour vos idées innovantes qui m'ont permis de réaliser un travail original. J'en profite également pour exprimer mes remerciements à tous les membres du laboratoire LR2S, plus spécifiquement à **Jean Michel Matray**, **Jean-Dominique Barnichon**, **Pierre Dick** pour les discussions enrichissantes. Ainsi à **Sylvain Bassot**, **Elisabeth Tinseau**, **Saoussen Laribi** et à **Thomas Reiss** pour leurs aides. A mes chères amies, **Majda** et **Julia** merci de m'avoir encouragée et d'être restées toujours si proche même

s'il était parfois difficile de se voir à cause des nombreuses préoccupations de la thèse. Merci à **Fethi** et **Joachim** pour la bonne ambiance entre doctorants de l'IRSN. Il est impossible que j'oublie de remercier **Angélique Bidault** sans qui tout aurait été en désordre. Angélique, je te remercie infiniment pour ta gentillesse et pour ta présence lors de mes appels à l'aide. Mes remerciements s'adressent aussi à **Patrick Desveaux**. A chaque mission, il a assuré toutes les bonnes conditions à Tournemire avec en prime toute sa bonne humeur et sa bonne volonté. Je remercie également tous les membres de mon jury. J'exprime ma reconnaissance envers **Maria Zamora** et **Philippe Côte**. Ils m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de ma thèse. Je remercie également **Roger Guérin** pour avoir été mon examinateur et pour ses précieuses corrections afin d'améliorer mon manuscrit. Je n'oublie pas non plus **Alain Tabbagh** d'avoir été si gentil de corriger une partie de mon manuscrit, qui m'a fait gagner du temps et de la rigueur scientifique sur ma thèse. Je sais bien que le grade de docteur, ce n'est qu'un début dans ma vie de recherche. Mon souhait est d'atteindre un jour le niveau de connaissance scientifique des membres de mon jury. Je remercie infiniment **Thomas Günther** qui m'a accordé généreusement sa gentillesse, sa collaboration et son soutien scientifique à propos de l'inversion. Thomas, merci de ne pas m'avoir laissée confronter seule face à l'inversion d'une géométrie complexe (!) et de m'avoir guidée par ton expertise internationalement reconnue. Je remercie également chaleureusement tous les membres du laboratoire Sisyphé mes premières pensées s'adressent à **Julien Thiesson** que je considère comme un frère spirituel. Julien, en ta présence, j'ai eu l'impression que tout irait toujours bien. En tous cas, tu m'as toujours considéré comme une étudiante sérieuse et travailleuse. Vrai ou faux, ça m'a bien motivée en tous cas. Merci aussi à **Fayçal Rejiba**, mon tunisien préféré, c'est tellement agréable d'avoir un collègue comme toi. Ensuite ceux que j'ai le plus sollicité pour de nombreux besoins. **Maya Sitruk**, je ne me souviens pas combien de fois tu m'as sauvée des virus informatiques, sans toi ma thèse aurait duré encore plus longtemps. **Sébastien Flageul**, je te remercie de m'avoir aidée à chaque fois pour la préparation des missions et m'avoir fait confiance en me confiant tes appareils en cours de développement. **Valérie Girard**, merci de m'avoir facilité la vie à chaque étape administrative. Enfin mes remerciements vont à mes chers amis sisyphiens. **Asal**, mes collègues de bureau, **Marie Oussou**, **Cyril** (j'avais un problème et lui il avait la solution), **Mohamed-Amine** (à qui je peux sans aucun doute confier mon bonsai), **Samir** (le plus rapide prospecteur d'électrostatique cf. une journée de terrain à Tournemire aller-retour "manip" compris), **Solène** (mon soutien féminin et la nouvelle chef de bureau), **Quentin** (meilleur compagnon pour prendre un verre à la fin des dures journées de thèse) merci pour toute la convivialité et vos amitiés. Merci à **Claire** (facile à reconnaître noyée sous des cartes mag. des années 80 en noir et blanc, ma responsable en français et ma demi-sœur adoptive), **Pauline** (merci d'avoir attendu

patiemment de lire ma thèse, je savais qu'au moins il y aura toi qui allait la lire outre les rapporteurs, chanceuse d'avoir une copine si joyeuse et toujours positive comme toi et merci pour tous les discussions scientifiques), **Amine** (un ami unique à qui j'ai toujours pu faire confiance, heureusement que tu étais toujours là), **Rémi** (sans ses petites notes qu'il accroche partout sur mon écran ou ses changements de fond d'écran d'ordi, la vie aurait été monotone et merci encore pour le plaisir du partage de même langage : Res2Dinv, Syscal Pro...). *Teşekkürler* aux copines qui ont toujours été avec moi **Gülce**, et malgré les kilomètres : **Şebnem, Elif**. J'aimerais aussi remercier les familles **Sandal, Erdoğan** et **Grand** qui m'ont assuré de très bonnes conditions et de la convivialité par leur accueil en France. Finalement, je remercie **mes parents** de m'avoir soutenue financièrement et personnellement afin que je puisse réussir ainsi que pour tous les encouragements et leur confiance. Ainsi à mon oncle, ma tante et ma cousine qui sont venus exceptionnellement pour moi afin de m'encourager et partager la joie du grade de docteur. Je remercie ainsi particulièrement à ma sœur, **Gülçin**, qui a toujours apporté du bonheur et une bonne compagnie à ma vie. Finalement, je finis par remercier mon fiancé **Türker**, qui a été mon impulsion pour venir en France. Sans lui, je n'aurais pas eu suffisamment de courage et patience pour me lancer dans cette aventure. Je te remercie pour tout ton amour et pour le bonheur que tu as toujours su m'offrir généreusement. Il est assez difficile d'énumérer tous les bons souvenirs durant mes quatre années de thèse et tous les amis et les collègues que j'ai rencontrés et qui m'ont aidé. Néanmoins, je vais garder précieusement en souvenir tous les moments, échanges...

Gonca OKAY
Paris, mai 2011

INTRODUCTION GENERALE

La gestion et l'avenir des déchets radioactifs deviennent des problématiques environnementales majeures dans les pays développés. En France notamment, la gestion des déchets radioactifs de Haute Activité (HA) à Vie Longue (VL) (durée typique de l'ordre de 10^6 ans) est soumise à un cadre législatif bien défini : la loi de Recherche sur la Gestion de déchets radioactifs du 30 décembre 1991 complétée par la loi du 28 juin 2006. La loi dite « Bataille » de 1991 avait organisé les recherches jusqu'en 2006 suivant trois axes de recherche :

1. transmutation et/ou séparation chimique,
2. stockage en couche géologique profonde définitif ou réversible,
3. entreposage de longue durée en surface ou subsurface.

Dans ce cadre, le stockage en couche géologique profonde est étudié par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) notamment dans le laboratoire souterrain de Meuse/Haute Marne (commune de Bure). Le laboratoire souterrain de l'ANDRA concerne une formation argileuse (argilites du Callovo-Oxfordien) localisée à environ 500 m de profondeur.

La loi du 28 juin 2006 a confirmé le rôle de l'ANDRA et lui a demandé d'étudier la mise en service d'un stockage industriel réversible en couche géologique en 2025. A l'heure actuelle, l'instruction de la demande d'autorisation pour la mise en place de l'installation est prévue pour 2015, avec un objectif d'une mise en service de cette dernière pour 2025.

Bien évidemment, l'objectif principal des études menées par l'ANDRA vise la protection de l'homme et de l'environnement à court et à long terme, en prenant en considération les droits des générations futures. Afin d'évaluer la sécurité des futures installations de stockage, et d'obtenir un avis objectif par un organisme indépendant de l'ANDRA, les autorités gouvernementales françaises de sécurité ont sollicité l'expertise technique de l'Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire (IRSN).

Pour réaliser sa mission d'expertise du site de Bure proposé par l'ANDRA, l'IRSN développe des programmes de recherche dans la station expérimentale de Tournemire (Aveyron) qui a été choisie en raison de sa simplicité géologique, et de son accessibilité directe au centre d'une formation argileuse indurée. Plusieurs pays s'intéressent aux formations argileuses pour les éventuels projets de stockage de déchets radioactifs **(Figure i)**.



Figure i. Localisation des laboratoires souterrains réalisés dans des formations argileuses (en bleu), à l'échelle mondiale : Allemagne, Angleterre, Belgique, Canada, Espagne, États-Unis, France, Hongrie, Suisse, et Japon.

Parmi les nombreuses thématiques scientifiques développées au sein de ces laboratoires, deux problématiques font aujourd'hui l'objet d'intenses activités de recherche fondamentale et appliquée (e.g, [Tsang et al., 2005](#) ; [Blümling et al., 2007](#)) :

- La caractérisation de la zone endommagée ou perturbée par les travaux de creusement,
- Le développement de méthodologies d'acquisition performantes et pratiques en galerie pour le suivi et la surveillance du stockage.

En effet, à l'état dit « sain » i.e., avant le creusement d'un ouvrage souterrain, les roches argileuses ou argilites présentent deux propriétés favorables pour le stockage de déchets : (a) une surface d'échange importante pour un volume faible de matériau permettant ainsi de fixer certains éléments à la surface des minéraux argileux ; et (b) une très faible perméabilité (typiquement de l'ordre de 10^{-21} m/s ou 10^{-14} m/s) (e.g., [Gautschi, 2001](#) ; [Boisson et al., 2001](#) ; [Escoffier et al., 2001](#) ; [Croisé et al., 2004](#) ; [Patriarche et al., 2004](#)).

Toutefois, lorsqu'un ouvrage souterrain est réalisé pour accéder à la formation, une zone appelée *zone endommagée* ou *perturbée* apparaît et résulte directement de la décharge mécanique instantanée ou différée des argilites autour des ouvrages. Dans cette zone, les propriétés physiques initiales des argilites sont modifiées pouvant ainsi remettre en cause les propriétés globales de rétention et d'étanchéité du site de stockage.

Dans le contexte d'une caractérisation exhaustive de cette zone endommagée et de son suivi dans le temps, les méthodes géophysiques apparaissent très prometteuses : elles sont rapides, par nature non destructives et autorisent une densité d'échantillonnage élevée.

Ces méthodes peuvent être complémentaires à d'autres méthodes d'investigation de la zone endommagée.

Dans le travail de recherche présenté dans ce mémoire, nous avons privilégié deux méthodes géoélectriques : la méthode de résistivité électrique (courant continu) et la méthode de Polarisation Provoquée (PP). Cette dernière connaît depuis les années 90 un regain d'intérêt à travers de nouvelles problématiques environnementales. Néanmoins, malgré sa popularité croissante en géophysique environnementale, nous constatons que les potentialités de la PP n'ont pas été complètement investiguées pour les géomatériaux argileux, surtout les roches argileuses profondes (argilite).

En effet, comme nous le verrons, la méthode PP peut apporter des informations précieuses en termes de caractérisation des hétérogénéités du milieu étudié. Ces hétérogénéités peuvent être de nature structurale (organisation(s) particulière(s) de phases minérales non argileuses, fissures/fractures), mais aussi peuvent résulter de différents états de saturation (milieu saturé-désaturé).

L'objectif de ce travail de thèse vise donc à approfondir nos connaissances sur les relations entre hétérogénéités (structurales et hydriques) et propriétés PP mesurées sur une large gamme de géomatériaux argileux : des matériaux les plus indurés (de type argilites *in situ*) aux argiles de surface beaucoup plus plastiques (au *laboratoire*).

Plus particulièrement en considérant l'argilite *in situ*, il s'agira d'examiner l'intérêt d'utiliser la méthode PP pour la caractérisation et le suivi de l'endommagement induit par l'excavation (perturbations mécaniques-fracturations), et l'aération des galeries souterraines (perturbations hydriques-milieu désaturé). La caractérisation de la zone endommagée et/ou perturbée par les travaux de creusement amène à plusieurs questions : quelle est la profondeur de la zone endommagée ? Quel est le type de perturbation (mécanique, hydrique) à l'origine de l'endommagement ? Est-il possible de comprendre sans ambiguïté l'origine physique de cet endommagement et/ou de cette perturbation ? Ou bien, en termes de résolution de la méthode géophysique utilisée : est-il possible de détecter les différentes structures naturelles ou artificielles présentes dans la zone endommagée (milieu par nature très complexe) ? Une fois toutes les structures bien identifiées, peut-on procéder à un suivi temporel de l'endommagement ? L'étude à partir de la surface d'argilite peut être relativement simple, mais est-ce qu'un parement en béton peut limiter la faisabilité des études géophysiques ?

De nombreuses questions peuvent encore être posées. Mais dans ce travail de recherche, nous nous concentrerons sur celles énoncées ci-dessus en tentant d'y apporter des éléments de réponses sur la base de résultats de campagnes de mesures réalisées *in situ* dans la station expérimentale de Tournemire de l'IRSN. Ce travail participe donc clairement aux efforts scientifiques menés par l'IRSN pour la caractérisation de la zone endommagée du laboratoire méthodologique de Tournemire.

En considérant plus particulièrement la caractérisation de l'argile en laboratoire : nous avons cherché à comprendre la phénoménologie de la réponse PP d'un milieu argileux saturé. En laboratoire, en conditions contrôlées, nous avons investigué les influences de différentes minéralogies de minéraux argileux, de différents teneurs en argile, et de différentes salinités sur le signal PP. En outre, l'effet d'une hétérogénéité (micro)structurale, à travers l'introduction dans les échantillons d'une teneur variable en sable, a été également étudié.

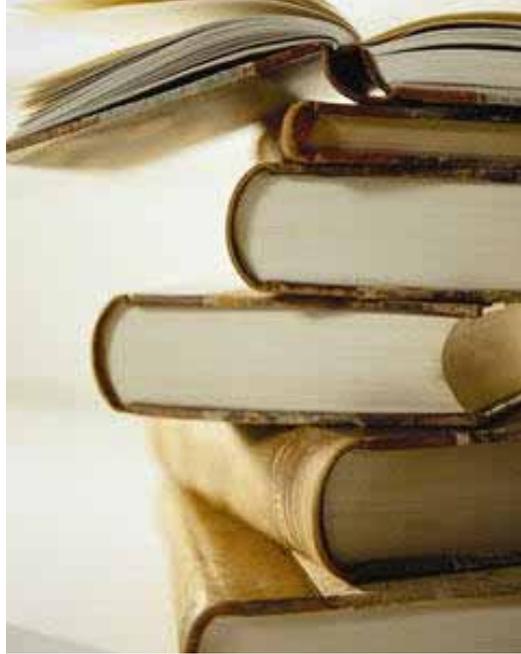
Ce mémoire de thèse est constitué de trois principaux chapitres.

Le 1^{er} chapitre introduit les problématiques par une étude bibliographique comprenant tout d'abord une présentation de la méthode PP (les aspects phénoménologiques, les différents processus de polarisation et les modèles utilisés) et la définition de la notion de zone endommagée et/ou perturbée en considérant les diverses origines possibles (mécanique, hydrique, chimique etc.). Ensuite, un état de l'art sur les apports des méthodes géophysiques de type électrique à la caractérisation de la zone endommagée est présenté. Nous discutons notamment de la contribution potentielle de la méthode PP à la caractérisation du milieu argileux endommagé.

Le 2^{ème} chapitre constitue la plus grande part du volet expérimental de ce travail de thèse. Il concerne l'étude de la caractérisation *in situ* du milieu argileux menée dans la station expérimentale de Tournemire. Après une brève présentation du contexte géologique et géotechnique du site, toutes les connaissances préliminaires acquises sur les zones endommagées autour des galeries du même site sont présentées. En fonction de ces informations, une discussion sur les stratégies d'acquisition et de la méthodologie appliquée *in situ* est menée. Nous avons décidé d'introduire d'emblée les études méthodologiques préliminaires effectuées *in situ* permettant de guider les futures acquisitions.

Les résultats des campagnes géoélectriques sont ensuite présentés pour celles effectuées à partir des radiers non-bétonnés, puis pour celles mis en œuvre sur des radiers bétonnés. Les dernières parties de ce chapitre sont dédiées respectivement à l'étude du suivi temporel (9 mois) de l'évolution de la zone endommagée, et à la réponse PP propre aux hétérogénéités artificielles ou naturelles présentes dans la matrice argileuse.

Le 3^{ème} chapitre concerne l'étude expérimentale menée en laboratoire à partir des mélanges artificiels argilo-sableux non-consolidés et saturés. Dans cette partie, on présente dans un premier temps le travail méthodologique mené à partir des différents appareils. Dans un deuxième temps, une fois la réponse du dispositif expérimental bien déterminée, le signal PP a été étudié dans des conditions contrôlées, en faisant varier la minéralogie, la salinité et la teneur en sable des échantillons synthétiques.



Chapitre 1. Etude bibliographique

Introduction

Nous présentons dans ce chapitre un état des connaissances sur la méthode de Polarisation Provoquée (PP) dans les domaines temporel et spectral et ses applications pour la caractérisation d'hétérogénéités hydriques et structurales dans un géomatériau argileux. La première partie de ce chapitre donne un aperçu sur les développements de la méthode PP depuis sa découverte en 1913 jusqu'à nos jours. Nous présentons les travaux de référence qui ont permis d'améliorer notre compréhension physique du phénomène PP.

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous présentons les techniques de mesure de la méthode PP dans les domaines temporel et spectral en insistant sur certains aspects importants à prendre en compte lors des prospections de terrain (*couplages inductifs etc.*). La troisième partie est consacrée à un état de l'art qui permettra au lecteur de juger la capacité de la méthode à déterminer différents paramètres physiques (e.g, *minéralisation, degré de saturation, fracturation, argilosité*). Cette section se poursuit ensuite par la classification des différentes origines possibles de polarisation observée dans les milieux naturels. Dans la quatrième partie de ce chapitre, nous présentons les modèles empiriques et théoriques décrivant les propriétés électromagnétiques aux basses fréquences des géomatériaux.

La cinquième partie s'oriente progressivement vers la problématique de la thèse en présentant le concept de zone endommagée (en anglais *EDZ : Excavation Damaged Zone*). Du point de vue géomécanique, cette zone fracturée est générée par la modification de la distribution spatiale des états de contraintes initiales induite par le creusement d'une galerie. Néanmoins, comme nous le verrons, les fractures observées dans l'EDZ résultent non seulement de phénomènes d'origine mécanique mais aussi de perturbations hydriques, chimiques voire thermiques induites par l'excavation du sous-sol. Cette partie se termine par la présentation d'un état de l'art synthétisant les apports des méthodes électriques à la caractérisation de l'EDZ. Nous concluons ce chapitre par la présentation des différents axes de recherche investigués au cours de notre travail de thèse.

1.1. Bref historique de la méthode de Polarisation Provoquée¹ (PP)

L'histoire de la méthode Polarisation Provoquée (PP) débute il y a presque 100 ans ! Sa découverte et les principaux développements théoriques de la méthode en exploration géophysique semblent avoir débuté en 1913 avec les travaux de Conrad Schlumberger ([Schlumberger, 1920](#)). Alors qu'il mène une prospection sur un gisement métallifère hautement conducteur, C. Schlumberger constate qu'après la coupure du courant électrique, de petites mais mesurables tensions électriques persistent au cours du temps. Schlumberger attribue cette propriété à un phénomène de polarisation du sous-sol. Vers 1929, en contrat avec les Russes, il applique pour la première fois sa méthode à la recherche pétrolière en puits. Mais ce n'est que dans les années 50, après quelques applications réussies à la détection de mines enterrées durant la seconde guerre mondiale que la méthode se généralise en prospection minière.

Jusque dans les années 50, toutes les mesures PP concernent le domaine temporel. En 1950, la découverte de Seigel montrant une diminution de la résistivité apparente en fonction de l'augmentation de la fréquence et plus généralement une dépendance des paramètres PP vis-à-vis de la fréquence appliquée, marque les débuts de la PP fréquentielle.

Trois ans plus tard, des études sur modèles réduits permettent de mieux comprendre l'origine physique de la PP observée sur les sites miniers ([Bleil, 1953](#)). Ces travaux prouvent qu'une réponse PP élevée est liée à la présence de minerais métalliques disséminés.

[Vaquier et al. \(1957\)](#) sont probablement les premiers à appliquer la méthode PP pour la recherche d'eaux souterraines. Avec [Madden & Marshall \(1958\)](#), ils identifient une deuxième origine de la polarisation détectable par la méthode : la polarisation dite de « membrane » observée en présence d'argile. [Madden & Marshall \(1959\)](#) publient les premiers modèles quantitatifs sur les deux origines possibles du signal PP : la polarisation dite « d'électrode » (liée à la présence de minerais métalliques disséminés) et la « polarisation de membrane » (liée à la présence d'argile). [Wait \(1959\)](#) généralise ces travaux dans le domaine fréquentiel.

Dans les années 1960, les recherches sur la méthode de Polarisation Provoquée s'orientent plutôt vers la PP Spectrale (PPS ou résistivité complexe) afin de discriminer les

¹ L'historique présenté dans cette section est largement inspiré de [Nelson \(1997\)](#) et [Seigel et al. \(2007\)](#).

différents types de minéralisation plus particulièrement les sulfures et les graphites. [Madden \(1961\)](#) soutient une thèse au Massachusetts Institute of Technology portant sur la polarisation d'électrode et son influence sur les propriétés électriques des roches minéralisées. Par la suite [Madden & Cantwell \(1967\)](#) introduisent la notion d'impédance de Warburg afin de décrire quantitativement le phénomène PP par des circuits électriques équivalents.

Un des développements déterminant pour la compréhension physique et mathématique de l'effet de PP est formulé par [Sheinman \(1969\)](#). En 1975, [Zonge & Wynn](#) proposent une synthèse qui restera longtemps une référence pour les développements et les applications de la méthode PPS. Un an plus tard, [Bertin & Loeb \(1976\)](#) et [Sumner \(1976\)](#) publient les premiers ouvrages de référence sur la méthode en présentant les derniers résultats acquis tant expérimentalement que théoriquement. En 1977, Pelton soutient sa thèse à l'Université d'Utah. C'est notamment lui qui aborde pour la première fois la question du couplage électromagnétique dans le domaine fréquentiel ([Pelton, 1977](#) ; [Pelton et al., 1978](#)). Ce couplage électromagnétique entre les différents composants du dispositif d'acquisition reste encore un des facteurs limitant majeurs pour des mesures précises de PPS sur le terrain. A la même époque, [Wong \(1979\)](#) propose un modèle électrochimique pour expliquer la polarisation des sulfures disséminés.

Dans les années 1980, la méthode PPS voit son domaine d'application s'étendre à (1) la prospection pétrolière pour la détection des hydrocarbures et à (2) des applications environnementales dans les formations sédimentaires argilo-sableuses. Ces études ont permis de développer des modèles de polarisation spécifiques ([Bussian 1983](#) ; [Vinegar & Waxman, 1984](#); [De Lima & Sharma, 1992](#)). Plus particulièrement, l'influence de l'interaction entre molécules organiques et argiles sur le signal PP est abordée par [Olhoeft \(1985\)](#) à la Colorado School of Mines. Dans un papier très synthétique, [Olhoeft \(1985\)](#) jette les bases phénoménologiques de la PPS et propose une méthodologie générale pour l'interprétation des spectres basses fréquences.

Durant les années 1990, les développements instrumentaux autour de la mesure PPS permettent de mesurer de faibles variations de phase sur une importante gamme de fréquences (typiquement de 1 mHz à 1 kHz) de nouvelles applications environnementales comme l'étude des sites contaminés apparaissent ([Vanhala et al., 1992](#)). A ce stade, un article de [Ward et al. \(1995\)](#) fait un état de l'art sur la méthode où il remet en perspective les recherches de diverses thématiques et les axes de recherche. Les auteurs attirent notamment l'attention sur la nécessité de mener des travaux en laboratoire, en conditions contrôlées, sur des échantillons bien caractérisés du point de vue chimique et pétrophysique afin d'étudier les paramètres suivants : la taille des pores/grains, la surface spécifique, l'état physico-chimique

de la surface des grains, la saturation, l'anisotropie et la perméabilité. Quant aux mesures *in-situ*, l'article souligne l'importance du couplage des paramètres géologiques, géophysiques et hydrologiques et l'intérêt du suivi temporel de ces derniers. Ils mettent en évidence que le modèle empirique de Cole-Cole (1941) n'est pas adapté pour expliquer le comportement électrique de toutes les roches. Ils identifient le besoin de modèles physico-chimiques pour associer les propriétés électriques complexes des roches aux propriétés surfaciques et microstructurales.

Vanhala & Soininen (1995) mesurent au laboratoire la réponse spectrale de différents sols d'origine glaciaire. Cet article montre l'influence importante de la polarisation des électrodes de mesure à l'interface métal-électrolyte. Pour limiter cet effet parasite, les auteurs recommandent l'utilisation d'électrodes de platine lorsqu'une très large gamme de fréquences (de 0,016 Hz à 1 kHz) est mise en jeu. A la suite de ces travaux, Vanhala (1997a,b) présente une application environnementale de la PPS en laboratoire et *in situ* : il démontre que la PPS est capable de discriminer entre sols contaminés par des hydrocarbures et sols non contaminés.

Dans les années 2000, avec l'émergence de l'hydrogéophysique, les efforts des différentes équipes impliquées dans la méthode portent sur les relations entre paramètres PP et propriétés de transport, principalement la conductivité hydraulique (Börner *et al.*, 1996 ; Lima & Niwas, 2000; Slater & Lesmes, 2002 ; Binley & Kemna, 2005 ; Binley *et al.*, 2005; Börner, 2006 ; Tong *et al.*, 2006a,b ; Vereecken *et al.*, 2006 ; Hördt *et al.*, 2007 ; Slater, 2007). Plus précisément, l'objectif principal est d'associer les paramètres texturaux (ou microstructuraux) comme la distribution de la taille des grains ou des pores intimement liés aux propriétés de transport du milieu poreux aux paramètres PPT (e.g., Titov *et al.*, 2002 ; 2004) ou PPS (e.g., Leroy *et al.*, 2008 ; Revil & Florsch, 2010).

En résumé, la méthode PP qui a débuté par des applications dans le domaine minier où son emploi a pu représenter la moitié des investissements en mesure géophysique au sol voit aujourd'hui son champ d'application s'étendre pour répondre aux problématiques environnementales actuelles (i.e., détection d'hydrocarbures et de contaminants inorganiques dans le sous-sol, estimation de la perméabilité). Les développements récents de la méthode notamment dans le domaine spectral ont élargi l'apport de la méthode en enrichissant notre compréhension de l'organisation microstructurale des milieux naturels.

Une excellente base de donnée (régulièrement mise à jour) des diverses applications de la PP / PPS de 2004 à 2010 est disponible par lien suivant : <http://www.radic-research.homepage.t-online.de/SIP%20Literature.htm>.

1.2. Principes de la mesure PP

1.2.1. Mesure dans le domaine temporel

Rappelons-nous de l'expérience de C. Schlumberger de 1913 : si un courant électrique injecté dans le sous-sol est interrompu brutalement, la différence de potentiel (ddp) électrique mesurée à travers deux électrodes de potentiel ne tombe pas à zéro instantanément. Nous pouvons observer généralement une « relaxation » de cette ddp de plusieurs secondes (voir plusieurs minutes ou heures dans certains cas) depuis une valeur initiale qui correspond à une petite fraction de la ddp existante lors de l'injection du courant (**Figure I.1C**). Ce phénomène de « relaxation » est appelé la *Polarisation Provoquée* (PP) ou *Induced Polarization* (IP) en anglais (Parasnis, 1986).

La méthode PP met donc en œuvre deux électrodes pour la mesure de la ddp et deux autres électrodes pour l'injection du courant (**Figure I.2**) : elle utilise donc le même nombre d'électrodes et les mêmes grandeurs physiques (ddp et courant électrique) que la résistivité électrique. Ce constat explique notamment qu'en pratique, les résistivimètres utilisés pour la mesure de la résistivité électrique permettent également la prospection PP dans le domaine temporel. Rappelons que la mesure de la résistivité électrique consiste à (1) injecter un courant électrique I à partir de deux électrodes d'injection dans le milieu et à (2) mesurer une différence de potentiel (ΔV) (en phase avec le courant I) à l'aide d'une autre paire d'électrodes de potentiel (**Figure I.2**).

La **Figure I.1** présente de manière synthétique les grandeurs physiques impliquées dans la mesure PP (dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel) ainsi que dans la mesure de la résistivité électrique. Cette figure permet ainsi de mettre en évidence les liens entre les différentes méthodes et d'expliquer pourquoi certains auteurs considèrent la méthode PP comme une *extension naturelle* de la méthode de résistivité électrique (e.g, Binley & Kemna, 2005).

Dans la pratique, nous appliquons un courant électrique en forme de créneaux d'une période T allant de 0,125 à 20 s séparés par des interruptions d'injection (**Figure I.1A**) (Parasnis, 1986). Historiquement, les auteurs définissent la différence de potentiel V_s obtenue après la coupure du courant qui est mesurée à un instant t (allant de 0,1 à 1 s voir plus suivant l'étude). Ce temps t doit être suffisamment long afin d'éviter les phénomènes d'induction hautes fréquences mais assez court pour ne pas passer sous le seuil de sensibilité de l'appareil de mesure.

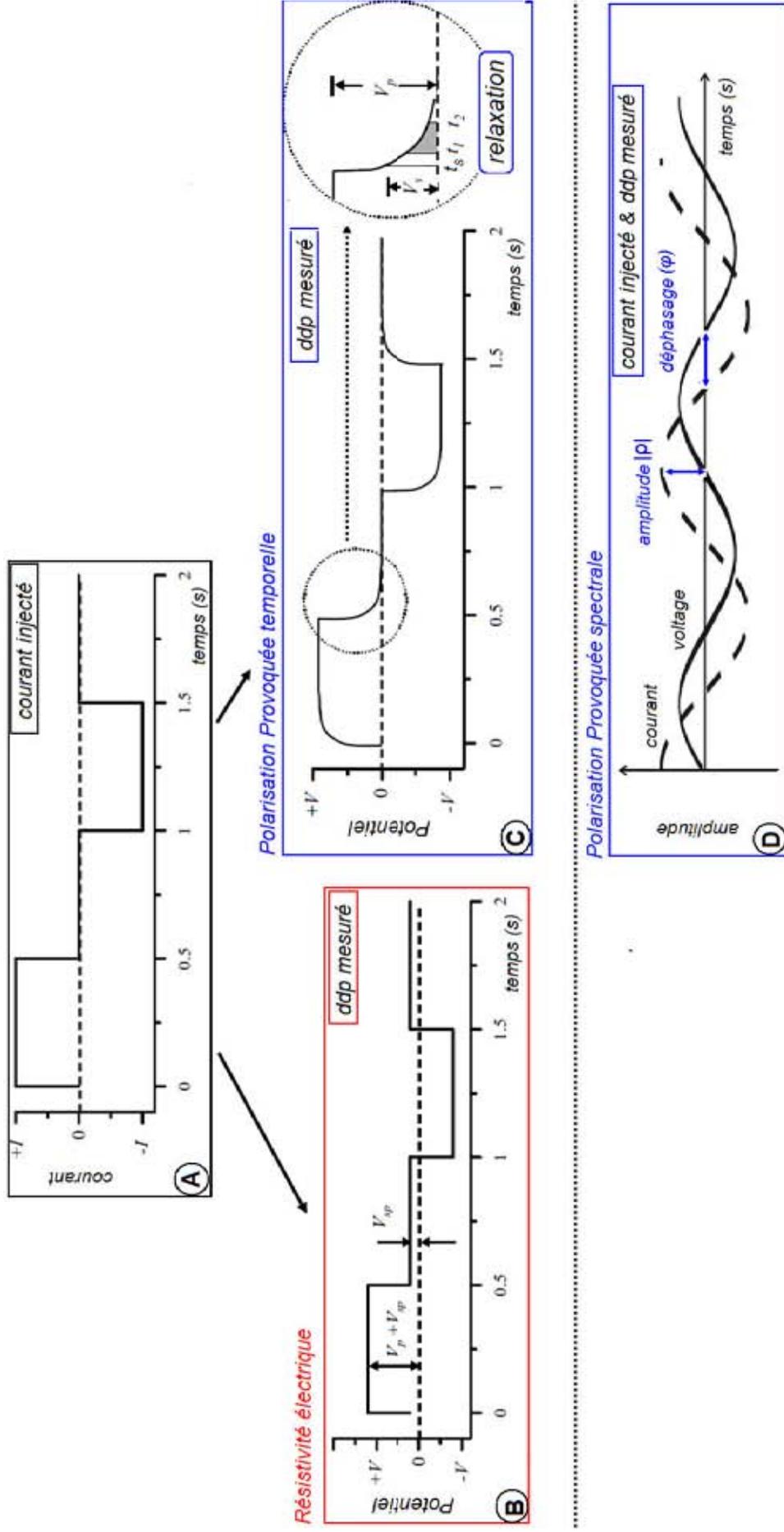


Figure 1. 1 (A), (B) Courant injecté et différence de potentiel électrique (ddp) mesurée dans la méthode de la résistivité électrique. Le paramètre V_p est la ddp dite « primaire » mesurée lors de l'injection, le paramètre V_{sp} est le potentiel spontané observé ; (C) Différence de potentiel électrique mesurée dans la méthode de Polarisation Provoquée dans le domaine temporel, le paramètre V_s signifie la ddp dite « secondaire » mesurée après la coupure de l'injection (modifié de Binley & Kemna, 2005) ; (D) Courant injecté et ddp mesurée dans la méthode de Polarisation Provoquée Spectrale (modifié de Kruschwitz & Neiderleithinger, 2009).

La mesure de $V_s(t)$ (exprimée en mV) permet de calculer la *polarisabilité apparente* (Parasnis, 1986) ou une *chargeabilité apparente* (Seigel, 1959) traduisant de manière empirique l'amplitude du phénomène PP :

$$m_a = \frac{V_s}{V_p} \quad \text{équation (I.1)}$$

où le paramètre V_p (exprimée en V) est la ddp dite « primaire » mesurée lors de l'injection du courant (**Figure I.1C**). Le paramètre m_a est généralement exprimée en mV/V (ou en pourcentage de cette valeur, on parle alors d' « IP effect », Telford *et al.*, 1990). Cette définition de la notion de chargeabilité souffre toutefois d'un inconvénient majeur : elle dépend de l'instant t_s choisi pour la mesure de V_s . C'est pourquoi pour quantifier l'amplitude du phénomène PP, les appareils de mesure actuel mesurent souvent une autre grandeur, appelée la chargeabilité apparente intégrée, définie par :

$$M_{t_1, a}^{t_2} = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V_s(t) dt \quad \text{équation (I.2)}$$

En pratique, cette grandeur s'exprime alors en ms (millisecondes). La notion de chargeabilité s'appuie alors ici sur le calcul de l'aire située sous la courbe de décroissance $V_s(t)$ entre deux instants t_1 et t_2 après la coupure du courant (**Figure I.1C**). D'autres auteurs utilisent encore la grandeur sans dimension (e.g, Schön, 1996) suivante :

$$M_a = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V_s(t) dt \quad \text{équation (I.3)}$$

Ces définitions appellent les deux commentaires suivants :

- Les grandeurs définies précédemment sont bien des propriétés *apparentes* puisque la mesure s'opère sur un sol, un milieu *hétérogène* par nature. Les valeurs de ces propriétés apparentes doivent alors être *inversées* afin d'obtenir un modèle d'organisation spatiale de chargeabilités qualifiées alors «d'interprétées».
- Ces définitions impliquent la mesure de la ddp primaire V_p qui va servir au calcul de la résistivité. La mesure de PP implique donc à peu de frais une mesure concomitante de la résistivité électrique apparente. Cette dernière, notée ρ_a , est alors calculée de la manière suivante :

$$\rho_a = k \frac{V_p}{I} \quad \text{équation (I.4)}$$

où V_p est la ddp primaire ; I le courant injecté et k le facteur géométrique qui dépend de l'arrangement des quatre électrodes (quadripôle) impliquées dans le mesure. Dans le cas d'un milieu semi-infini, le coefficient géométrique s'écrit :

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{|AM|} - \frac{1}{|BM|} - \frac{1}{|AN|} + \frac{1}{|BN|} \right)} \quad \text{équation (I.5)}$$

Les distances $|AM|$, $|BM|$, $|AN|$ et $|BN|$ associées au quadripôle ABMN sont définies dans sur la **Figure I.2**.

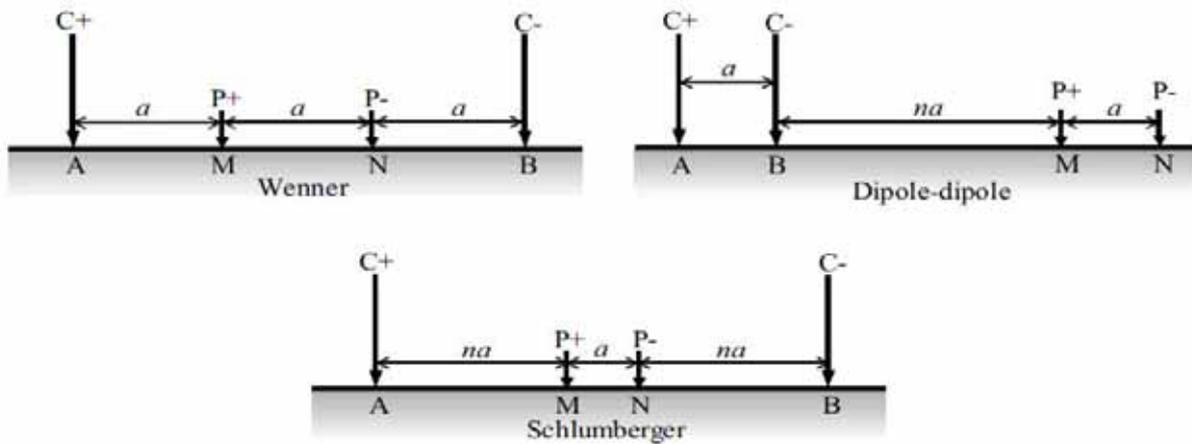


Figure I.2. Représentation schématique du quadripôle électrique utilisée pour la mesure PP et la mesure de la résistivité électrique. Les électrodes d'injection sont en A et B (C_1 et C_2 dans la littérature anglaise). Les électrodes de mesure de la différence de potentiel électrique sont en M et N (P_1 et P_2 dans la littérature anglaise).

La chargeabilité (définie au sens de l'équation I.2) d'une roche possédant une quantité significative de sulfures peut atteindre 2000 à 3000 ms pour un créneau d'environ 1 minute (Telford *et al.*, 1990). Pour des matériaux sédimentaires sans minéralisation particulière, la chargeabilité ne dépasse généralement pas la dizaine de millisecondes (Telford *et al.*, 1990).

1.2.2. Mesure dans le domaine fréquentiel

La polarisation d'un milieu peut être également mise en évidence en injectant un courant alternatif de fréquence variable comprise entre quelques mHz à kHz. La méthode consiste alors à mesurer un spectre de résistivité apparente : nous parlons de *Polarisation Provoquée Spectrale* (PPS) (ou en anglais *Spectral Induced Polarization* ou de *Complex Resistivity Method*). Dans la pratique, la méthode consiste à injecter un courant alternatif de type sinusoïdal à une fréquence donnée. L'injection du courant provoque alors dans le matériau, l'apparition d'une différence de potentiel également sinusoïdale mais déphasée par rapport au courant injecté (e.g, Wait, 1959 ; Madden & Cantwell, 1967) (**Figure I.1D**). Ce déphasage n'est que la traduction dans le domaine fréquentiel du phénomène de « relaxation » mis en évidence dans le domaine temporel. Sans entrer dans le détail des mécanismes qui seront présentés plus loin, ce déphasage est associé à tous les phénomènes de polarisation et de conduction générés microscopiquement par le mouvement des charges (ions, électrons) qui nécessite un certain laps de temps pour répondre au champ électrique appliqué (Kemna, 2000). Ce déphasage et le module de la ddp permettent ainsi de calculer une grandeur complexe appelée *résistivité complexe* et notée ρ^* (ou son inverse la conductivité complexe notée σ^*). Comme toutes grandeurs complexes, la résistivité complexe peut aussi se représenter sous forme d'une partie réelle et d'une partie imaginaire.

Toutes ces grandeurs, la phase φ , le module $|\rho|$, la résistivité complexe ρ^* et la conductivité complexe σ^* sont liées mathématiquement.

$$\rho^*(\omega) = \rho'(\omega) + i\rho''(\omega) = |\rho|(\cos(\varphi) + i \sin(\varphi)) \quad \text{équation (I.6)}$$

$$\varphi(\omega) = \tan^{-1}\left(\frac{\rho''(\omega)}{\rho'(\omega)}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\sigma''(\omega)}{\sigma'(\omega)}\right) \quad \text{équation (I.7)}$$

Avec $i^2 = -1$; $\rho'(\omega)$ et $\rho''(\omega)$ respectivement la partie réelle et imaginaire de la résistivité complexe $\rho^*(\omega)$ (en $\Omega.m$) ; $\sigma'(\omega)$ et $\sigma''(\omega)$ respectivement la partie réelle et imaginaire de la conductivité complexe σ^* ($\sigma^* = 1/\rho^*$ en S/m). Nous remarquons que si le déphasage mesuré est faible (ce qui est souvent le cas en PP) typiquement inférieur à 100 mrad (Ulrich & Slater, 2004), on peut simplifier l'équation (I.7) :

$$\varphi(\omega) \cong \left(\frac{\sigma''(\omega)}{\sigma'(\omega)}\right) \quad \text{équation (I.8)}$$

Cette équation appelle deux commentaires :

- Si aucun processus de polarisation n'est mesurée, $\varphi=0$ et donc $\sigma''=0$ et $\rho''=0$.
- La phase intègre donc à la fois les processus de polarisation (via σ'' ou ρ'') mais aussi aux processus de conduction par électromigration (via σ' ou ρ') qui obéissent notamment aux relations d'Archie dans les formations sans argile.

Nous soulignons également qu'il n'existe pas de relations générales simples entre les grandeurs complexes introduites dans les **équations I.6** et **I.7** et les paramètres PP mesurés dans le domaine temporel (**voir section 1.2.1**). La mesure de résistivité complexe peut être répétée à plusieurs fréquences pour une gamme de fréquences typiquement de 1 mHz à 12 kHz (cas du dispositif SIP FUCHS II de la société Radic-Research). Généralement, la mesure commence à partir de la fréquence la plus élevée et continue en fonction d'un pas d'échantillonnage spectral vers les basses fréquences. On obtient ainsi finalement un spectre du module et un spectre de la phase (**Figure I.3**).

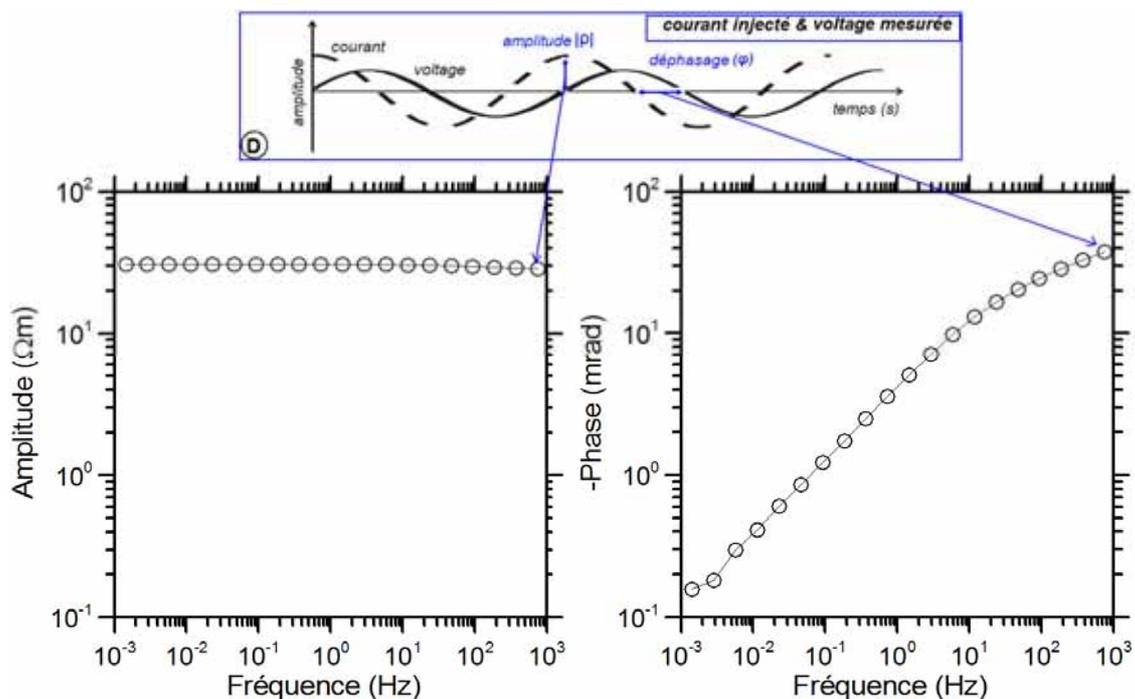


Figure I.3. Représentation des jeux de données obtenus avec la méthode de Polarisation Provoquée Spectrale (Kruschwitz & Neiderleithinger, 2009 ; dessin modifié). Sur la figure un symbole correspond à des valeurs calculées à une fréquence donnée.

A partir de ces spectres, nous calculons souvent le « frequency effect » apparent, $(FE_{F,f})_a$ (grandeur sans dimension) entre deux fréquences, F et f (avec ici $f < F$) (e.g., Parasnis, 1986) :

$$(FE_{F,f})_a = \frac{|\rho_a(f)| - |\rho_a(F)|}{|\rho_a(f)|} \quad \text{équation (I.9)}$$

ou encore le pourcentage du « frequency effect » apparent ($PFE_{F,f})_a$ lorsque le résultat du calcul est ramené en %. En prospection minière, nous avons souvent utilisé le « metal factor » apparent, ($MF_{F,f})$ défini par :

$$(MF_{F,f})_a = \frac{|\rho_a(f)| - |\rho_a(F)|}{|\rho_a(f)||\rho_a(F)|} \quad \text{équation (I.10)}$$

La grandeur ($MF_{F,f})$ s'exprime en $S.m^{-1}$ (dimension d'une conductivité électrique) puisque l'équation (I.10) peut se réécrire de la manière suivante :

$$(MF_{F,f})_a = |\sigma_a(F)| - |\sigma_a(f)| \quad \text{équation (I.11)}$$

La méthode PPS est souvent considérée comme une méthode électromagnétique (EM) dite basses fréquences en considérant la gamme de fréquences d'étude des méthodes géophysiques dite EM (Figure I.4).

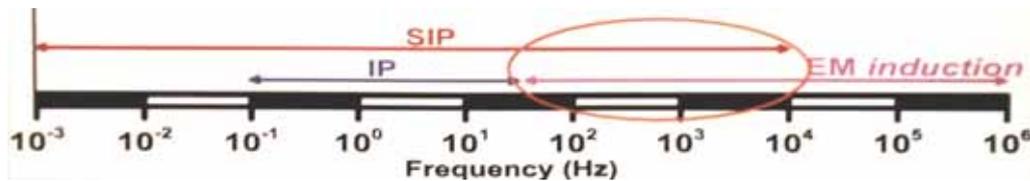


Figure I.4. Gammes de fréquences des méthodes PP dans le domaine temporel (IP) et dans le domaine spectral (SIP). Le cercle rouge indique la zone de superposition entre la gamme de fréquences de la méthode SIP et celle des méthodes EM traditionnelles (Ghorbani et al., 2007b).

Comme le montre la Figure I.4, la partie haute des spectres de la PPS chevauche la partie basse des spectres des méthodes EM traditionnelles (ou en anglais « induction methods ») de la géophysique appliquée. Ce qui signifie que la méthode PPS prend en compte le phénomène d'induction électromagnétique (couplage EM). En régime quasi-permanent, la mesure de l'impédance $Z(\omega)$ fait intervenir également la notion du couplage EM. Sunde (1968) suggère que cette impédance $Z(\omega)$ peut être calculée par une intégrale se résumant à un calcul de l'impédance mutuelle entre les câbles d'injection et les câbles de mesures de potentiel (équation I.12, Figure I.5) :

$$Z(\omega) = \int_A^B \int_M^N \left[P(r) \cos \xi + \frac{\partial Q(r)}{\partial S \partial s} \right] ds dS \quad \text{équation (I.12)}$$

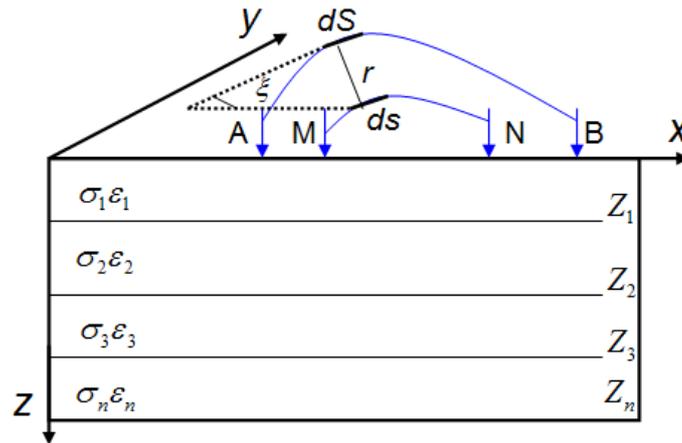


Figure I.5. Représentation d'un milieu tabulaire à multicouches de propriétés électromagnétiques différentes et la mise en place du dispositif (Ghorbani et al., 2007b).

où Q et P sont les fonctions de la réponse EM intrinsèque du sous-sol et celle de la réponse EM liée au couplage entre les câbles d'injections et ceux des mesures. Dans un milieu tabulaire, ces fonctions sont dépendantes des propriétés électromagnétiques de chaque couche.

Cet effet EM dépend de la fréquence de mesure, de la conductivité du milieu et de l'écartement inter-électrode. Plus la fréquence de mesure, la conductivité du milieu et l'écartement inter-électrode sont élevés, plus le couplage EM sera important (Hohmann, 1973 ; Wynn & Zonge, 1975 ; Pelton et al., 1978 ; Coggon, 1984a,b ; Song, 1984 ; Grant, 1990 ; Tripp et al., 1990). Ces derniers auteurs ont également étudié des méthodes pour discriminer la réponse PP du terrain et un effet du couplage EM associé au dispositif d'acquisition.

En pratique, il est conseillé de privilégier les fréquences les plus basses, typiquement inférieures au kHz voir moins selon Telford et al. (1990) (surtout *in situ*) et de bien séparer les câbles d'injection des câbles utilisés pour la mesure de potentiel. Ainsi, les câbles en fibres optiques tendent à minimiser l'effet EM.

Un autre aspect important à tenir en compte, souvent évoqué en PPS, est la polarisation des électrodes. Cette polarisation d'électrode résulte de processus électrochimiques survenant lorsqu'un courant électrique circule depuis un électrolyte vers un métal (d'une électrode) ou vice versa. La polarisation d'électrode est considérée comme un facteur (bruit) qui perturbe la réponse du milieu. Cette perturbation est beaucoup plus importante si le milieu génère de faibles polarisations : la réponse des électrodes sera alors dominante. Afin d'éviter la polarisation des électrodes du dispositif, Schwan (1968) propose les recommandations suivantes :

1. Injecter des densités de courant pas trop élevées (Pelton *et al.* (1983) recommandent la valeur de 10^{-2} A/m^2),
2. Choisir des dimensions d'échantillon suffisamment grandes,
3. Utiliser quatre électrodes (deux pour l'injection deux pour la mesure de potentiels),
4. Positionner les électrodes d'injection suffisamment loin des électrodes de mesure de potentiel,
5. Procéder à des mesures spectrales associées aux seules électrodes (sans échantillon) afin d'isoler la réponse électrique de celles-ci. A partir de ces mesures, une correction théorique de cet effet est appliquée aux mesures avec l'échantillon (e.g. Sheider, 1975).

1.3. Rappel sur les équations de Maxwell

Les processus de polarisation relèvent du comportement électromagnétique en basses fréquences du géomatériau étudié : ils obéissent donc aux équations de Maxwell (1891) et à certaines relations constitutives qui sont données à la fois dans le **Tableau I.1**. Les équations de Maxwell écrites ici dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel appellent les commentaires suivants :

- L'**équation I.22** montre que le champ magnétique obtenu à la suite d'un champ électrique alternatif est la résultante de deux phénomènes électriques : la conduction électrique ohmique (*encadré en vert*) et la conduction de déplacement (*encadré en orange*). La conduction ohmique est liée à l'électromigration des charges libres alors que la conduction de déplacement est liée à l'électromigration des charges liées. Ce courant de déplacement existe aussi dans le vide en l'absence de matière et résulte des forces de Coulomb entre des charges électriques séparées par ce vide. La conduction électrique ohmique représente la partie réelle de cette équation mathématique alors que la conduction de déplacement la partie imaginaire. En termes physique, pour une équation mathématique complexe, la partie réelle signifie les phénomènes induits en phase avec la cause de ce phénomène. Alors que la partie imaginaire signifie les phénomènes induits en quadrature c'est-à-dire avec un retard. Tous les phénomènes induits en phase avec le champ appliqué sont associés à la conduction et ceux qui sont déphasés donc en retard sont associés à la polarisation du milieu.
- La décomposition des grandeurs complexes ρ^* (la résistivité complexe) et σ^* (la conductivité complexe) en partie réelle et en partie imaginaire (**équation I.24**) permet de constater que la partie réelle σ' représente l'électromigration des charges libres (courant de conduction) et σ'' représente la dispersion électrique (*polarisation*). Quant

à la partie réelle de la permittivité ε' , celle-ci représente la polarisation de charges liées (associé au courant de déplacement) et la partie imaginaire de la permittivité ε'' représente le retard lié à la polarisation.

- L'**équation (I.26)** indique que du point de vue pratique, nous ne pouvons accéder par la mesure qu'à des grandeurs effectives (et pas aux composantes réelles et imaginaires) (**voir aussi équations I.6 à I.11**).

Tableau I.1. Introduction des équations de Maxwell dans les domaines temporel et fréquentiel.

Domaine temporel (t)	Domaine fréquentiel (ω)
<i>Relations constitutives (linéaire, homogène, isotrope)</i>	
$J(x, t) = \sigma^*(t) * E(x, t)$	$J(x, \omega) = \sigma^*(\omega) E(x, \omega)$ équation (I.14)
$D(x, t) = \varepsilon^*(t) * E(x, t)$	$D(x, \omega) = \varepsilon^*(\omega) E(x, \omega)$ équation (I.16)
$B(x, t) = \mu^*(t) * H(x, t)$	$B(x, \omega) = \mu^*(\omega) H(x, \omega)$ équation (I.18)
<i>Equations de Maxwell</i>	
<i>Loi de Maxwell-Faraday :</i>	
$\nabla \times E(x, t) = -\frac{\partial B(x, t)}{\partial t} = -\frac{\partial [\mu^*(t) * H(t)]}{\partial t}$	$\nabla \times E(x, \omega) = i\omega \mu^*(\omega) H(x, \omega)$ équation (I.20)
<i>Loi de Maxwell-Ampère :</i>	
$\nabla \times H(x, t) = J(x, t) + \frac{\partial D(x, t)}{\partial t} = \sigma^*(t) * E(x, t) + \frac{\partial [\varepsilon^*(t) * E(x, t)]}{\partial t}$	$\nabla \times H(x, \omega) = \sigma^*(\omega) E(x, \omega) - i\omega \varepsilon^*(\omega) E(x, \omega)$ équation (I.22) Ou $\nabla \times H(x, \omega) = J_T = J_c + J_d$ équation (I.23)
	$\nabla \times H(x, \omega) = [\sigma'_c(\omega) + i\sigma''_c(\omega)] E(x, \omega) - i\omega [\varepsilon'_d(\omega) + \varepsilon''_d(\omega)] E(x, \omega)$ équation (I.24)
	$\nabla \times H(x, \omega) = \left[\sigma'_c(\omega) + i\omega \varepsilon''_d(\omega) \right] + i\omega \left[\frac{\sigma''_c(\omega)}{\omega} - \varepsilon'_d(\omega) \right] E(x, \omega)$ équation (I.25)
<i>Paramètres effectifs (ce qu'on mesure)</i>	
	$\nabla \times H(x, \omega) = [\sigma_{eff}(\omega) + i\omega(-\varepsilon_{eff}(\omega))] E(x, \omega)$ équation (I.26)

où D : le déplacement diélectrique (C/m^2), B : l'induction magnétique (Wb/m^2), E : le champ électrique (V/m), H : le champ magnétique (A/m), J_T : la densité de courant électrique totale (A/m^2), J_C : la densité de courant de conduction (A/m^2), J_d : la densité de courant de déplacement (A/m^2), σ^* : la conductivité électrique complexe (S/m), ε^* : la permittivité diélectrique (F/m), μ^* : la perméabilité magnétique (H/m). * signifie la convolution et/ou que le paramètre est complexe.

L'approche en « traitement du signal » permet d'établir les relations entre les paramètres mesurés par PPS et ceux obtenus par la PPT (dans le domaine temporel). Suivant cette approche, le géomatériau (roche ou sol) en un point donné est considéré comme un système linéaire invariant avec une entrée (la densité du courant associée à la circulation d'un courant) et une sortie (le champ électrique résultant) (e.g, Fuller & Ward, 1970 ; Shuey & Johnson, 1973). La fonction de transfert de ce système est une représentation mathématique de la relation entre l'entrée et la sortie du système. Plus précisément, dans le domaine fréquentiel, et suivant la loi d'Ohm locale, si l'entrée est le champ électrique à une pulsation ω donnée, $E(\omega)$, et la sortie est la densité de courant $J(\omega)$, alors la fonction de transfert reliant l'entrée à la sortie est appelée la résistivité électrique complexe $\rho^*(\omega)$ (ou la conductivité complexe pour le cas inverse $\sigma^*(\omega)$).

Cette approche permet ainsi (a) de formuler les différentes grandeurs électriques impliquées dans le domaine fréquentiel et dans le domaine temporel et donc (b) d'établir les relations de passage d'un domaine à un autre. Le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel se fait alors par la transformation de Fourier. Pour le cas inverse, la transformation de Fourier inverse peut être utilisée (Figure I.6). Dans le domaine temporel, la relation qui relie le champ électrique, la résistivité électrique et la densité de courant s'exprime par une convolution.

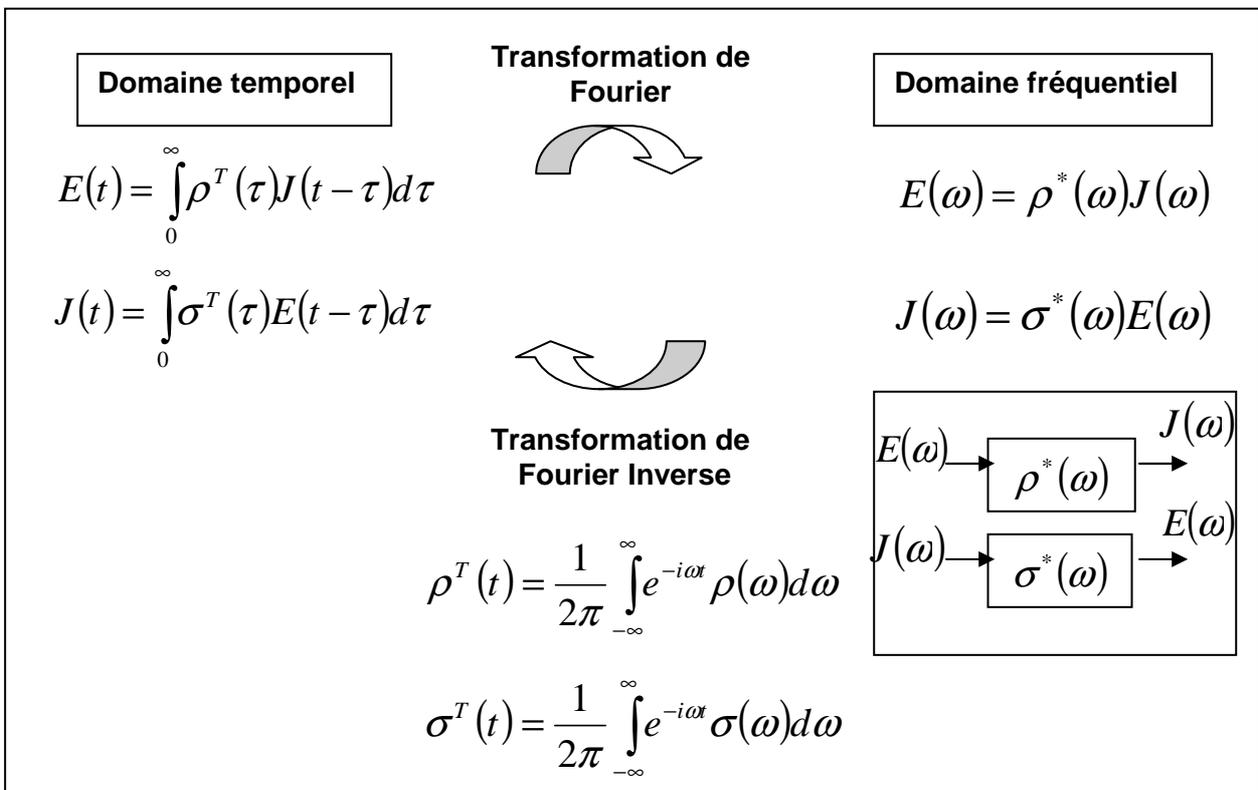


Figure I.6. La méthode PPS selon l'approche « traitement du signal ».

où $\rho^T(t)$ et $\sigma^T(t)$ sont respectivement les fonctions des réponses impulsionnelles de la résistivité et de la conductivité.

1.4. Aspects phénoménologiques de l'effet PP

1.4.1. Les acquis expérimentaux

L'ensemble de la littérature (Parasnis, 1986 ; Telford *et al.*, 1990 ; Schön, 1996 ; Binley & Kemna, 2005 ; Börner, 2006) s'accorde pour souligner l'influence significative des paramètres suivants sur l'effet PP :

- La nature et la teneur volumique en minéraux métalliques,
- La taille et la forme des grains,
- La nature minéralogique, la distribution dans l'espace poral et la fraction volumique de la phase argileuse,
- La composition chimique de la solution porale,
- La taille des pores,
- Le degré de saturation en eau,
- Les propriétés pétrophysiques (porosité, surface spécifique et perméabilité),
- La fracturation/fissuration,
- La température.

Il est important de remarquer que ces paramètres vont influencer autant l'amplitude du phénomène de polarisation que la forme des signaux PP mesurés (courbe de relaxation et spectres). Bien évidemment, ils ne sont pas indépendants des uns des autres : c'est la compréhension des mécanismes de polarisation, présentés plus loin, qui va permettre de les relier. Pour chacun des items énoncés ci-dessous, nous présentons les principaux résultats acquis.

La nature et la teneur volumique en minéraux à conduction électronique

L'effet de ces deux paramètres a été largement étudié depuis les années 1950 jusque dans les années 1970 dans le cadre de la prospection minière. Il ressort de ces travaux que les roches possédant des minéraux métalliques à conduction électronique du **Tableau I.2**, notamment organisés sous forme disséminée et à des teneurs volumiques faibles (de l'ordre de quelques %), constituaient des cibles privilégiées pour la méthode PP (Pelton *et al.*, 1978 ; Wong & Strangway, 1981 ; Nelson & Van Voorhis, 1983 ; Mansoor & Slater, 2007).

Tableau I.2. Principaux minéraux à conduction électronique.

Oxydes	Sulfures	Autres minéraux
Magnétite Pyrolusite Cassiterite	Pyrite Pyrrhotite Marcasite Galène Chalcopyrite Cobaltite Argentite Chalcocite Marcasite	Graphite Cuivre

La taille et la forme des grains

Une caractéristique importante du spectre de phase d'une roche minéralisée est la présence d'un « pic » de phase, nommée souvent f_c , c'est-à-dire une fréquence à laquelle la phase atteint un maximum. De nombreux résultats montrent que ce pic se déplace vers les basses fréquences lorsque la taille des grains de minerais métalliques augmente (e.g, Collet, 1959 ; Wong, 1979) (Figure I.7). Cet effet de la taille des grains sur la fréquence f_c , a été également démontré sur des mélanges d'argiles et de billes de verre (Klein & Sill, 1982) : la constante τ ($\tau = 1/2\pi f_c$) est une fonction linéaire croissante (de pente voisine de deux) du rayon des billes de verre (dans un diagramme log-log). Leroy *et al.* (2008) ont confirmé cette tendance sur des mélanges de billes de verre seules. Plus récemment, Koch *et al.* (2010) ont réalisé des mesures de PPS en laboratoire sur des échantillons de sables saturés possédant des granulométries variées (avec fraction fine jusqu'au gravier). Ils ont étudié l'influence de changements de la taille de grains de sable (assurés par compaction ou par tamisage) sur la réponse PPS, la conductivité hydraulique et la surface spécifique. Leurs résultats montrent un lien bien visible entre ces propriétés granulométriques et par conséquent porales avec la réponse PPS.

Les mêmes études conduites en laboratoire suggèrent qu'une augmentation de la largeur de la distribution de tailles de grain de minerai en maintenant leur teneur volumique constante, conduit à diminuer l'amplitude de la phase mesurée et donc à « aplatiser » le spectre de cette dernière. En outre, pour des grains allongés, l'amplitude de la phase et le paramètre f_c , dépendent de l'orientation des grains vis-à-vis de la direction du champ électrique appliqué : l'amplitude de la phase et la constante de temps τ sont plus élevés lorsque le champ électrique \vec{E} est parallèle à la direction principale des grains de minerai (lorsque les grains allongés sont disposés de manière parallèle à \vec{E}). Lorsque les grains allongés possèdent une orientation aléatoire, la quantité de grains parallèle au champ électrique détermine largement l'amplitude de la phase et la fréquence f_c (De Witt, 1979 ; Wong & Strangway, 1981 ; Vanhala, 1997b). A travers une modélisation menée *ad hoc* en considérant

des grains allongés isolant dans une matrice conductrice, Sen (1981) a montré qu'un effet géométrique analogue pouvait exister dans une large classe de formations géologiques (i.e., roches sédimentaires) autre que les roches métallifères.

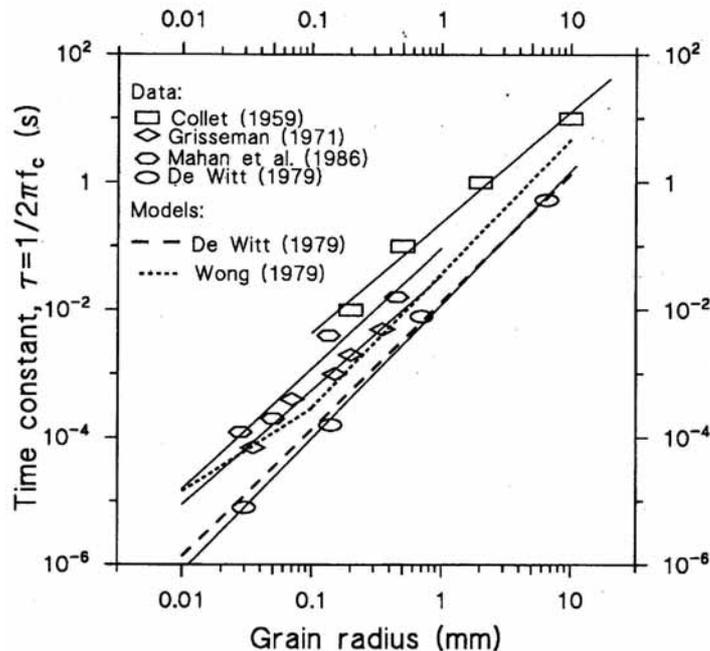


Figure 1.7. Relation entre constante de temps ($\tau = 1/2\pi f_c$) et taille de grain dans des roches synthétiques sur la base de résultats expérimentaux et de modélisations. Données : De Witt : grains de pyrite ; Mahan *et al.* : grains de pyrite ; Grisseman : grains de chalcoppyrite ; Collet : grains de galène (Vanhala, 1997b).

Vanhala (1997b) a également souligné que la distribution de la taille des grains avait une influence importante sur le spectre de phase. Une distribution uniforme des tailles de grains (i.e., distribution pour laquelle les grains possèdent le même diamètre) produit des spectres étroits alors que des distributions plus larges conduisent à des spectres plus étalés. La largeur du spectre peut être facilement quantifiée à partir du paramètre c du modèle empirique Cole-Cole (voir section 1.5.1). Le caractère « plat » des spectres est également attribué à la complexité de la minéralogie et à la forme des grains de minerai ainsi qu'à la forte rugosité de leurs surfaces (De Witt, 1979 ; Vanhala, 1997b). L'effet de la rugosité des grains a été également confirmé pour des roches sédimentaires (Lesmes & Morgan, 2001) et pour des billes de verre (Leroy *et al.*, 2008).

En résumé, nous retiendrons ici que le spectre de phase permet d'obtenir des informations texturales (microstructurales), au moins qualitatives, sur un géomatériau : (a) le pic de phase est lié, au premier ordre, à la taille dominante des grains ; (b) la largeur du spectre de phase est relié à la distribution de cette même taille de grains et à d'autres paramètres microstructuraux (forme et rugosité des grains).

La nature minéralogique, la distribution dans l'espace poral et la fraction volumique de la phase argileuse

L'effet de « l'argilosité » était largement connu dès les premiers pas de la méthode PP en prospection minière : il était souvent considéré comme un « bruit de fond » par les géophysiciens. Il aura fallu attendre les travaux de [Vaquier et al. \(1957\)](#) pour des applications hydrogéologiques pour que l'effet de « l'argilosité » soit étudié de manière systématique et quantitative. Il ressort de ces travaux et de ceux qui ont suivi sur le même sujet ([Sumi, 1959](#) ; [Marshall & Madden, 1959](#) ; [Vinegar & Waxman, 1984](#) ; [Telford et al., 1990](#)) qu'un effet PP significatif existe lorsque l'argile est organisée spatialement sous forme disséminée et à des teneurs relativement faibles (inférieure à 10 %). Pour des argiles massives compactes, l'effet PP est faible voire nul ([Telford et al., 1990](#)) mais ce n'est peut être pas le cas à des fréquences plus élevées que celles que nous étudions.

[Telford et al. \(1990\)](#) vont plus loin et suggèrent qu'il existerait une teneur en argile optimale pour laquelle l'effet PP serait maximum : la polarisabilité augmenterait avec la teneur en argile jusqu'à une certaine valeur puis diminuerait sensiblement. Sur la base d'expériences menées sur des mélanges synthétique d'argiles et de sables, les auteurs affirment que cette teneur en argile optimale (inférieure à 10 %) varie selon la nature minéralogique de l'argile mise en jeu : elle est faible pour la montmorillonite et plus élevée pour la kaolinite. Il est important ici de souligner que ces résultats ont été obtenus dans le domaine temporel et en condition saturée.

A partir de mesures menées cette fois-ci dans le domaine fréquentiel sur des mélanges synthétiques d'argiles et de billes de verre, [Klein & Sill \(1982\)](#) confirment l'importance de la nature minéralogique des argiles mises en jeu et de la composition chimique de la solution porale (notamment des cations compensateurs). L'existence d'une teneur en argile optimale pour la PPS n'est toutefois pas confirmée.

En résumé, l'ensemble des travaux menés sur l'effet de « l'argilosité » confirme l'intérêt d'utiliser la méthode PP pour (a) quantifier la teneur en argile des géomatériaux et (b) déterminer la nature minéralogique de la phase argileuse impliquée. Toutefois, cet intérêt a été démontré pour des géomatériaux possédant des teneurs relativement faibles (inférieures à 10 %) : l'effet PP est trop faible pour des argiles dites massives (i.e. ; avec des teneurs en argile supérieures à 50 %). Ainsi, d'un point de vue pratique, afin d'employer la méthode PP pour l'étude de l'« argilosité » des géomatériaux naturels, il convient de caractériser complètement la teneur en argile optimale, si elle existe, entre les deux domaines (i.e., entre les géomatériaux faiblement argileux et les argiles massives).

La composition chimique de la solution porale

L'effet de la composition chimique de la solution porale et plus particulièrement la salinité a été étudié parallèlement à l'effet d' « argilosité » sur des matériaux sédimentaires (e.g., Vaquier *et al.*, 1957 ; Fraser *et al.*, 1964 ; Klein & Sill, 1982 ; Vinegar & Waxman, 1984). Les résultats publiés semblent plutôt contradictoires. Vaquier *et al.* (1957); Fraser *et al.* (1964) montrent que l'effet PPT associé à la présence d'argiles augmente sensiblement lorsque la salinité diminue alors que les données de Klein & Sill (1982) et de Vinegar & Waxman (1984) montrent que l'effet PP dans le domaine fréquentiel dépend finalement peu de la salinité. Cette apparente contradiction de ces résultats s'explique en fait par plusieurs causes :

- Certains paramètres PP notamment la phase sont non seulement sensibles aux phénomènes de polarisation mais aussi à l'amplitude de la conduction électrolytique (et donc à la salinité) (voir la définition de la phase dans la **section 1.2.2**). Autrement dit, ils intègrent plusieurs phénomènes (phénomène de polarisation et phénomène de conduction) et apparaissent donc peu appropriés pour une étude phénoménologique.
- Selon les travaux de Lesmes & Frye (2001), il existerait pour les roches sédimentaires une salinité optimale (autour de 10^{-1} M NaCl pour les grès de Berea). En deçà de cette valeur optimale, les paramètres PP augmenteraient avec la salinité. Au delà de cette valeur, ils diminueraient avec la salinité.
- A la lumière des mécanismes de polarisation mis en jeu dans les roches sédimentaires, qui seront présentés plus loin, l'influence de la salinité ne peut être discuté indépendamment des effets associés à la phase argileuse (nature minéralogique, teneur et mode de remplissage de la porosité).

En résumé, nous retiendrons que si l'effet de la salinité n'est pas nécessairement négligeable, son influence sur les processus de polarisation est toutefois moins important que celui sur les mécanismes de conduction (cf. relation d'Archie) (**Figure I.8**).

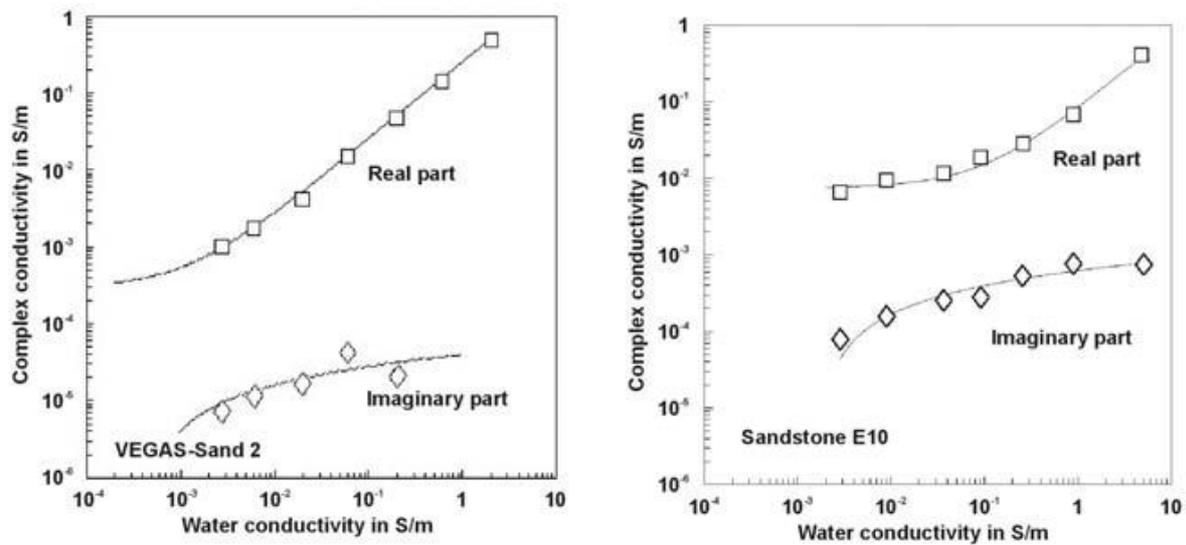


Figure I.8. Évolution de la conductivité complexe en fonction de la conductivité de la solution porale. A gauche : sable de granulométrie moyenne. À droite : grès argileux (Börner, 2006). La partie réelle rend compte principalement des processus de conduction des charges électriques. La partie imaginaire résulte principalement des processus de polarisation.

La taille des pores

Comme l'atteste l'historique de la méthode PP, l'importance de la texture (ou la microstructure) et des micropores via la phase argileuse a été rapidement identifié, dès la fin des années 50 (e.g, Vaquier *et al.*, 1957). Toutefois, assez curieusement, les premiers travaux exhaustifs sur le rôle de la taille des pores ont débuté récemment.

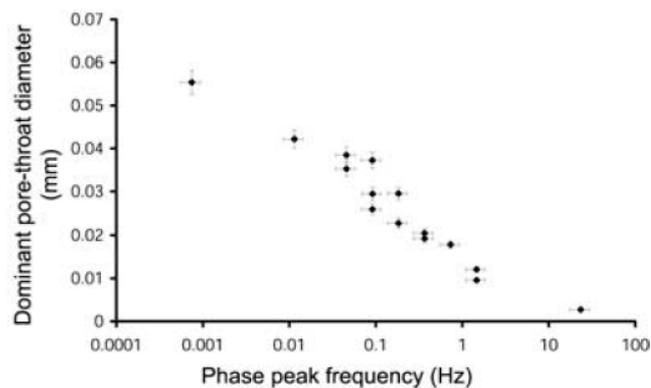


Figure I.9. Diamètre des pores de constriction obtenu par porosimétrie au mercure en fonction du pic de phase mesurée par PPS (Scott & Barker, 2003).

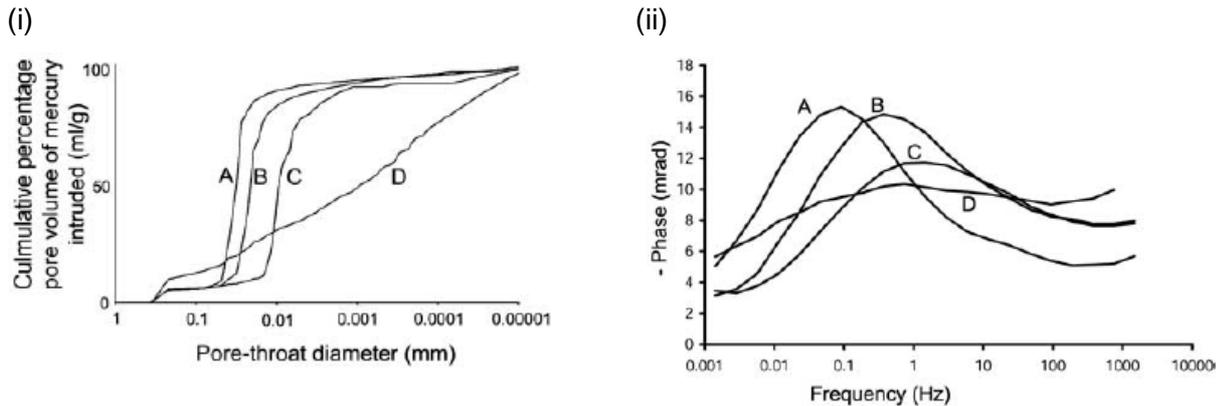


Figure I.10. Comparaison entre la taille des pores de constriction mesurée par porosimétrie au mercure sur 4 échantillons de grès (A, B, C et D) prélevés sur le site de l'université de Birmingham : (i) distribution (en cumulée) de la taille des pores de constriction (ii) spectres basses fréquences de phase mesurés sur les mêmes échantillons (Scott & Barker, 2003).

Les travaux les plus importants en la matière sont probablement ceux de [Scott & Barker \(2003\)](#). Ces derniers ont montré sur des échantillons de grès d'âge triasique qu'il existait une corrélation nette entre le pic de phase mesuré et le diamètre dominant des pores (de constriction) mesuré par porosimétrie au mercure (**Figure I.9 et I.10**). [Scott \(2006\)](#) a confirmé ces résultats et a montré expérimentalement que les macropores sont peu impliqués dans le processus de polarisation mesurée : en injectant un gel limitant la mobilité des ions dans la macroporosité, l'auteur observe peu de changement dans le spectre de phase.

Le degré de saturation en eau

[Parkhomenko \(1971\)](#) semble avoir été le premier à étudié l'effet du degré de saturation en eau. Il a observé que l'amplitude de la polarisation augmentait en fonction de la teneur en eau jusqu'à une certaine valeur puis diminuait. [Ogilvy & Kuzmina \(1972\)](#), [Worthington & Collar \(1984\)](#) ont également montré respectivement sur des échantillons synthétiques argilo-sableux non consolidés et sur des grès qu'il existait un pic de polarisation pour une teneur d'eau optimale (75 % concernant les échantillons d'[Ogilvy & Kuzmina, 1972](#)).

[Ulrich & Slater \(2004\)](#) ont étudié la conductivité complexe de grès non-consolidés en fonction de la saturation (eau/air). Les auteurs ont observé que le drainage des pores diminuait la polarisation mesurée (i.e., la conductivité imaginaire). La perte de l'électrolyte consécutive au drainage diminue également l'amplitude des mécanismes de polarisation en phase de dessiccation.

Pour expliquer l'ensemble de ces observations, [Chelidze et al. \(1977\)](#) et [Hoekstra & Doyle \(1971\)](#) ont invoqué les différents états physiques de l'eau. Aux faibles teneurs en eau, l'eau se trouve en état d'adsorption en surface des minéraux et va présenter des temps de

relaxation plus longs comparativement à l'eau libre qui remplira les macropores à des teneurs en eau plus élevées.

Plus récemment, [Breede et al. \(2010\)](#), ont étudié en laboratoire les relations entre paramètres PPS et états hydriques sur des échantillons synthétiques argilo-sableux pour une large gamme de degré de saturation (de 96 % à 4 % pour le sable pur ; de 99 % à 27 % pour les échantillons argilo-sableux). La saturation des échantillons est assurée par de l'eau de robinet de conductivité électrique suivante $\sigma_w = 450 \mu\text{S/cm}$ (soit $22 \Omega \cdot \text{m}$). Les spectres de phase mesurés et leur dépendance vis-à-vis du degré de saturation ont été clairement différents suivant les mélanges (**Figure I.11**). Pour le sable pur, les valeurs de phase ont augmenté avec la baisse du degré de saturation et ceci sur toute la gamme de fréquences (de 10^{-3} à 10^4 Hz). Le spectre de phase pour le mélange sable-argile à 5 % d'argile a montré le même comportement que le sable pur. Toutefois, un déplacement du pic de phase vers le domaine des hautes fréquences a été clairement observé. Le mélange sable-argile à 20 % d'argile a lui par contre présenté un comportement significativement différent. A saturation totale, le spectre de phase a dévoilé un faible pic à 0,2 Hz puis la phase a augmenté puis diminué progressivement avec le degré de saturation. Le pic de phase s'est aussi déplacé vers les hautes fréquences. Nous noterons que :

- Pour ce dernier mélange à 20 % d'argile, les données de [Breede et al. \(2010\)](#) semblent suggérer également l'existence d'un degré de saturation optimal pour lequel la phase serait maximum.
- La présence d'argile induit au cours de la désaturation des déplacements de pic de phase vers les hautes fréquences. Pour les faibles teneurs en eau, i.e. pour les remplissages de pores les plus petits, les pics de phase correspondent à des fréquences plus élevées conformément aux résultats de [Scott & Barker \(2003\)](#).

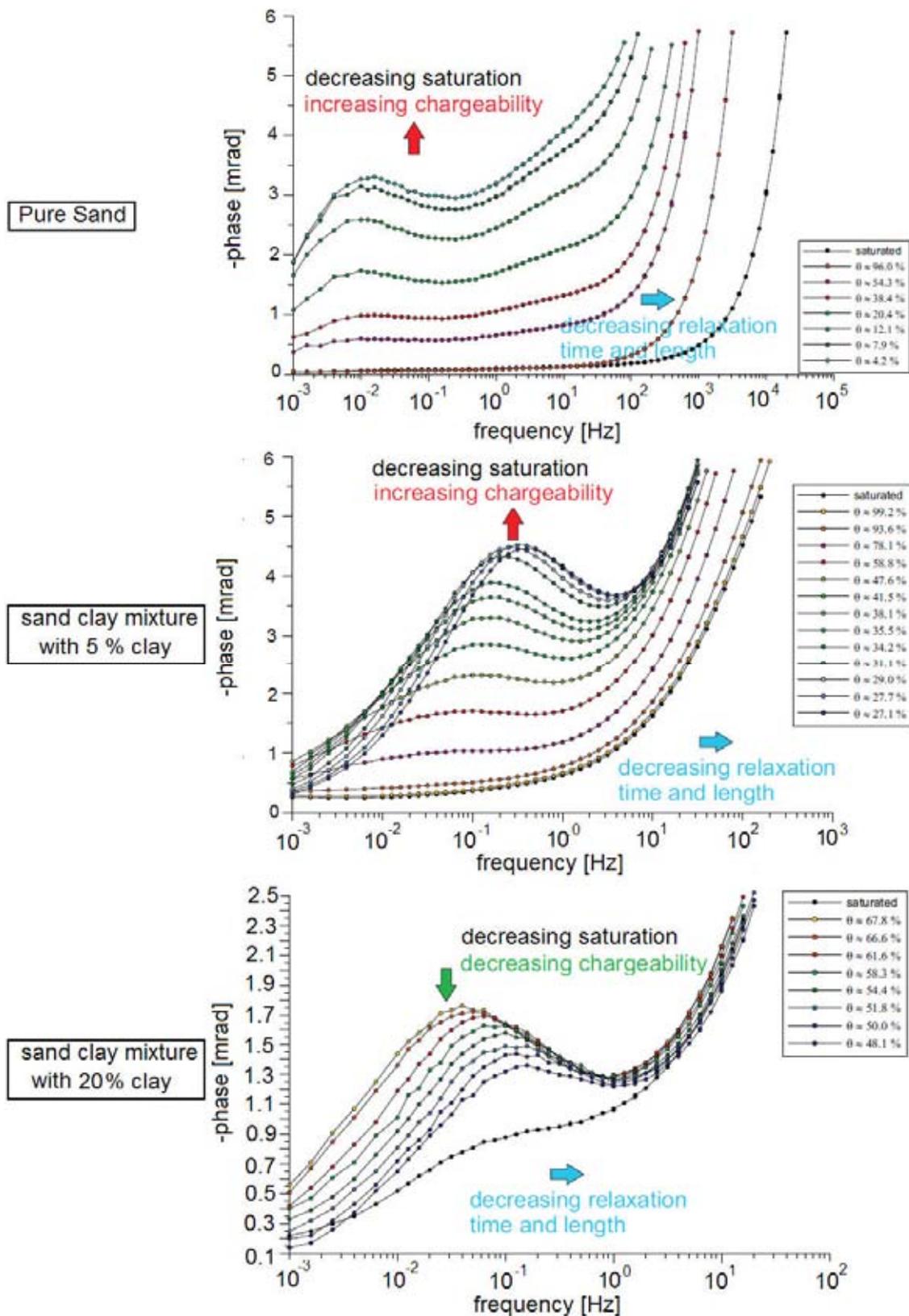


Figure I.11. Influence des variations du degré de saturation sur le spectre de phase pour trois géomatériaux : un géomatériau purement sableux (100 %) et un mélange sableux-argileux avec respectivement un pourcentage de (5 %) et (20 %) d'argile (Breede et al., 2010, dessin modifié).

Les propriétés pétrophysiques (surface spécifique et perméabilité)

Les travaux de Börner & Schön (1991) ont été certainement à l'origine des nombreuses recherches menées en hydrogéophysique sur les relations entre paramètres PP et perméabilité hydraulique. Ces auteurs ont montré qu'il existait une relation linéaire (dans un diagramme log-log) entre la partie imaginaire de la conductivité complexe et la surface spécifique S_p (le rapport entre la surface totale des pores divisée par le volume des pores). Récemment, Weller *et al.* (2010) et Kruschwitz *et al.* (2010) confirment cette relation linéaire en offrant une synthèse des mesures menées par différents auteurs sur des échantillons de grès et de mélanges argilo-sableux (Figure I.12).

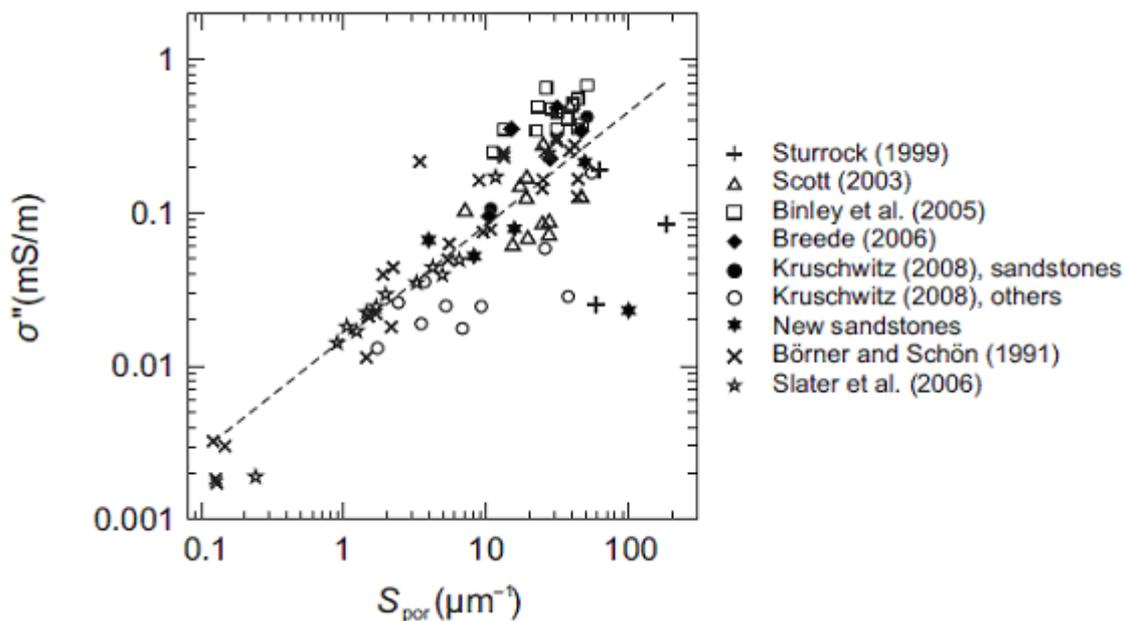


Figure I.12. Variation de la partie imaginaire de la conductivité complexe σ'' (mesurée à 1 Hz) avec la surface spécifique d'échantillons de grès et de mélanges argilo-sableux (dans une échelle log-log). La ligne pointillée signifie le meilleur fit $\sigma'' \propto S_{por}^n$ ($n = 0.74$, $r^2 = 0.68$) (Kruschwitz *et al.*, 2010).

La surface spécifique étant le paramètre-clé de la relation de Kozeny-Carman largement utilisée pour la modélisation de la perméabilité, K_s (à l'état saturé), les auteurs ont ainsi proposé l'équation empirique suivante :

$$K_s = \frac{a}{F S_p} = \frac{a}{F b (\sigma''_{1Hz})^c} \quad \text{équation (I.27)}$$

où l'on reconnaît dans l'égalité de gauche la relation de Kozeny-Carman ; avec a , b et c trois constantes, F est le facteur de formation de la relation d'Archie et σ''_{1Hz} la partie imaginaire de la conductivité complexe mesurée à 1 Hz.

Suivant la même problématique, sur la base d'expériences menées sur des mélanges sable-argile et des dépôts sédimentaires d'origine glaciaire, Slater & Lesmes (2002) recommandent d'utiliser plutôt le paramètre granulométrique d_{10} (le passant à 10 %) de la formule de Hazen, plus facile à mesurer que la surface spécifique. Binley *et al.* (2005) ont montré sur des grès que la perméabilité K_s (à l'état saturé) était bien corrélée avec le paramètre τ (une constante de temps) inversé du modèle Cole-Cole (**voir section 1.5.1**).

La fracturation-fissuration

L'intérêt en géophysique de l'étude des relations entre propriétés électriques et comportement en rupture des roches s'est développé dans les années 90 (Börner & Schön, 1995 ; Glover *et al.*, 1996, 1997, 2000). Ces travaux ont surtout remis en lumière le mérite de la partie réelle de la conductivité complexe (sensible à la conduction électrolytique) pour le suivi de la connectivité des fissures générées par un chargement triaxial (Glover *et al.*, 1996, 1997).

Nover *et al.* (2000) ont étudié la réponse électrique spectrale d'échantillons synthétiques de calcite (afin d'éviter une possible minéralisation annexe pouvant induire une réponse parasite) soumis à des chargements mécaniques (de nature hydrostatique et déviatorique). Il s'agissait, en laboratoire de suivre l'évolution des fractures sous condition de pression hydrostatique (induisant la fermeture des fractures) et triaxial (générant et propageant des fractures). A partir d'un modèle électrique analogique simple, ils ont mis en évidence : (a) que les composants résistifs (i.e., les résistances) du modèle étaient bien sensibles aux variations de porosité fissurale et de connectivité des fissures et (b) qu'un composant capacitif du modèle augmentait drastiquement à la génération de macrofissures à l'approche de la rupture de l'échantillon (**Figure I.13**). Cette observation est en accord avec les travaux fondateurs de Börner & Schön (1991) : l'augmentation de la surface spécifique des échantillons, ici associée à la fissuration, induit bien une augmentation de l'amplitude de la polarisation. Les résultats de ces travaux mécano-électriques ont été confirmés sur des gneiss et des échantillons de marbre (Nover *et al.*, 2000).

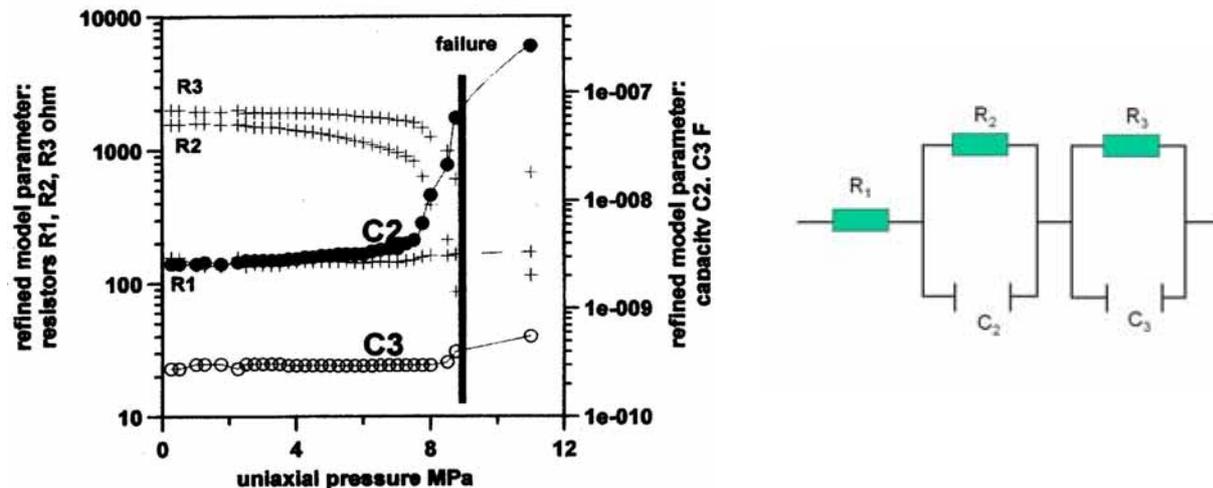


Figure I.13. Variations des paramètres du modèle de circuit équivalent de [Nover et al. \(2000\)](#) (données à droite). La résistance R_1 exprime la conduction volumique ; les paramètres (R_2 , C_2) décrivent les phénomènes de polarisation; les paramètres (R_3 , C_3) sont relatifs aux propriétés électriques volumiques de l'échantillon. Nous notons l'augmentation drastique de C_2 à l'approche de la rupture.

Toutefois, les données récentes de [Cosenza et al. \(2007\)](#) et [Ghorbani et al. \(2009\)](#) obtenus sur des roches argileuses consolidées (argilites) soumises à une dessiccation semblent contredire ce dernier point. Les auteurs ont plutôt observé une diminution de l'amplitude de la polarisation (de la conductivité imaginaire) avec la fissuration induite par dessiccation (**Figure I.14**).

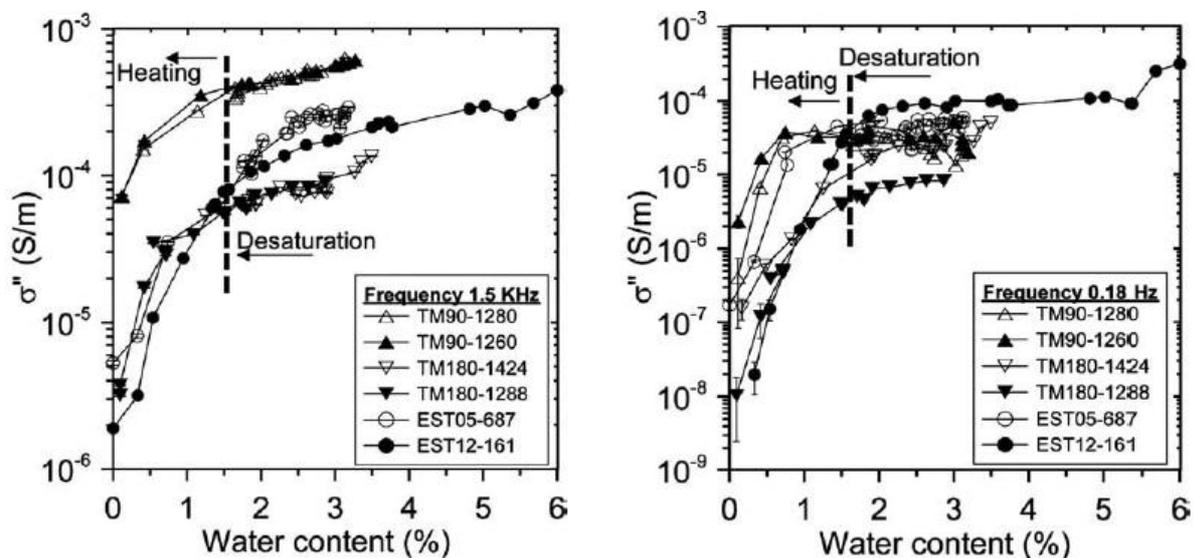


Figure I.14. Partie imaginaire de la conductivité complexe mesurée à 1,5 kHz (à gauche) et à 0,18 Hz (à droite) sur différents échantillons d'argilites. Les phases dites de « desaturation » et de « heating » correspondent respectivement à une désaturation à l'air ambiant et un chauffage de l'échantillon jusqu'à 105 °C ([Ghorbani et al., 2009](#)). La fissuration produite lors du chauffage a été attestée par CIN (Corrélation d'Images Numériques) ([Hedan et al., 2010](#)).

A notre avis, cette contradiction est très certainement apparente car ces essais sont en réalité délicats à interpréter : ils combinent deux effets antagonistes. Le premier est la (micro)fissuration, elle-même, qui augmente *a priori* l'amplitude de la polarisation (via σ''). Le deuxième est la diminution de la teneur en eau dans la matrice argileuse qui conduit à diminution de l'amplitude de la polarisation (voir les travaux présentés précédemment de [Breede et al. \(2010\)](#) sur le rôle de la désaturation lorsque la teneur en argile est importante). Ce dernier effet semble donc être dominant.

La température

L'effet de la température sur les propriétés PP est souvent évoqué mais finalement peu documenté. A notre connaissance, la seule étude un peu systématique sur cet aspect a été conduite par [Vinegar & Waxman \(1984\)](#). Les données de ces derniers ont montré (sur 2 échantillons) qu'une augmentation de température de 25 à 100 °C produisait :

- (a) une faible augmentation de la phase inférieure à 3 mrad dans le cas d'un échantillon de grès sans argile et
- (b) une très faible diminution de la phase inférieure à 1 mrad dans le cas d'un échantillon de grès très argileux.

Plus récemment, [Binley et al. \(2010\)](#), [Zisser et al. \(2010\)](#) ont étudié l'influence de l'effet de la température sur les propriétés électromagnétiques aux basses fréquences des grès. Une étude plus approfondie sur l'influence de la température, en contrôlant mieux la teneur en argile mériterait d'être menée.

En résumé, l'influence des différents paramètres décrits précédemment peut se résumer sur la figure suivante **(I.15)** qui met en exergue le rôle important de la nature minéralogique du géomatériau, de sa microstructure (granulométrie et organisation de l'espace porale), de son état hydrique (saturée ou non) et de la composition chimique de la solution porale.

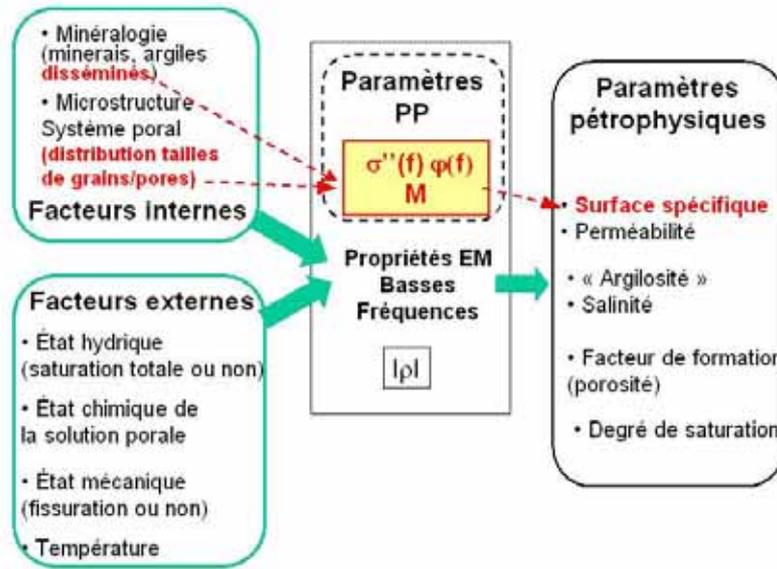
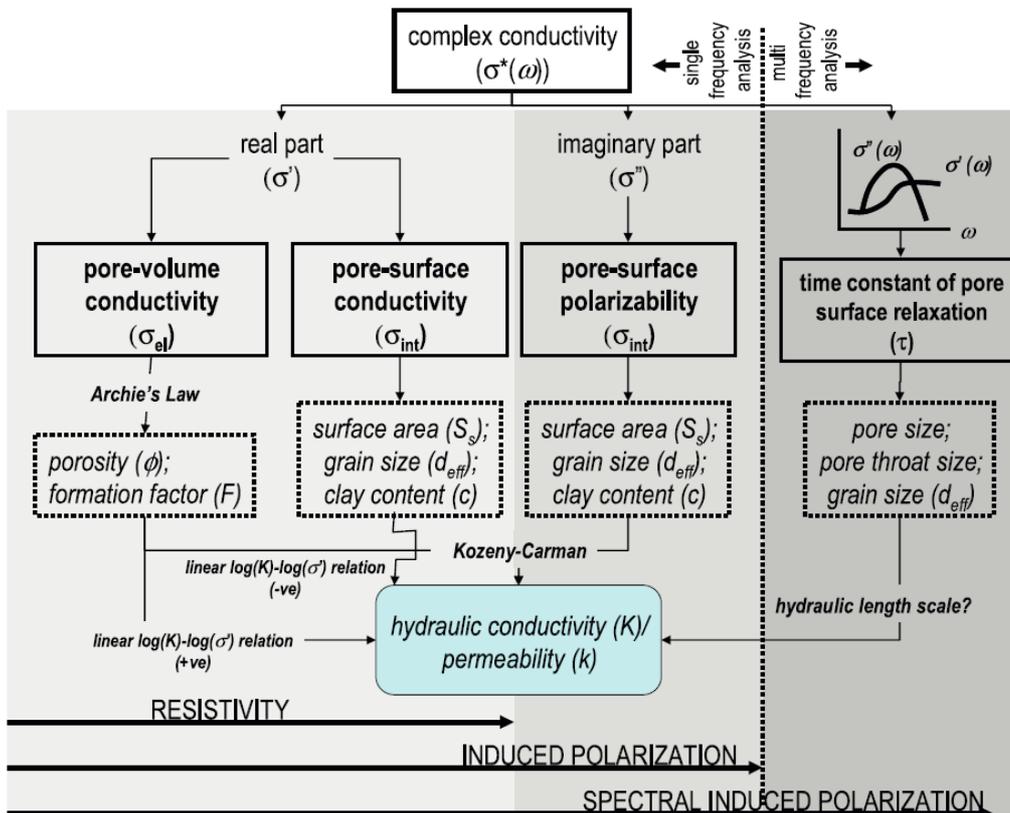


Figure I.15. Relations entre facteurs externes et internes aux géomatériaux, paramètres PP et propriétés pétrophysiques. En pointillés rouges, nous indiquons les relations spécifiques impliquées avec les paramètres PP.

Ce schéma complète celui de Slater (2007) (Tableau I.3) qui synthétise les relations mises en évidence entre des paramètres, notamment spectraux, (σ' , σ'') et les propriétés pétrophysiques et hydrauliques.

Tableau I.3. Organigramme récapitulant l'estimation des propriétés pétrophysiques et hydrauliques à partir des paramètres électriques (Slater, 2007).



L'ensemble de la communauté impliquée dans les mesures PP s'accorde pour affirmer que ces cinq grands paramètres (minéralogie, microstructure, état chimique de la solution porale, état mécanique, et état hydrique) interviennent dans les familles de processus de polarisation suivantes :

- La polarisation dite d'électrode en présence de minéraux à conduction électronique.
- Les processus de polarisation attachés à la double couche électrique (polarisation de la couche diffuse et de la couche de Stern, polarisation de membrane) souvent associés à l'existence d'une phase argileuse.
- La polarisation dite de Maxwell-Wagner liée à la répartition hétérogénéité des propriétés électriques dans le matériau.

1.4.2. La polarisation associée à la présence de minéraux métalliques

D'un point de vue historique, la polarisation liée à la minéralisation (*ou la Polarisation d'électrode*) est probablement le premier processus de polarisation décrit dans la littérature PP puisqu'il est intimement lié à la présence de minéraux à conduction électronique (**voir Tableau I.2**), cibles privilégiées de la prospection minière.

Ce processus de polarisation survient lorsque coexistent deux modes de conduction de charges électriques : une conduction électronique par les électrons des minéraux métalliques et une conduction électrolytique par les ions dans la solution porale (**Figure I.16**).

En suivant la présentation de [Telford et al. \(1990\)](#), considérons deux pores sur la **Figure I.16**. Dans le pore supérieur, le mode de conduction des porteurs de charge électrique est purement électrolytique. Dans le pore inférieur, la présence d'un minéral métallique, possédant des surfaces latérales chargées consécutivement à l'application d'un champ électrique, va provoquer une accumulation des ions de l'électrolyte sur ces mêmes surfaces. Cette accumulation de charges à l'interface métal-électrolyte donne naissance à un dipôle électrique dont l'intensité est notamment liée la dimension (ici horizontale) du grain métallique. Comme la vitesse du courant électrique dans l'électrolyte est bien plus faible que celle dans le métal, cette accumulation de charges à l'interface métal-électrolyte sera maintenue tant que le champ électrique sera appliqué. Lorsque ce dernier est arrêté, une ddp résiduelle se produira de par le retour des ions, par diffusion, à leur état d'équilibre initial.

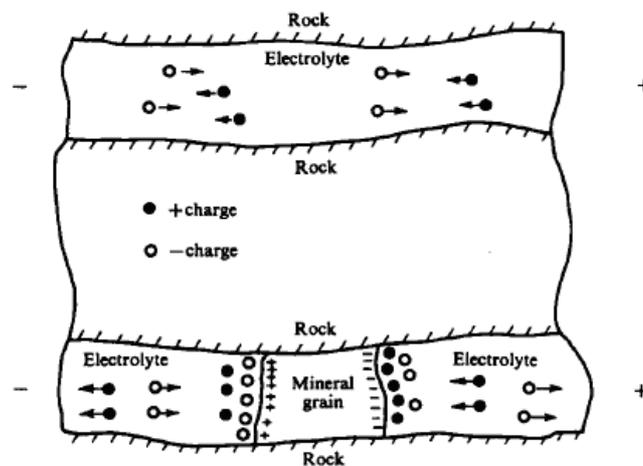


Figure I.16. Transport électrolytique de charges dans un pore d'un grès sans minéral (pore supérieur). Polarisation en présence d'un grain de minéral (pore inférieur) (Telford *et al.*, 1990).

Il convient ici de souligner que l'image classique de la **Figure I.16** est probablement trop simplificatrice. Elle suggère l'existence d'un blocage des pores par des éléments/grains métalliques comme l'origine de la polarisation. En réalité comme l'ont montré les travaux expérimentaux de Slater *et al.* (2006) sur des mélanges synthétiques grains métalliques-sable, ce n'est pas l'existence de grains métalliques bloquant les pores qui provoque la polarisation mesurée mais bien la quantité d'interfaces entre grains métalliques et eau porale.

1.4.3. Les phénomènes de polarisation associés à la double (ou triple) couche électrique

1.4.3a. *Eléments de la théorie de la double (ou triple) couche électrique*

En premier lieu, il s'agit de bien comprendre que l'existence d'une double (ou triple) couche électrique est la conséquence directe de l'existence d'un déficit de charges électriques à la surface des minéraux argileux (Avena & DePauli, 1996) (voir annexe A1). Sans entrer dans des détails physico-chimiques qui dépassent largement le cadre de ce travail de thèse, l'électroneutralité locale à l'échelle du feuillet argileux impose que ce déficit soit compensé par l'adsorption de cations hydratés (les cations compensateurs).

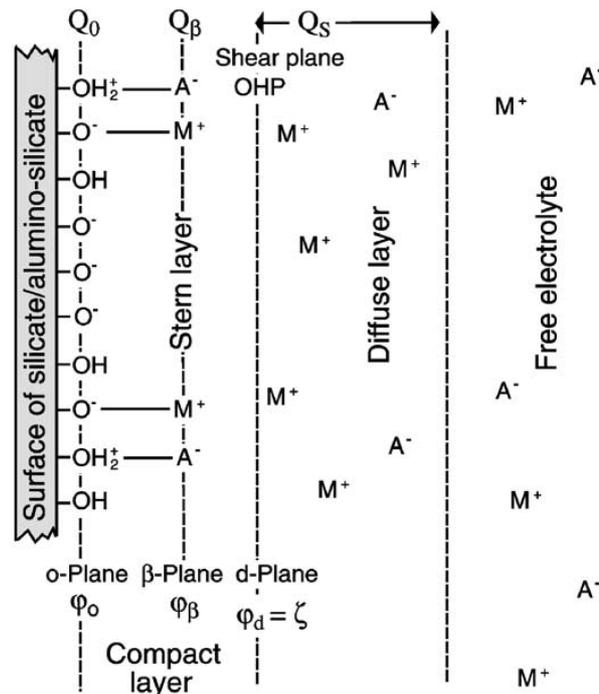


Figure I.17. Schéma de la triple couche électrique (Leroy & Revil, 2004). M^+ désigne les cations et A^- les anions. Q_0 représente la densité des charges électrique sur la surface du minéral, Q_β la densité des charges électriques par unité de surface dans la couche de Stern, Q_s la densité équivalente de charges électriques par unité de surface dans la couche de diffuse en (C/m^2). Le potentiel φ_0 (en V) désigne sur la surface du minéral, φ_β est le potentiel sur le plan bêta (plan de Helmholtz interne), φ_d est le potentiel (en V) du plan interne de la couche diffuse (plan de Helmholtz externe). En général on suppose que le potentiel φ_d est similaire au potentiel de Zeta (ζ) mesuré par des phénomènes électrocinétiques.

La description mathématique de la concentration de ces cations (et des anions également existant) à proximité des surfaces chargées négativement est donnée par la théorie de la triple couche électrique ou modèle de Gouy-Chapman-Stern (e.g, Leroy & Revil, 2004). Ce modèle considère une couche compacte de surface constituée d'ions hydratés d'épaisseur minimale équivalente à leur rayon ionique (la couche dite de Stern) et une couche diffuse composée de cations hydratés, mobiles et attirés à la surface par interaction électrostatique (Figure I.17). Dans la couche diffuse, on peut montrer par le calcul que la concentration en cations décroît exponentiellement à partir de la surface chargée du feuillet argileux. Lorsque la couche de Stern n'est pas pris en compte, nous parlons de théorie de la double couche électrique (ou de modèle de Gouy-Chapman).

1.4.3b. Polarisation de la couche de Stern

Sous l'effet d'un champ électrique macroscopique, les ions adsorbés de la couche de Stern peuvent migrer le long de la surface du minéral argileux (Schurr, 1964). Ces mouvements très localisés d'ions se produisent si les ions sont capables de dépasser de

grandes barrières d'énergie associées aux déficits de charges structurales du minéral argileux. La polarisation de la couche de Stern est liée à ces gradients de potentiels électrochimiques.

1.4.3c. Polarisation de la double couche électrique

La polarisation de la double couche électrique (donc sans la couche de Stern) résulte du déplacement des cations compensateurs relativement au minéral chargé, en réponse à l'application d'un champ électrique alternatif. Le mouvement des charges sous l'action du champ électrique va produire d'un côté de la particule un excès de charges de surface (i.e., un excès de charges négatives de surface dans le cas d'une particule d'argile) et de l'autre côté de la particule, un excès des cations compensateurs (i.e., un excès de charges positives dans le cas d'une particule d'argile). A l'échelle de la particule : un dipôle électrique se met en place.

Dans le cas d'une concentration élevée de particules argileuses (milieu dense), situation qui s'apparente le plus à un géomatériau, on conçoit intuitivement que la polarisation de la double couche soit annihilée puisque les cations vont pouvoir passer/circuler d'une particule argileuse à l'autre, empêchant ainsi l'installation de dipôles électriques.

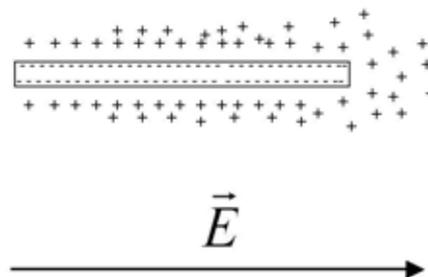


Figure I.18. Schéma simplifié de la polarisation de la double couche.

1.4.3d. Polarisation de membrane

Pour présenter ce processus de polarisation, nous nous inspirerons très largement de la présentation inhabituelle (au regard des ouvrages de géophysique appliquée) de [Revil & Cosenza \(2010\)](#). Considérons le cas simple de la **Figure I.19** sur laquelle figurent deux grains de matière isolante (constitués de silice par exemple) enrobés par une double couche électrique et immergés dans un électrolyte. L'électrolyte possède un sel dissous apportant à l'électrolyte des cations et des anions. La figure montre aussi un pore prisonnier entre les deux grains.

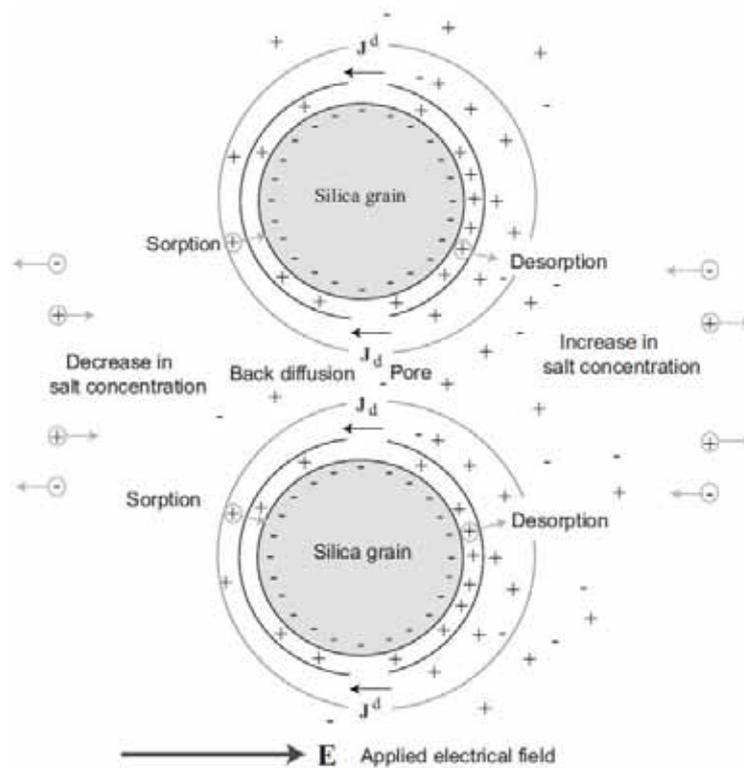


Figure I.19. Schéma de la polarisation de membrane d'un pore coincé entre deux grains (Revil & Florsch, 2010).

La présence d'un champ électrique provoque le déplacement de la double couche diffuse dans le cas où il n'existe pas de superposition de doubles couches entre les grains (ce qui suppose une suspension diluée de sphères dans l'électrolyte). Dans le champ lointain i.e. loin des deux grains, les cations se déplacent dans la direction du champ électrique et les anions dans le sens contraire.

Au centre de la figure et à des valeurs élevées du nombre de Dukhin (rapport entre la conductivité de surface associée à la double couche électrique et la conductivité de la solution porale), le courant électrique est principalement restreint à la double couche électrique. Si nous considérons que les grains sont chargés négativement (situation classique pour la silice à pH=7), les ions compensateurs de la double couche électrique sont alors des cations (les anions étant repoussés par les forces électrostatiques). Au centre de la figure, les fractions du courant total portées par les anions et les cations (exprimée par les nombres de Hittorf voir [Revil, 1999](#)) dans la solution porale sont différentes de celles dans la double couche diffuse. Du côté opposé, loin du centre de la figure, la densité de courant des cations entrant à gauche de la figure est identique à celle des anions quittant ce côté de la figure. Par conséquent, finalement, en termes de bilan, le nombre de cations arrivant par unité de temps vers le gauche de la figure est plus petit que le nombre de cations transférés par la double couche électrique. Ainsi, il existe une perte ou décroissance de cations à gauche des grains. A

l'opposé, le nombre d'anions arrivant du côté droit de la figure ne peut pas être transféré intégralement vers le côté gauche. Par conséquent, ils s'accumulent sur le côté droit des grains. De cette manière, il existe une augmentation de salinité sur le côté droit des grains et une décroissance de la concentration en sel sur le côté gauche des grains : un dipôle électrique s'est donc mis en place ; le système devient polarisé.

1.4.4. Polarisation d'interface (effet Maxwell-Wagner)

Les géomatériaux sont des milieux hétérogènes qui peuvent être considérés comme des mélanges de trois phases : (i) la phase solide, (ii) la phase gazeuse (généralement de l'air) et (iii) la phase liquide. Les phases solide et gazeuse sont électriquement isolantes alors que la phase liquide est le plus souvent conductrice. La réponse électrique macroscopique d'un tel milieu hétérogène va donc dépendre de l'organisation spatiale de ces phases isolantes-conductrices et de leurs propriétés électromagnétiques intrinsèques en termes de conductivité électrique σ aux basses fréquences (et/ou de permittivité électrique ϵ à hautes fréquences).

Sous l'application d'un champ électrique induit par un courant alternatif, les charges libres dans l'espace poral acquièrent une mobilité, et se propagent en fonction des contrastes de conductivité (et/ou de permittivité). A l'interface de différentes phases (*solide-liquide-air*), considérées comme des discontinuités électriques, le déplacement est restreint et l'accumulation des charges est provoquée. Cette accumulation aux interfaces isolant-conducteur existantes aux différentes échelles va créer l'apparition de « pôles » électriques : c'est l'effet Maxwell-Wagner ou polarisation d'interface (Chen & Or, 2006b) (Figure I.20). Ce phénomène de polarisation dépend donc essentiellement de la présence (i) des charges libres et (ii) des nombreuses discontinuités qui séparent les phases *solide-liquide-air* dans les sols ou roches partiellement saturés. Ces nombreuses discontinuités peuvent donc être reliées à la présence d'hétérogénéités texturales (*phase solide*), à l'état de saturation (*phase liquide*), ou à la genèse de nouvelles phases (*phase air ; associée à une fracturation*) du géomatériau. Ceci explique que de nombreux auteurs invoquent la polarisation de Maxwell-Wagner pour expliquer l'effet PP associé aux variations de degré de saturation et à la fracturation.

Sur la base de modélisations, nous admettons également que ce phénomène de polarisation se produit plutôt dans le domaine des hautes fréquences (> kHz) de la gamme PP (e.g, Leroy *et al.*, 2008 ; Tabbagh *et al.*, 2009).

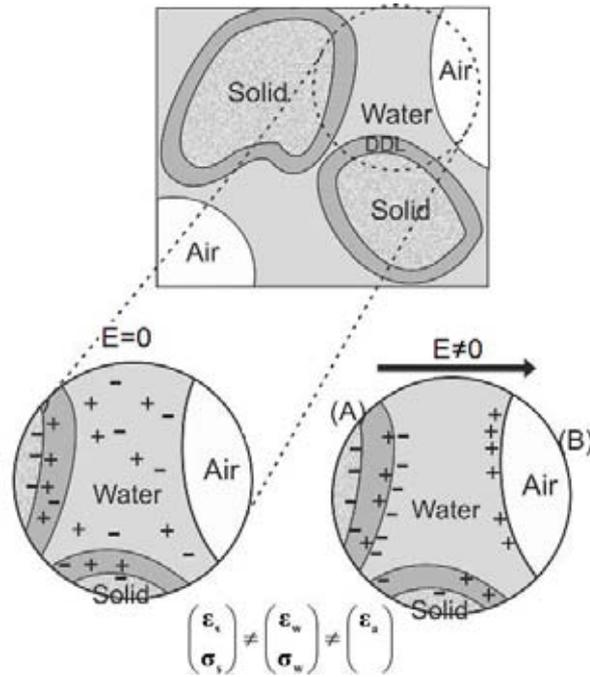


Figure I.20. Polarisation de Maxwell-Wagner (polarisation d'interface) liée aux perturbations des charges ioniques. (A) L'alignement des charges associées à l'interface solide-liquide sous l'application du champ électrique, (B) l'accumulation des charges à l'interface liquide-air lié au contraste des propriétés électriques entre les différentes phases (Chen & Or, 2006a).

En résumé, outre les processus de polarisation associés aux propriétés physico-chimiques du surface (i.e., associés à la double couche électrique), les propriétés électriques des roches dépendent de leurs microstructures (arrangement géométrique des constituants), des propriétés électriques des constituants et donc de leur d'interface (Lockner & Byerlee, 1985 ; Guéguen & Palciauskas, 1992). L'ensemble des processus de polarisation évoqués dans cette section est présenté de manière synthétique sur la Figure I.21. Nous avons également indiqué les processus de conduction qui leur sont liés.

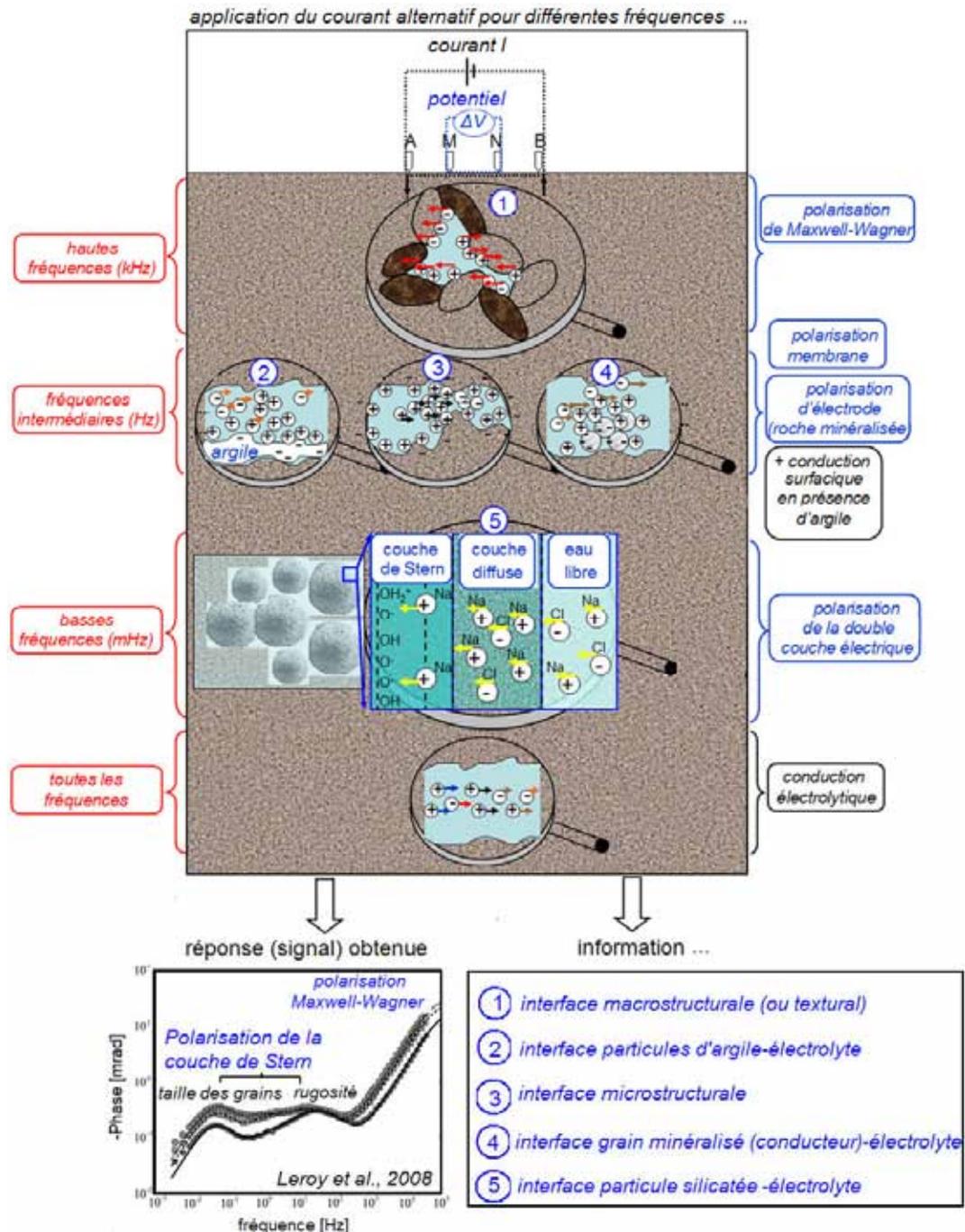


Figure I.21. Phénomènes de conduction et de polarisation induits dans un milieu poreux à l'échelle de l'espace porale ou du grain en fonction de la fréquence (chaque couleur de flèche des charges électriques représente une fréquence ou un intervalle de fréquences de mesure).

Il est important de souligner ici à la fin de cet exposé qu'un des enjeux majeurs des recherches théoriques actuelles sur la PPS porte sur la *discrimination* de ces différents processus de polarisation qui peuvent se superposer dans un même spectre. Comme l'illustre la **Figure I.22**, ces différents processus peuvent coexister avec une intensité et dans une gamme de fréquences données suivant la microstructure du géomatériau (Revil & Cosenza, 2010). Cette discrimination dans le domaine spectral de ces processus de polarisation ne

pourra être résolu qu'en combinant des mesures sur des systèmes-modèles, en conditions contrôlées et des modèles micro-macro rigoureux (i.e., Leroy *et al.*, 2008 et **Figure I.21**).

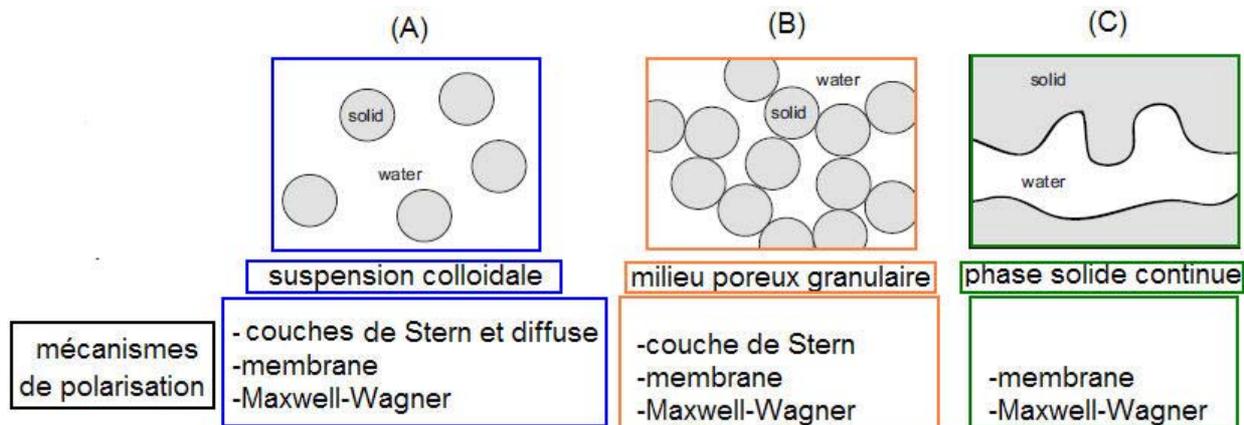


Figure I.22. Trois différents types de matériaux poreux caractérisés par différents mécanismes de polarisation (Revil & Cosenza, 2010 ; dessin modifié).

1.5. Modèles de représentation de l'effet PP

Dans le domaine fréquentiel, le spectre électrique d'un géomatériau est défini généralement par la représentation de l'amplitude de résistivité complexe ρ^* ($\Omega \cdot m$) ou de la phase φ (mrad) en fonction de la fréquence $f = \omega/2\pi$ (**Figure I.3 et I.23**). Cette représentation qui définit la relaxation d'un milieu peut être interprétée d'une manière complète à condition qu'un développement mathématique (ou physique) soit établi. L'évaluation d'une description mathématique correspondant à la réponse mesurée est appelée *la modélisation*. Grâce à l'implémentation des propriétés physiques *a priori* à propos du milieu, la modélisation permet de calculer une réponse théorique. Le but de la modélisation est de calculer une réponse théorique la plus représentative possible de la réponse expérimentale. Une fois que les données expérimentales et calculées se superposent, les paramètres définis pour le calcul de la réponse théorique sont considérés étant les paramètres descriptifs du milieu étudié. Néanmoins, il faudra garder à l'esprit que la réponse expérimentale peut ne pas avoir une solution théorique unique : plusieurs modèles différents peuvent correspondre aux mêmes données expérimentales.

D'une manière générale, nous distinguons deux grandes familles de modèles de polarisation : (a) les modèles empiriques ou semi-empiriques (Cole-Cole, 1941 ; Topp *et al.*, 1980 ; Dirksen & Dasberg, 1993 ; Knoll, 1996), et (b) les modèles théoriques qui combinent souvent des approches dites « milieux effectifs » (Sen *et al.*, 1981) et des modèles de polarisation de la double couche électrique (Schwartz, 1962 ; Schwan *et al.*, 1962 ; Schurr,

1964 ; Fixman, 1980 ; Lyklema *et al.*, 1983 et 1986 ; Springer *et al.*, 1983 ; De Lima & Sharma, 1992 ; Canan, 1999 ; Lesmes & Morgan, 2001). Nous trouverons dans Comparon (2005) une discussion exhaustive des avantages et des inconvénients de ces modèles. Dias (2000) donne également un bon aperçu des différents modèles possibles et essaye de trouver les relations entre les paramètres des modèles et les propriétés pétrophysiques qui intéressent le géophysicien.

Dans la suite de cette section, nous présentons successivement les modèles empiriques et les modèles théoriques les plus utilisés.

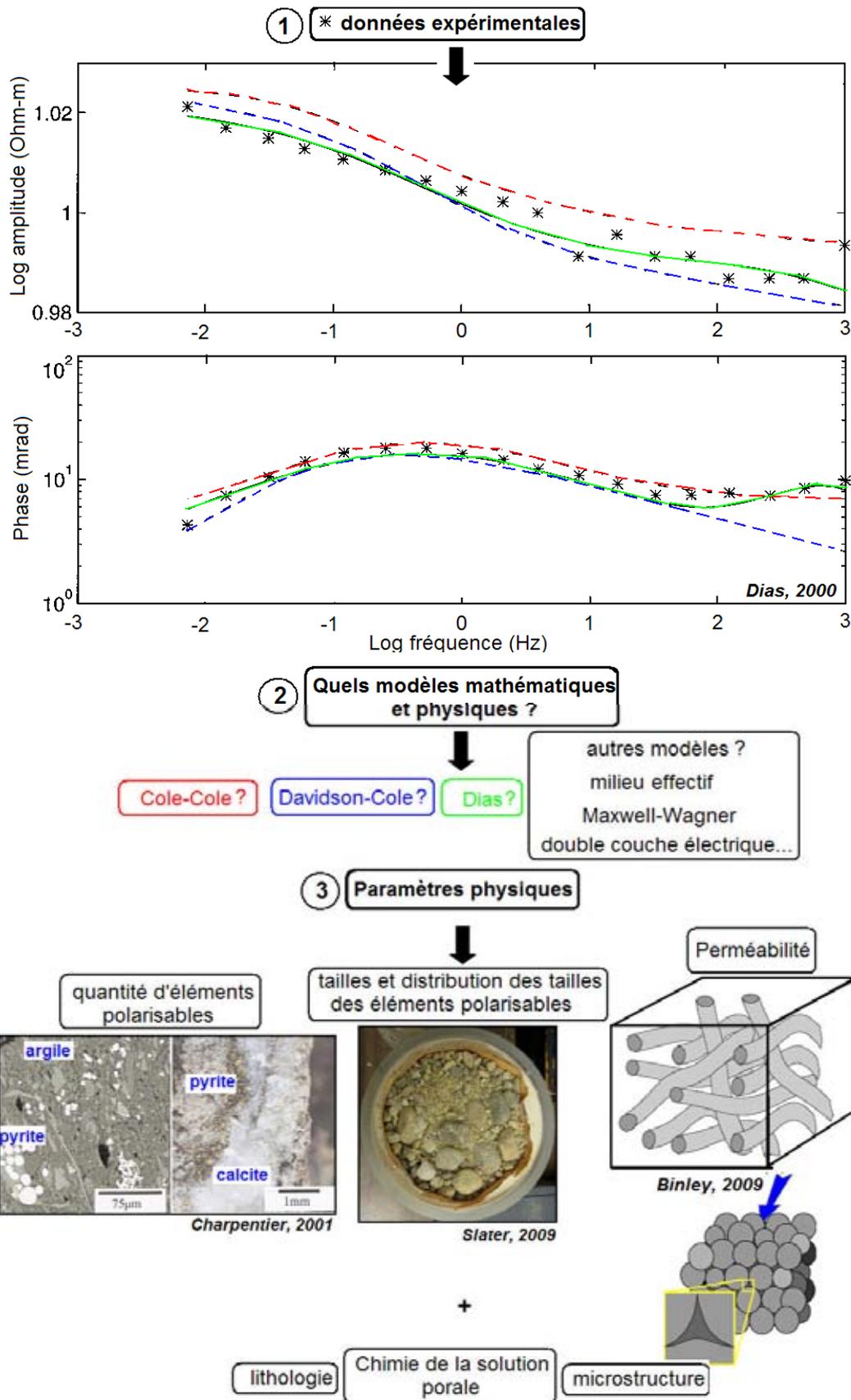


Figure I.23. Les différentes étapes de la modélisation, (1) Mesures dans le domaine spectral, (2) Choix des modèles mathématiques (empiriques) ou physiques, (3) Informations obtenues sur le milieu étudié.

1.5.1. Modèles empiriques

a- Le modèle de Cole-Cole généralisé

Le modèle de Cole-Cole généralisé s'écrit de la manière suivante :

$$\rho^*(\omega) = \rho_0 \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{(1 + (i\omega\tau_{CC})^c)^a} \right) \right] \quad \text{équation (I.28)}$$

C'est un modèle à 5 paramètres : ρ_0 , m , τ_{CC} , c et a . L'expression du modèle de Cole-Cole généralisé permet de retrouver plusieurs modèles empiriques en posant certains paramètres égaux à 1 (Nordsiek & Weller, 2008). Ainsi, lorsque les paramètres a et c valent 1 dans l'équation I.28, l'expression mathématique résultante correspond au modèle de Debye (Debye, 1929). Le modèle de Debye représente le modèle mathématique le plus simple pour décrire la relaxation d'un milieu. Ce modèle est caractérisé par un seul temps de relaxation (τ).

Dans un milieu réel, la polarisation est en fait la somme de plusieurs processus de relaxations caractérisés par différents temps de relaxation (associés à différentes tailles de grain, à la rugosité de la surface des grains, à des dimensions caractéristiques de l'espace porale etc.). Par conséquent, le modèle de Cole-Cole a été développé en ajoutant simplement un exposant : c (quand $a=1$). Ce modèle a été initialement développé afin de décrire des réactions électrochimiques Cole-Cole (1941). Le modèle de Cole-Cole traditionnel est donc caractérisé par 4 paramètres : ρ_0, τ_{CC}, c, m qui ont la signification suivante :

- ρ_0 la résistivité électrique en courant continu ($\Omega.m$) (i.e., $\rho \rightarrow \rho_0$ si $\omega \rightarrow 0$),
- m la chargeabilité intrinsèque du modèle Cole-Cole (sans dimension) ($m = 1 - \rho_0/\rho_\infty$ où ρ_∞ représente la résistivité à haute fréquence i.e., pour $\omega \rightarrow \infty$),
- ω signifie la fréquence angulaire (rad/s) et $i^2 = -1$, τ_{CC} désigne la constante de temps du modèle Cole-Cole (seconde),
- c décrit l'exposant du modèle Cole-Cole (sans dimension).

Suivant ces définitions, le paramètre a dans l'équation I.28 est nommé l'exposant du modèle Cole-Cole généralisée (sans dimension). Le développement des modèles empiriques s'est poursuivi ensuite par le modèle de Cole-Davidson, en imposant $c=1$ (Davidson & Cole, 1951). La modélisation de Cole-Cole peut se faire à la fois dans le domaine fréquentiel mais aussi dans le domaine temporel. Dans ce dernier cas, la chargeabilité m est déterminée par

le voltage résiduel après la coupure normalisé par le voltage mesuré au moment de l'injection (Seigel *et al.*, 1997). La constante de temps τ est obtenue par la décroissance exponentielle du voltage résiduel en fonction de temps. L'exposant Cole-Cole (ou constante de relaxation) c est estimé à partir de la courbure du signal de voltage résiduel (qui décroît exponentiellement) dans une graphique log-log (axe des X : temps, axe des Y : voltage). La relation entre les domaines temporel et fréquentiel est donnée par les transformations de Fourier et de Laplace (voir section 1.3).

Le **Tableau I.4** donne quelques ordres de grandeur des paramètres Cole-Cole et les relations avec des propriétés et/ou processus physico-chimiques du milieu étudié. La **Figure I.24** récapitule les effets sur les spectres de phase et d'amplitude de chacun des paramètres Cole-Cole.

Dans la pratique, les paramètres Cole-Cole sont déterminés par inversion selon des méthodes d'inversion non-linéaire (Jaggar & Fell, 1988). Il existe une littérature abondante sur l'inversion des paramètres Cole-Cole dans les domaines temporel et fréquentiel à la fois par la méthode des moindres carrés et par l'approche bayésienne (Yuval & Oldenburg, 1997 ; Routh, *et al.*, 1998 ; Luo & Zhang, 1998 ; Kemna, 2000 ; Xiang *et al.*, 2001 ; Ghorbani *et al.*, 2007a ; Höning & Tezkan, 2007). Ces méthodes d'optimisation ont été adaptées à des applications 2D (Loke *et al.*, 2006) et 3D (Li & Oldenburg, 2000).

Tableau I.4. Ordres de grandeur des paramètres Cole-Cole et leurs relations avec des propriétés et/ou processus physico-chimiques du milieu étudié.

Paramètres du modèle Cole-Cole	
ρ_0	<ul style="list-style-type: none"> ❖ La valeur de ρ_0 déplace verticalement les courbes du spectre d'amplitude. Il n'a pas d'influence sur le spectre de phase. ❖ Le paramètre ρ_0 dépend du facteur de formation (F) de l'échantillon, de la conductivité de la phase liquide dans l'espace porale, de la capacité d'échange cationique du milieu (Revil <i>et al.</i>, 1998).
m	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Décrit la magnitude de l'effet PP i.e., de la polarisation du milieu (Pelton <i>et al.</i>, 1983 ; Duckworth & Calvert, 1995). ❖ Le paramètre m varie entre 0 et 0,1 pour un milieu non métallique (Ghorbani <i>et al.</i>, 2007). ❖ Dans les roches minéralisées, le paramètre m dépend de la quantité et de la taille des éléments polarisables (Pelton <i>et al.</i>, 1978 ; Luo & Zhang, 1998 ; Grisseman <i>et al.</i>, 2000).
τ	<ul style="list-style-type: none"> ❖ La constante de temps τ donne une information sur la taille des grains et des pores du géomatériau étudié (Nordsiek & Weller, 2008). ❖ Le paramètre τ est lié à la conductivité hydraulique et à sa variation (Binley <i>et al.</i>, 2005 ; Schön, 1996 ; Slater & Lesmes, 2002). ❖ Il est associé à la surface spécifique du milieu poreux (Ghorbani <i>et al.</i>, 2007). ❖ Klein & Sill (1982) ont montré que la taille des grains des billes de verre était directement liée à τ. ❖ τ influence l'amplitude à haute fréquence (> 10 Hz) (Jougnot <i>et al.</i>, 2010). ❖ τ dépend de la position du pic de phase (Pelton <i>et al.</i>, 1983) (Figure I.24). ❖ τ varie sur une large gamme de 0,01 seconde à quelques milliers secondes (Loke <i>et al.</i>, 2006). ❖ Des valeurs élevées de τ indique une forte polarisation du milieu (Duckworth & Calvert, 1995).
c	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Le paramètre c représente la « largeur » de la distribution des temps de relaxation (Chelidze <i>et al.</i>, 1977 ; Pelton <i>et al.</i>, 1978 ; Chelidze & Gueguen, 1999a ; Kemna, 2000). ❖ c représente la « largeur » de la distribution des tailles des éléments polarisables (Vanhala, 1997; Luo & Zhang, 1998). ❖ Si c a une faible valeur, la largeur de la distribution des tailles de grain est importante. ❖ c varie entre 0.1-0.6 (Binley <i>et al.</i>, 2005) $0 \leq c \leq 1$ (Major & Silic, 1981) $c = 0.76 \pm 0.05$ (argilite de Mancos) $c \in [0,60 ; 0,84]$ (illites et smectites) (Leroy & Revil, 2009). ❖ L'augmentation de c joue sur la concavité du spectre de phase et sur la pente concernant le spectre d'amplitude (Ghorbani <i>et al.</i>, 2007) (Figure I.24). ❖ c influence l'amplitude à haute fréquence (> 10 Hz) (Jougnot <i>et al.</i>, 2010). ❖ c est lié à la rugosité et à la tortuosité des géomatériaux à l'échelle respectivement des grains et des pores (Lesmes & Morgan, 2001).

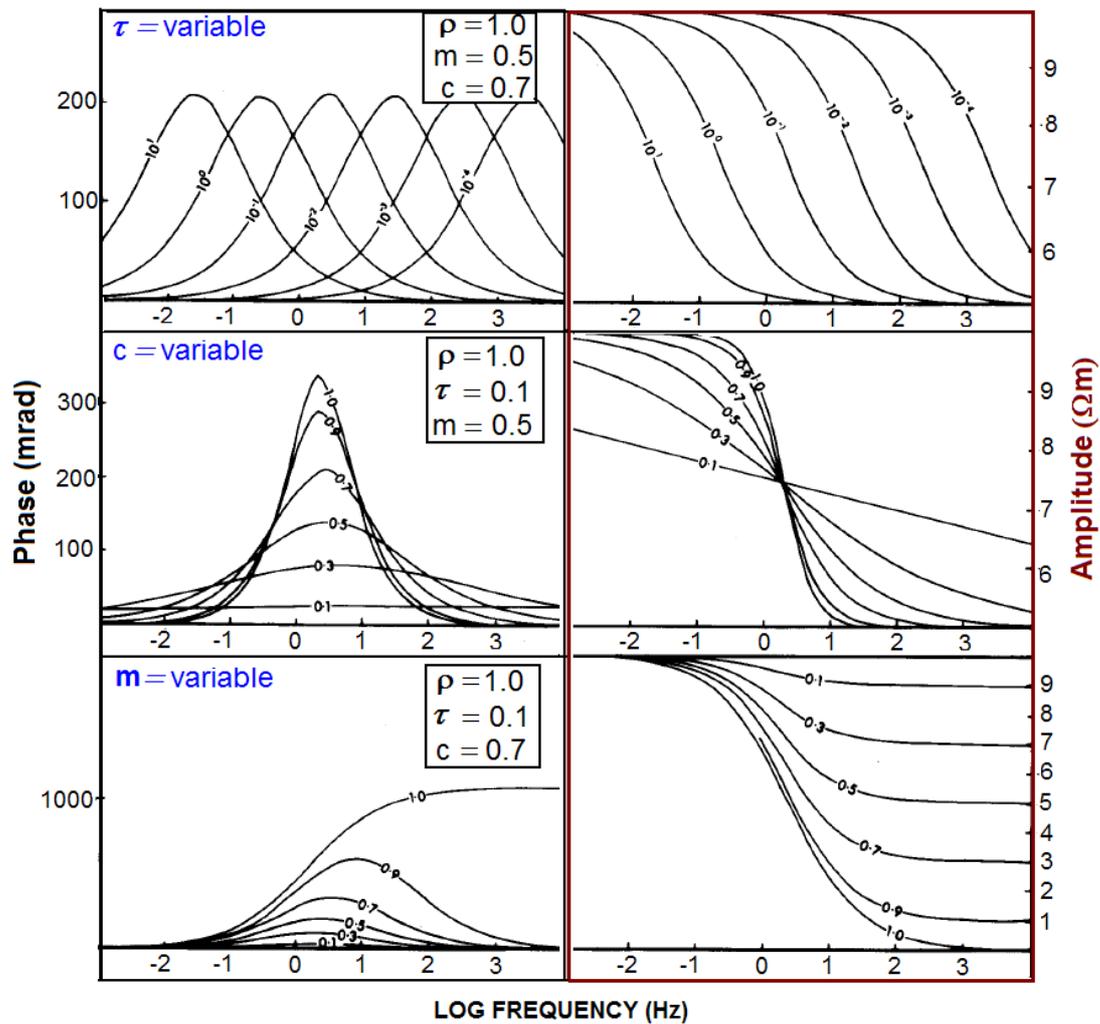


Figure I.24. Influence de la variation des paramètres du modèle de Cole-Cole sur les spectres de phase et d'amplitude (d'après Washburne, 1982 ; dessin modifié). Les graphiques de gauche représentent les spectres de phase (*mrad*), les graphiques de droites représentent les spectres d'amplitude ($\Omega.m$). L'axe des X désigne les logarithmes de fréquences (*Hz*). Concernant les deux graphiques de la première ligne, les paramètres ρ, m, c sont constants et τ est variable. La variation de τ change la position du pic de phase. Concernant les deux graphiques du centre de la figure, ρ, τ, m sont constants et c est variable. Plus c augmente plus la concavité du spectre de phase augmente et le spectre d'amplitude diminue plus rapidement. Concernant les deux dernières graphiques à la dernière ligne, ρ, τ, c sont constants et m est variable. L'augmentation de m induit l'augmentation de la pente du spectre de phase, et la diminution du spectre de l'amplitude.

Des travaux récents ont montré l'intérêt d'utiliser des modèles empiriques basiques décrits précédemment comme le modèle de Debye ou de Cole-Cole pour coupler la répartition des temps de relaxations associant différents processus de polarisation avec une distribution de tailles de grains (ou particules) (Leroy *et al.*, 2008 ; Leroy & Revil, 2009 ; Revil & Florsch, 2010). Dans la suite, nous proposons une brève synthèse de cette approche (Figure I.25 et Figure I.26).

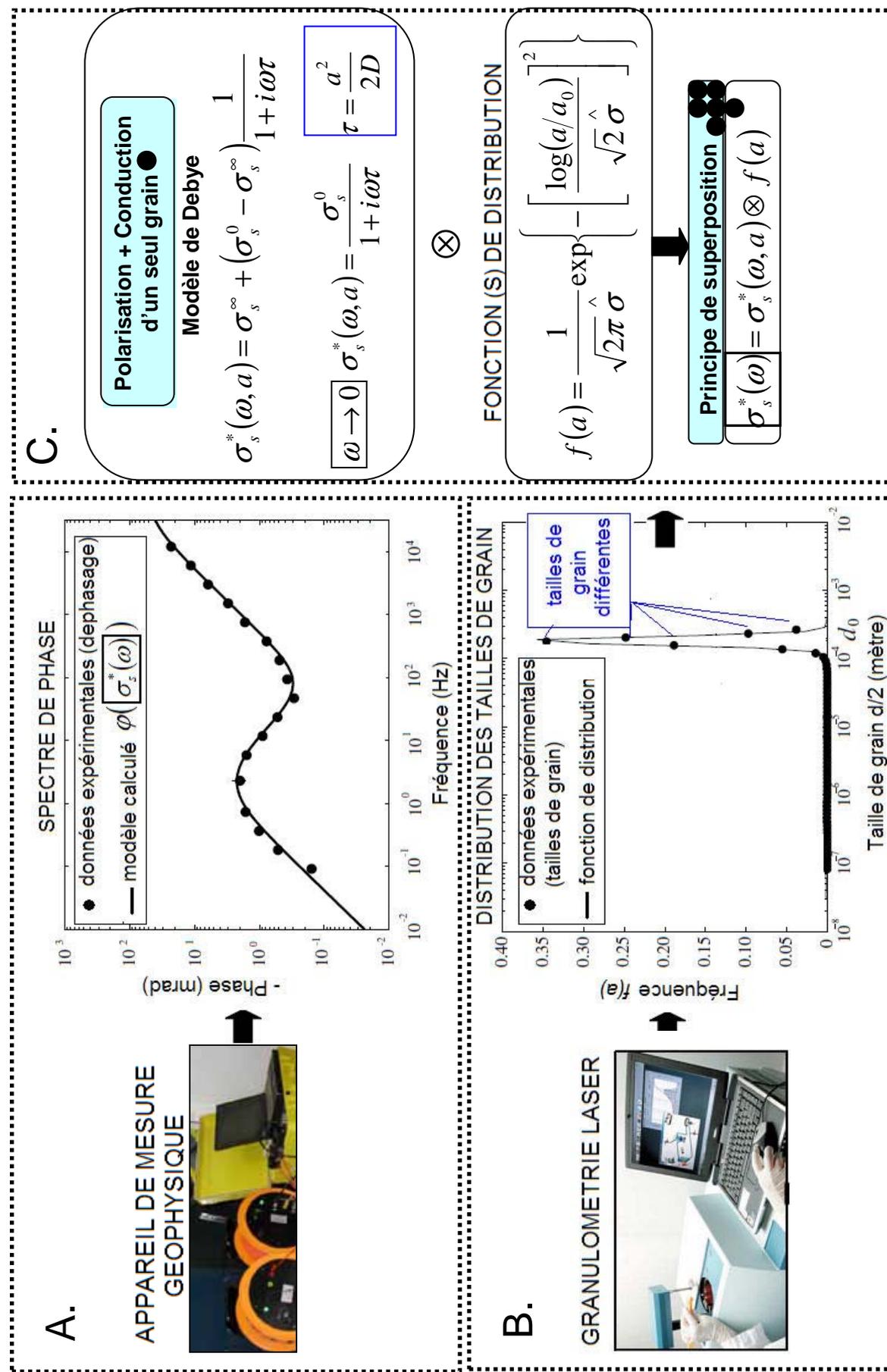


Figure I.25. Étapes de la modélisation « électrique + pétrophysique » à partir du modèle de Debye (dessin modifié de Revil & Florsch, 2010).

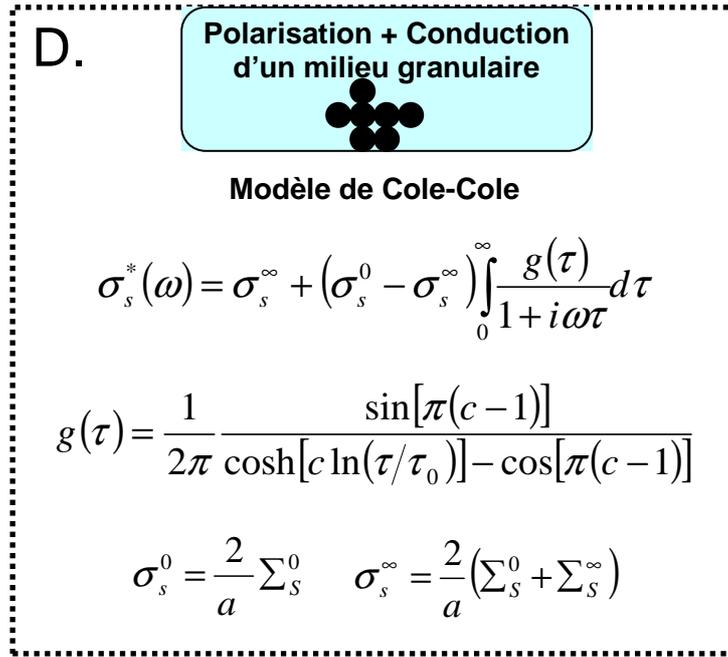


Figure I.26. Étapes de la modélisation « électrique + pétrophysique » à partir du modèle de Cole-Cole (Leroy et al., 2008).

Les paramètres apparaissant dans les **Figures I.25-26** désignent les grandeurs suivantes (par ordre de l'apparition) : ω : la fréquence angulaire (rad/s), a : le rayon de grain (m), $\sigma_s^*(\omega, a)$: la conductivité complexe au niveau de la surface d'un seul grain (S/m), σ_s^∞ : la conductivité de surface à haute fréquence (i.e., si $\omega \rightarrow \infty$) et σ_s^0 : aux basses fréquences ($\omega \rightarrow 0$) (S/m) (les fréquences basses et hautes sont déterminées en fonction de la fréquence angulaire critique $\omega_c = 1/\tau$ et σ_s^∞ , σ_s^0 sont des paramètres réels), τ : le temps de relaxation (s) (la distribution est symétrique $\tau = \tau_0$), D : le coefficient de diffusion ($m^2 s^{-1}$), \otimes : l'opérateur de la convolution, $f(a)$: la fonction de la distribution des tailles de grain (log-normal pour le cas dans la figure), a_0 : la taille de grain du premier pic observé sur le graphique de la distribution des tailles de grains (m), $\hat{\sigma}$: la déviation standard, $\sigma_s^*(\omega)$: la conductivité complexe effective du milieu poreux granulaire (S/m), $g(\tau)$: la fonction de la distribution des temps de relaxation selon le modèle Cole-Cole (1941), c : l'exposant de Cole-Cole (sans dimension), Σ_s^0 : la conductivité de surface DC induit par l'électromigration dans la couche de diffuse (S), Σ_s^∞ : la conductivité de surface induit dans la couche de Stern à hautes fréquences ($\omega \gg \tau_0^{-1}$) (S) (Leroy et al., 2008).

A : La partie A représente les étapes de mesures effectuées (déphasage) et du modèle final ajusté sur les données expérimentales. Une fois que les valeurs de déphasage sont obtenues, la prochaine étape consiste à calculer un modèle physique correspondant aux mesures. Dans les **Figures I.25-26**, nous montrons l'utilisation des modèles Debye et Cole-Cole dans le cadre d'une approche plus pratique en tenant compte des propriétés pétrophysiques en termes de grandeurs granulométriques du milieu étudié. L'objectif est de calculer un modèle de conductivité complexe effective en lien avec les temps de relaxation et les tailles de grain du milieu.

La relaxation d'un phénomène de polarisation spécifique est caractérisée par un temps de relaxation. Le plus souvent, le temps de relaxation est une fonction de la taille de grain. Néanmoins, dans un milieu poreux, sous l'application d'un champ électrique, différents processus de polarisation sont induits, chacun associé à un temps de relaxation. Il y a donc une distribution des temps de relaxation à prendre en compte. La réponse électrique effective d'un milieu en fonction d'une distribution des temps de relaxation peut se faire par deux approches.

B - C : La première approche (La partie B et C) consiste tout d'abord à adopter le modèle de Debye caractérisé par un seul temps de relaxation. Ensuite, nous passons par une analyse granulométrique (granulométrie laser par exemple) du milieu afin d'avoir une information quantitative sur la distribution des tailles de grain du même milieu. Une fois que la distribution des tailles de grain est obtenue, nous cherchons à définir une expression mathématique décrivant cette distribution. Dans le cas de la **Figure I.25**, pour l'explication, une distribution de type log-normal a été adoptée. Toutefois, il convient de noter que les milieux poreux peuvent présenter une distribution variée et dans ce cas-là, plusieurs fonctions mathématiques peuvent être utilisées. Une fois que la fonction de distribution des tailles de grain est obtenue, celle-ci est convoluée par l'expression de Debye, représentant la polarisation et la conduction d'un seul grain. Nous pouvons associer cette approximation au principe de superposition (i.e., les réponses électriques complexes de chaque taille de grain sont superposées). [Lesmes & Morgan \(2000\)](#) suggèrent également que la distribution des temps de relaxation peut être associée à la distribution des tailles de grain.

D : Dans la deuxième approche (partie D), lorsque la granulométrie est difficile à mesurer (cas des roches argileuses par exemple), nous prenons alors un modèle empirique pour représenter la fonction de distribution des temps de relaxation. C'est alors le modèle de [Cole-Cole \(1941\)](#) qui est introduit pour décrire quantitativement la distribution des temps de relaxation.

b- Le modèle à phase constante

D'après de nombreuses études expérimentales menées sur des échantillons de roches, (sédimentaires ou minéralisées), le spectre de la résistivité complexe se présente souvent sous la forme d'une ligne droite dans le diagramme d'Argand (axe des X : ρ' , axe des Y : $-\rho''$) (Van Voorhis *et al.*, 1973 ; Weller *et al.*, 1996). Le modèle représentant le mieux ce type de comportement électrique est appelé « le modèle à phase constante » (*en anglais Constant-Phase-Angle model*) » qui s'écrit de la manière suivante :

$$\rho^*(\omega) = \rho_0 \left(\frac{1}{(1 + i\omega\tau)^a} \right) \quad \text{équation (I.29)}$$

où les paramètres inconnus ρ_0, τ, a représentent respectivement la résistivité en courant continue ($\Omega.m$), le temps de relaxation (s) et l'exposant du modèle de phase constant (*sans dimension*). A haute fréquence ($\omega\tau \gg 1$), l'amplitude est exprimée de la manière suivante :

$$|\rho^*(\omega)| = \rho_0 (\omega)^{-a} \quad \text{équation (I.30)}$$

Alors que la phase est décrite par l'équation ci-dessous :

$$\varphi = \frac{\pi}{2} a \quad \text{équation (I.31)}$$

La **Figure I.27** montre quelques exemples de spectres ayant un comportement de type modèle à phase constante.

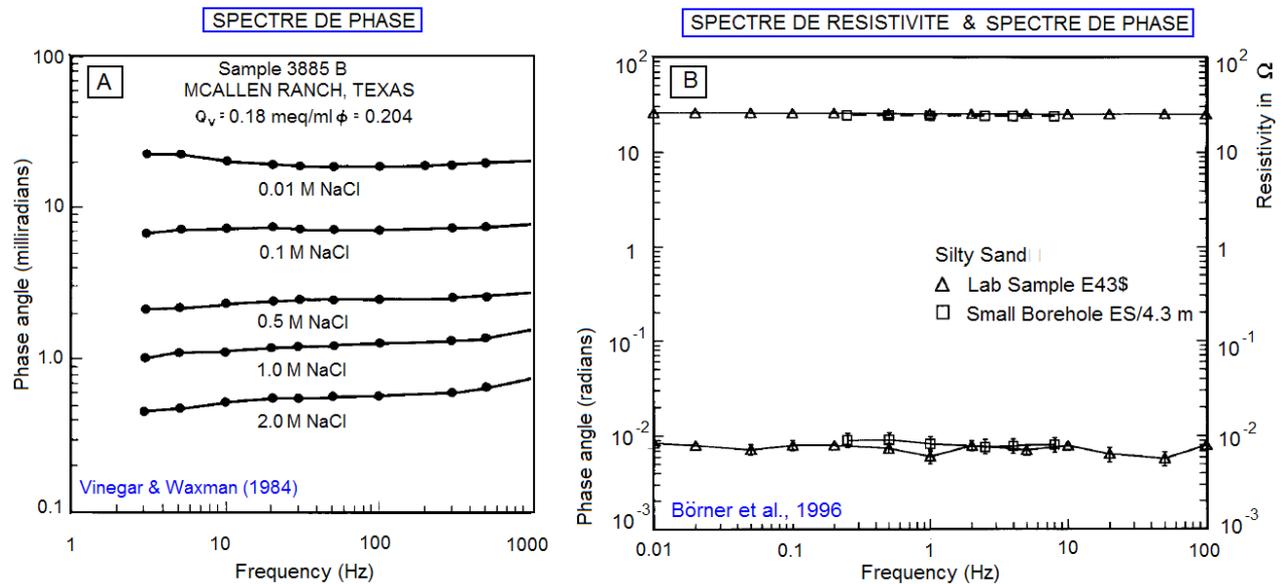


Figure I.27. (A) Exemples de spectres ayant un comportement de type modèle à phase constante Vinegar & Waxman (1984) sur un échantillon de grès argileux et (B) Börner *et al.* (1996) sur deux échantillons de sables limoneux à deux échelles différentes (laboratoire et forage).

1.5.2. Modèles théoriques

Le calcul théorique de la réponse électromagnétique liée à un phénomène de polarisation peut schématiquement se faire de trois façons : (a) par la résolution numérique des équations de Maxwell, (b) par la résolution semi-analytique de l'équation de Poisson (situation quasi-statique) sur une inclusion sphérique en introduisant une conductivité de surface et le courant qui lui est associé (modélisation de la polarisation électrochimique associée à la double couche électrique), ou bien (c) par la théorie des milieux effectifs (modélisation de l'effet Maxwell-Wagner). Comme nous le verrons, la combinaison de ces différentes approches peut être aussi envisagée.

Les méthodes numériques, consistent à discrétiser spatialement l'ensemble du milieu étudié. Les équations de Maxwell sont résolues numériquement suivant différentes techniques (différences finies, méthode des moments) à chaque maille jusqu'à ce que les réponses théorique et expérimentale se superposent. Ces approches concernent principalement la modélisation de l'effet Maxwell-Wagner (e.g, Cosenza & Tabbagh, 2004 ; Tabbagh *et al.*, 2009).

Les calculs semi-analytiques conduits sur une inclusion sphérique ou ellipsoïdale (en l'absence de voisine) ont surtout été réalisés dans le domaine de l'électrochimie des colloïdes. Il s'agissait donc de modéliser les processus de polarisation attachés à la double couche électrique. Suivant cette approche, O'Konski (1960) semble avoir été précurseur en ayant

introduit explicitement une conductivité de surface et le courant de charges qui lui est associé dans le problème de l'inclusion sphérique (dans son cas, la double couche électrique avait une épaisseur négligeable vis-à-vis du rayon de la sphère). Les autres études qui ont suivi (Schurr, 1964 ; Dukhin & Shilov, 1974 ; Fixman, 1980) n'ont fait que reprendre cette idée en faisant évoluer les conditions aux limites du problème pour le rendre plus réaliste.

Les approches selon la théorie des milieux effectifs consistent à obtenir la réponse théorique à partir de l'homogénéisation des propriétés électromagnétiques de tous les composants d'un géomatériau. Les propriétés ainsi homogénéisées sont appelées propriétés effectives (Figure I.28).

Historiquement, la théorie des milieux effectifs a été initialement considérée pour des milieux représentés par des éléments de géométrie sphérique (particule ou grain) composés de deux phases (solide et liquide). Dans une première étape, Maxwell-Garnett (1904) a formulé la réponse théorique d'un système simple composé d'un milieu hôte de permittivité et de conductivité (ϵ_1, σ_1) , dans lequel une petite fraction volumique est dispersée, et dont la permittivité et la conductivité (ϵ_2, σ_2) sont différentes par rapport au milieu hôte.

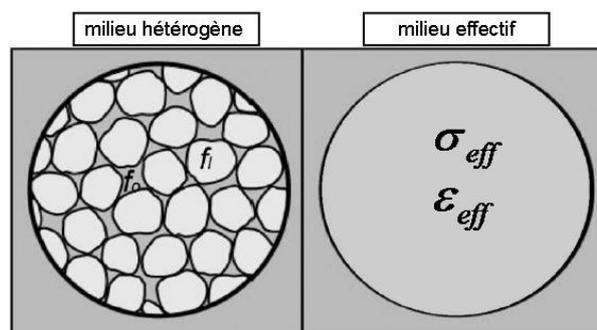


Figure I.28. Illustration d'un milieu hétérogène et son correspondant selon l'approche des milieux effectifs (Zhdanov, 2008 ; dessin modifié).

Wagner (1924) a généralisé ce résultat pour des suspensions de sphères. A la suite de ce développement, Bruggeman (1935) a amélioré cette approche empirique avec pour objectif de tenir compte des interactions EM entre les différents composants afin de considérer *in fine* des milieux denses (et non des suspensions). L'approximation de Bruggeman consiste à remplacer le milieu extérieur vu par chaque inclusion par un « milieu de référence », lui-même déterminé de manière auto-cohérente. Enfin, la théorie du milieu effectif différentiel (DEM : Differential Effective Medium) a été développée par Hanai (1968), pour un matériau à deux phases, composé de sphères de propriétés EM complexes. Il s'agissait de mieux prendre en compte les interactions entre sphères. Dans le cadre de l'approche DEM, la modélisation de la réponse électrique macroscopique d'un milieu hétérogène est donc connue par la formulation

théorique de Maxwell-Wagner-Hanai-Bruggeman (MWHB) (Chelidze & Gueguen, 1999b). La théorie MWBH tient compte des propriétés volumiques, de la géométrie et du volume des composants. La formulation de la théorie DEM est donnée de la manière suivante (e.g., Cosenza *et al.*, 2009) :

$$\sigma_{eff}^* = \sigma_w^* n^m \left(\frac{1 - \sigma_s^* / \sigma_w^*}{1 - \sigma_s^* / \sigma_{eff}^*} \right)^m \quad \text{équation (I.32)}$$

Ce modèle est appelé différemment suivant les auteurs : l'équation de Hanai-Bruggeman par Bussian (1983), l'équation de Bruggeman-Hanai-Bussian par Samstag & Morgan (1991) ou l'équation de Bruggeman-Hanai-Sen par Lesmes & Morgan (2001) et Lesmes & Friedman (2005).

Dans cette équation * signifie que les paramètres sont complexes, σ_{eff}^* représente la conductivité effective complexe, σ_w^* signifie la conductivité électrique de la phase liquide, tandis que σ_s^* est la conductivité électrique de la phase solide, n est la porosité ($1 - \phi_s = n$, où ϕ_s est la fraction volumique des sphères), m désigne le facteur de cimentation ce qui est une fonction de la géométrie des grains.

$$m = \left\langle \frac{5 - 3L}{3(1 - L^2)} \right\rangle \quad \text{équation (I.33)}$$

où L désigne le facteur de dépolarisation et le symbole $\langle \rangle$ représente la moyenne. L'équation devient la première relation d'Archie (cas saturé) quand $\omega \rightarrow 0$ (Sen *et al.*, 1981). Dans l'équation de la théorie DEM, en remplaçant la conductivité σ^* par la permittivité ε^* , l'expression peut être obtenue pour les hautes fréquences quand $\omega \rightarrow \infty$.

La théorie DEM est assez populaire en pétrophysique : elle a été utilisée avec succès pour la modélisation de la conductivité électrique en courant continu par Bussian (1983), des propriétés électrostatiques par Norris *et al.* (1985), des propriétés diélectriques par Feng & Sen (1985), des propriétés thermiques (Revil, 2000), des propriétés élastiques par Berryman *et al.* (2002), et aussi pour le couplage des propriétés électromagnétiques avec les propriétés hydriques par Cosenza *et al.* (2003 ; 2009).

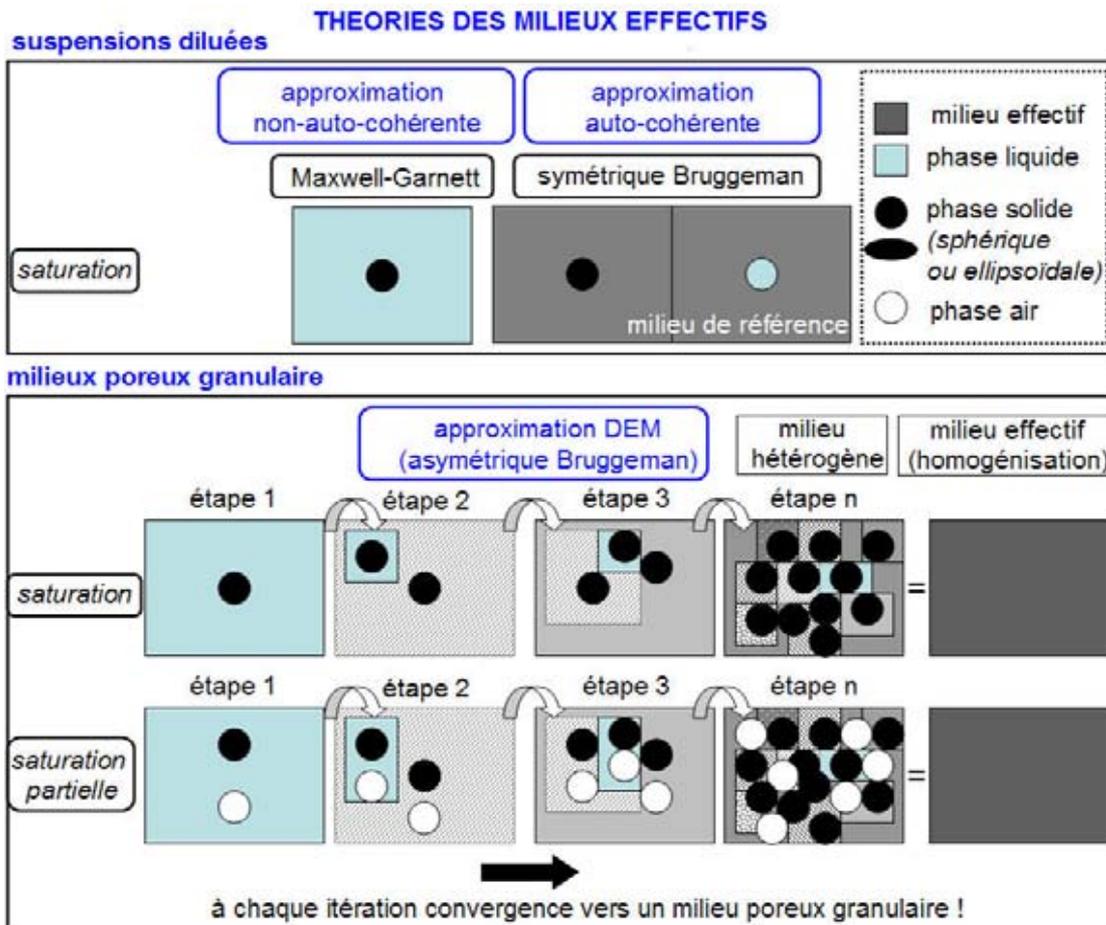


Figure I.29. Synthèse des approches DEM pour les cas de saturation totale et de saturation partielle. Les inclusions peuvent être sphériques ou ellipsoïdales. L'inclusion sphérique peut correspondre à des sols de grains grossiers, et les inclusions ellipsoïdales représentent le plus souvent les grains fins comme pour le cas des argiles.

Il est important de souligner ici que des approches récentes ont couplé les calculs semi-analytiques utilisés en physico-chimie des colloïdes (pour la polarisation de la double couche électrique) et l'équation MWHB (pour l'effet Maxwell-Wagner) permettant ainsi de discuter les contributions de chacun des processus de polarisation. Ainsi afin de modéliser l'effet PPS respectivement d'agrégats de billes de verre et de géomatériaux argileux, [Leroy et al. \(2008\)](#) et [Leroy & Revil \(2009\)](#) ont ainsi combiné : (1) un modèle de spéciation pour calculer les propriétés de surfaces des solides (2) un modèle de polarisation électrochimique de la couche de Stern (sur la base d'un calcul de [Schurr, 1964](#)) et (3) l'équation MWHB (pour l'effet Maxwell-Wagner). La confrontation entre les résultats du modèle et les données expérimentales donne des résultats très encourageants et ouvre de nouvelles perspectives pour comprendre les propriétés basses fréquences des milieux naturels.

1.6. Notion de zone endommagée ou d'« Excavation Damaged Zone » (EDZ)

Il existe plusieurs définitions de la zone endommagée, selon les différents types de roches envisagées pour le stockage en formations géologiques profondes (Tsang *et al.*, 2005 ; Blümling *et al.*, 2007). On ne s'intéressera ici qu'à celles relatives aux argilites.

Du point de vue géomécanique, lorsqu'on creuse une galerie, on modifie la distribution des états de contraintes initiales. Une telle perturbation peut consister en une redistribution des contraintes autour de l'excavation (Hoek & Brown, 1980 ; Hoek *et al.*, 1995). Il arrive souvent que la redistribution des contraintes dépasse les différents seuils de résistance mécanique de la roche (seuil d'endommagement, seuil de fracturation). Ceci entraîne l'apparition de discontinuités (fissures, fractures) dans la roche associée à une décharge mécanique instantanée des argilites autour des ouvrages.

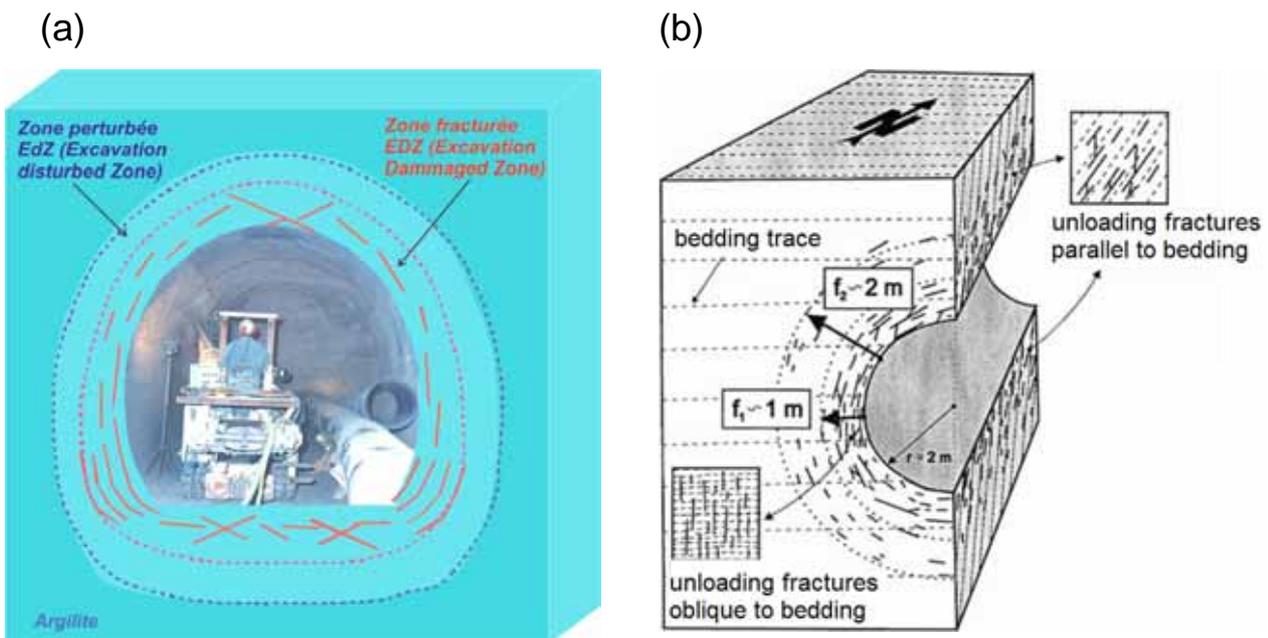


Figure I.30. (a) Modèle conceptuel simplifié de l'EDZ et l'EdZ, (b) Modèle conceptuel structural de l'EDZ ($\sim 1\text{ m}$) et de l'EdZ ($\sim 2\text{ m}$) au laboratoire souterrain du Mont Terri (Bossard *et al.*, 2002). (à noter que l'EdZ peut atteindre des profondeurs bien plus importantes que 2 m).

Il se forme ainsi une zone dite « endommagée » (*en anglais, Excavation Damaged Zone, ou EDZ*), proche de la paroi où les propriétés mécaniques de la roche sont affectées irréversiblement. Cette zone est caractérisée par des fissures ou des fractures interconnectées situées au voisinage immédiat des parois de l'ouvrage souterrain (Figure

I.30). Nous observons des modifications des propriétés de transport. Dans cette zone la perméabilité peut augmenter de plusieurs ordres de grandeur (e.g, Blümling *et al.*, 2007).

Au-delà de cette zone endommagée, il se crée une deuxième zone dite « perturbée » (en anglais, *Excavation disturbed Zone*, ou *EdZ*). Dans cette zone, les propriétés mécaniques de la roche ne sont pas affectées de façon significative. C'est une zone où des processus réversibles, tels que des déformations élastiques et des changements de pression interstitielle, se manifestent sans pour autant créer de chemins préférentiels. Elle est caractérisée par une fissuration microscopique diffuse, avec peu d'interconnexion (Blümling *et al.*, 2007). En pratique, la transition d'une zone à l'autre est progressive. Par contre, il n'est pas si évident de définir clairement les interfaces entre ces trois zones (i.e., la zone endommagée, la zone perturbée, la zone saine). Dans la littérature, les auteurs ont tendance à utiliser différentes définitions de la zone endommagée ou perturbée en fonction du cadre de leurs activités de recherche (génie minier, génie civil, mécanique pure, stockage en formations géologiques profondes..) ou de l'échelle spatiale de leur étude. Dans cette thèse, les définitions des notions d'EDZ et d'EdZ données précédemment, ont été adoptées à la conférence CLUSTER organisée par la Commission Européenne à Luxembourg (2003). Dans la suite de ce manuscrit, on ne s'intéressera qu'à l'EDZ car c'est sur elle que se focalise aujourd'hui l'analyse de sûreté des stockages en formations argileuses profondes.

La « fracturation » autour des excavations associée à l'EDZ est un phénomène complexe qui dépend d'un certain nombre de facteurs (e.g, Blümling *et al.*, 2007) :

- des propriétés intrinsèques du matériau (par exemple anisotropie),
- de l'état initial des contraintes *in-situ*,
- du contexte tectonique,
- de l'existence des zones de fractures naturelles ou d'hétérogénéités locales dans la roche,
- de la géométrie de l'ouvrage et des dimensions des galeries,
- de la profondeur de l'ouvrage souterrain,
- de la méthode d'excavation et de sa durée (plus l'excavation s'étale sur une longue période plus l'endommagement est important) (Olsson & Winberg, 1996).

La fracturation peut se traduire par la création de fractures récentes (*fractures néoformées*) dans la roche, ainsi que par glissement et/ou l'ouverture des plans fragiles préexistants, par exemple des plans de stratification (e.g, Cabrera *et al.*, 1999). L'apparition de ces fractures peut se développer soit au moment de l'excavation (fracturation instantanée) ou soit quelques années après l'excavation (fracturation différée). Dans le premier cas, la fracturation instantanée se produit lorsque les contraintes mécaniques *in-situ* au cours de

l'excavation atteignent le seuil de fracturation de la roche : la technique d'excavation choisie est alors clairement inappropriée. Dans le deuxième cas, le processus associé à la fracturation différée, survient progressivement dans le temps. Nous observons une déformation différée de la roche associée à des processus physico-chimiques complexes induisant des fractures.

La fracturation différée, la plus connue en génie minier, est probablement celle induite par la perturbation « hydrique » de la roche. Une fois l'excavation terminée, la ventilation de l'ouvrage souterrain intervient. La ventilation diminue l'humidité de l'air ambiant de l'ouvrage, induisant une déshydratation progressive de la roche située en proche surface. Cette déshydratation va avoir une influence significative sur les argilites parce que leurs propriétés mécaniques sont sensibles aux variations de la teneur en eau (e.g, Gasc-Barbier *et al.*, 2000 ; Su *et al.*, 2004 ; Bemmer *et al.*, 2004 ; Montes *et al.*, 2004 ; Valès *et al.*, 2004 ; Gasc-Barbier & Tessier, 2007 ; Ramos da Silva *et al.*, 2008 ; Ghorbani *et al.*, 2009). La **Figure I.31** résume les origines mécaniques et hydriques de la zone endommagée.

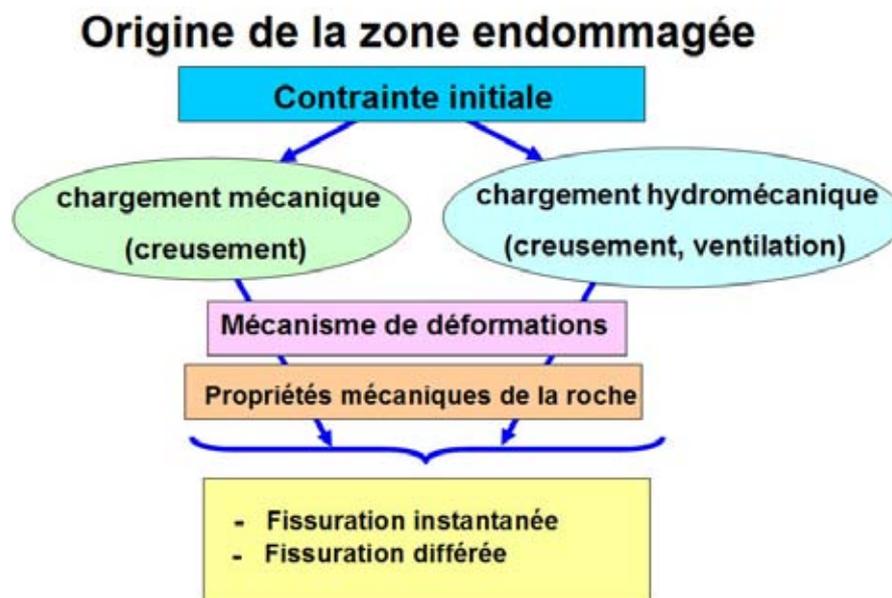


Figure I.31. Explication simplifiée de l'origine de la zone endommagée (IRSN, 2009).

Pour des teneurs en eau élevées, les roches argileuses se comportent comme des argiles plastiques. Pour des faibles quantités d'eau, elles se présentent comme des matériaux raides avec un comportement fragile à la rupture. Cette rupture s'accompagne de microfissures et macrofractures suivant les plans de stratification ou à l'interface d'hétérogénéités (Tsang *et al.*, 2008). Différents chercheurs (e.g, Valès *et al.*, 2004 ; Bemmer *et al.*, 2004 ; Montes *et al.*, 2004 ; Su *et al.*, 2004 ; Gasc-Barbier & Tessier, 2007) ont montré au laboratoire l'influence forte du degré de saturation des argilites sur le comportement géomécanique et la microstructure. A l'échelle de l'ouvrage souterrain, des fractures de

désaturation, apparaissent sur les parois des galeries parallèlement à la stratification (e.g, Cabrera *et al.*, 1999).

A ces perturbations hydriques, s'ajoutent des changements géochimiques induits par la ventilation naturelle ou forcée des galeries. Une des transformations chimiques, largement étudiée en génie minier est l'oxydation de la pyrite (FeS_2) provoquée par la mise en contact de la roche avec l'air ambiant (e.g, Rakotondrastsima *et al.*, 1983 ; Taylor, 1988 ; Wakim, 2005). Cette oxydation conduit à la formation d'acide sulfurique. L'acide réagit à son tour avec les carbonates de calcium. Cette réaction produit du sulfate et peut former du gypse dont la cristallisation provoque des accroissements de volume et de contraintes pouvant conduire à l'éclatement du matériau argileux. L'oxydation de la pyrite peut créer un réseau de microfissures se traduisant par l'apparition de chemins d'écoulement préférentiels et augmenter ainsi le risque de rupture.

En résumé, l'EDZ est non seulement un phénomène d'origine mécanique mais résulte également de perturbations hydriques, chimiques voire thermiques induites par l'excavation. Ainsi, pour pouvoir caractériser l'EDZ et son évolution, plusieurs processus complexes souvent couplés doivent être considérées : évolution de la pression de l'eau interstitielle, désaturation-resaturation associée à la ventilation, phénomène d'oxydation etc. (Figure I.31).

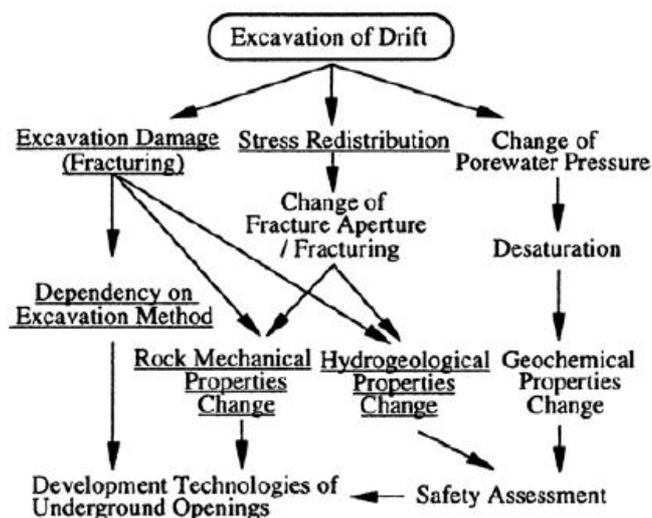


Figure I.32. Processus de modification des propriétés physiques de la roche liés au creusement (Sato *et al.*, 2000).

Ainsi, dans le contexte d'un stockage géologique de déchets radioactifs, il est clair que cette EDZ est susceptible de dégrader les propriétés de confinement de la roche par la création des chemins préférentiels permettant d'accélérer le transfert des radionucléides vers la biosphère. Il est donc important de mettre en œuvre tous les moyens possibles pour arriver

à une compréhension approfondie de cette zone, de son comportement et de ses caractéristiques, notamment de son évolution dans le temps.

Les techniques actuelles de mesures pour la caractérisation de l'EDZ sont très variées (e.g, Jougnot, 2009) : observations visuelles, analyses pétrographiques et mesures pétrophysiques sur des échantillons prélevés à partir de forages, diagraphies et enfin méthodes géophysiques mises en œuvre depuis les parois de l'ouvrage. Nos travaux étant centrés sur la méthode géophysique PP, la prochaine section présente plus précisément la position et les apports des méthodes électriques dans ce contexte.

1.7. Apports des méthodes électriques à la caractérisation de l'EDZ

L'EDZ constitue une zone où les propriétés physiques de la roche sont modifiées par rapport à la roche saine. Il existe donc des contrastes de propriétés physiques de ces deux zones en contact. L'existence de ces contrastes de paramètres physiques justifie ainsi la mise en œuvre de méthodes de prospection géophysique pour la caractérisation des zones endommagées : ces contrastes vont constituer les zones cibles ou « anomalies » de ces méthodes. En outre, les méthodes géophysiques permettent de caractériser des volumes importants (i) avec une densité d'échantillonnage élevée, et (ii) d'une façon non-destructive (les endommagements supplémentaires sont minimisés).

Les méthodes de tomographie et/ou réfraction sismique, les mesures de vitesses d'ondes élastiques à partir de forages (diagraphie sonore) et sur échantillons, la microsismique passive et les méthodes électriques sont certainement les plus utilisées pour la prospection de l'EDZ (e.g, Alheid, 2002). Toutefois, nous nous focaliserons dans cette partie sur les méthodes électriques car la physique impliquée dans la méthode PP, placée au cœur de ce mémoire, s'appuie essentiellement sur les propriétés électriques des roches prospectées.

Dans une première partie, on s'attachera à mettre en évidence les relations probables entre les mesurables électriques mis en jeu (résistivité et phase) et les caractéristiques pétrophysiques de l'EDZ. Dans une deuxième partie, on présentera les principaux résultats obtenus directement en galerie.

1.7.1. Relation entre propriétés électriques (résistivité et phase) et caractéristiques pétrophysiques de l'EDZ

La méthode de résistivité électrique consiste à injecter un courant électrique à partir de deux électrodes d'injection (appelées A et B) et à mesurer la différence de potentiel électrique induite à partir de deux autres électrodes de mesure de potentiel (appelées M et N). Le rapport entre la différence de potentiel induite et le courant injecté, est multiplié par un coefficient géométrique qui dépend de l'arrangement des électrodes : il permet ainsi de définir la résistivité du milieu (**équation I.4**). Le potentiel mesuré en surface et la distribution des lignes de courant dans le milieu vont dépendre de différents paramètres. Les paramètres, les plus importants, sont la salinité de l'eau porale, la fracturation, le degré de saturation (en eau) et dans une moindre mesure la rigidité du matériau (e.g, Keller & Frischknecht, 1966 ; Zhdanov & Keller, 1994). La résistivité électrique est couramment utilisée dans le but de caractériser des fractures de géomatériaux (e.g, Darboux-Afouda & Louis, 1989 ; Lile *et al.*, 1994 ; Ramirez & Daily, 2001 ; Lataste *et al.*, 2002 ; 2003 ; Samouëlian *et al.*, 2003).

Comme nous l'avons vu précédemment, lorsqu'il existe un déphasage entre le courant injecté et la différence de potentiel mesurée, la résistivité devient une grandeur complexe caractérisée par une phase et une amplitude ou module (ou par une partie réelle et une partie imaginaire). Le déphasage appelée aussi phase étant liée directement à la partie imaginaire de la conductivité complexe (**équation I.8**), ce même déphasage va dépendre également de la surface spécifique du matériau (Börner & Schön, 1991).

Si les fissures et les microfissures de l'EDZ forment un réseau percolant et connecté à l'air ambiant dans la galerie, cette zone endommagée va alors également constituer une zone désaturée qui devrait voir ses propriétés électriques (amplitude de la résistivité électrique et phase) très différentes de celles de la zone saturée. En effet, la résistivité des géomatériaux est connue pour être très sensible aux variations de la teneur en eau (e.g, Keller & Frischknecht, 1966 ; Dannoski & Yaramanci, 1999 ; Binley *et al.*, 2002 ; Tabbagh *et al.*, 2002). Cette caractéristique a été confirmée au laboratoire pour les roches argileuses (Miehe *et al.*, 2000 ; Rothfuchs *et al.*, 2004 ; Wiczorek, 2004 ; Rothfuchs & Wiczorek, 2005 ; Cosenza *et al.*, 2007 ; Ghorbani *et al.*, 2009).

En outre, l'augmentation de la surface spécifique du matériau induite par la fissuration devrait contribuer à augmenter la conductivité imaginaire σ'' (Nover *et al.*, 2000 ; voir **section 1.4.1** effet de la fissuration). Toutefois, comme la désaturation tend à diminuer la conductivité réelle σ' , l'effet combiné de la désaturation et de la fracturation sur la phase n'apparaît pas

évident *a priori*. Les travaux expérimentaux de [Cosenza et al. \(2007\)](#) attestent néanmoins que la phase mesurée sur une large gamme de fréquence (0,18 - 12 000 Hz) sur une roche argileuse est également sensible à la perte en eau du matériau accompagnée d'une fissuration. Les travaux récents de [Ghorbani et al. \(2009\)](#) montrent sur un ensemble d'échantillons d'argilites que l'action combinée de la microfissuration et de la désaturation conduit plutôt à une diminution de la conductivité imaginaire σ'' . Ce dernier résultat mériterait d'être confirmé *in situ*.

Ainsi, en résumé, il apparaît raisonnable de considérer *a priori* les propriétés électriques comme des indicateurs pertinents de processus de désaturation et de fissuration liés à la génèse et au développement de l'EDZ.

1.7.2. Les résultats acquis en galerie souterraine

Dans cette section, nous présentons les résultats acquis par les méthodes électriques en galerie souterraine. Nous allons nous focaliser plus particulièrement sur les méthodologies et les méthodes d'inversion utilisées afin d'évaluer leur pertinence pour des expérimentations de PP menées en galerie souterraine. Seules les études les plus documentées et largement accessibles à la communauté scientifique seront considérées. On exclut également de cette étude bibliographique les travaux relatifs aux ouvrages peu profonds du génie-civil (e.g, [Ha et al., 2010](#)) qui ne s'intéressent pas aux problématiques liées à l'EDZ.

Les premiers travaux menés sur la caractérisation géo-électrique de l'EDZ en galerie sont, à notre connaissance, ceux de [Kruschwitz & Yaramanci \(2004\)](#). Cette étude a été réalisée au Laboratoire Souterrain de Mont Terri (Suisse) dans la Galerie 04 pour étudier l'évolution de l'EDZ en juillet puis en septembre 2004 (soit 1 et 3 mois après l'excavation de la Galerie 04). Des tomographies de résistivité complexe ont été acquises avec le dispositif Wenner en utilisant l'appareil de mesures SIP FUCHS II (<http://www.radic-research.homepage.t-online.de/default.html>). Sans justification, les auteurs ont privilégié dans l'interprétation de leurs données les résistivités complexes acquises à la fréquence de 1 Hz. Il semble que cette fréquence ait été choisie pour éviter la polarisation des électrodes aux basses fréquences (électrodes en acier inoxydable) et les effets inductifs aux hautes fréquences. L'EDZ a été étudiée à partir de deux profils circulaires distants de 1 m dans la galerie 04. Chaque profil a été équipé de 45 électrodes avec un espacement de 8° (soit un écartement inter-électrodes d'environ 21 cm).

Afin de quantifier les résistivités complexes apparentes, les auteurs ont dû d'abord calculer les coefficients géométriques adaptés à la géométrie particulière de la galerie. Ce calcul est essentiel puisque la condition usuelle de « demi-espace infini » utilisée en

prospection à la surface du sol n'est plus satisfaite lorsque les mesures électriques sont menées dans un ouvrage souterrain. Ce calcul a été fait avec le code aux différences finies développé par Fan (1998).

Le logiciel commercial RES2DInv (Loke & Barker, 1995 ; 1996) a été ensuite utilisé pour inverser les résistivités apparentes obtenues. Ce logiciel est conçu pour l'inversion de données acquises sur un demi-espace infini en prenant en compte d'éventuelles variations de la topographie: il n'est donc pas adapté pour une prospection menée sur une géométrie circulaire (i.e., sur une topographie raide). Les auteurs ont levé partiellement cette difficulté en imaginant un processus d'inversion en 3 étapes. Dans une première étape, la pseudo-section initiale acquise avec 45 électrodes a été décomposée en 16 pseudo-sections fictives associées à 19 électrodes adjacentes présentant une faible variation de topographie (i.e., une faible différence d'altitude entre la première électrode et la 19^{ème} électrode sur le profil fictif). Dans une deuxième étape, ces 16 pseudo-sections ont été inversées séparément avec le logiciel RES2DInv. Dans une troisième étape, les 16 sections inversées ont été superposées en moyennant les résistivités interprétées obtenues afin d'obtenir une image électrique globale (i.e., la section finale de résistivités interprétées du profil circulaire présentée dans le papier) (Figure I.33).

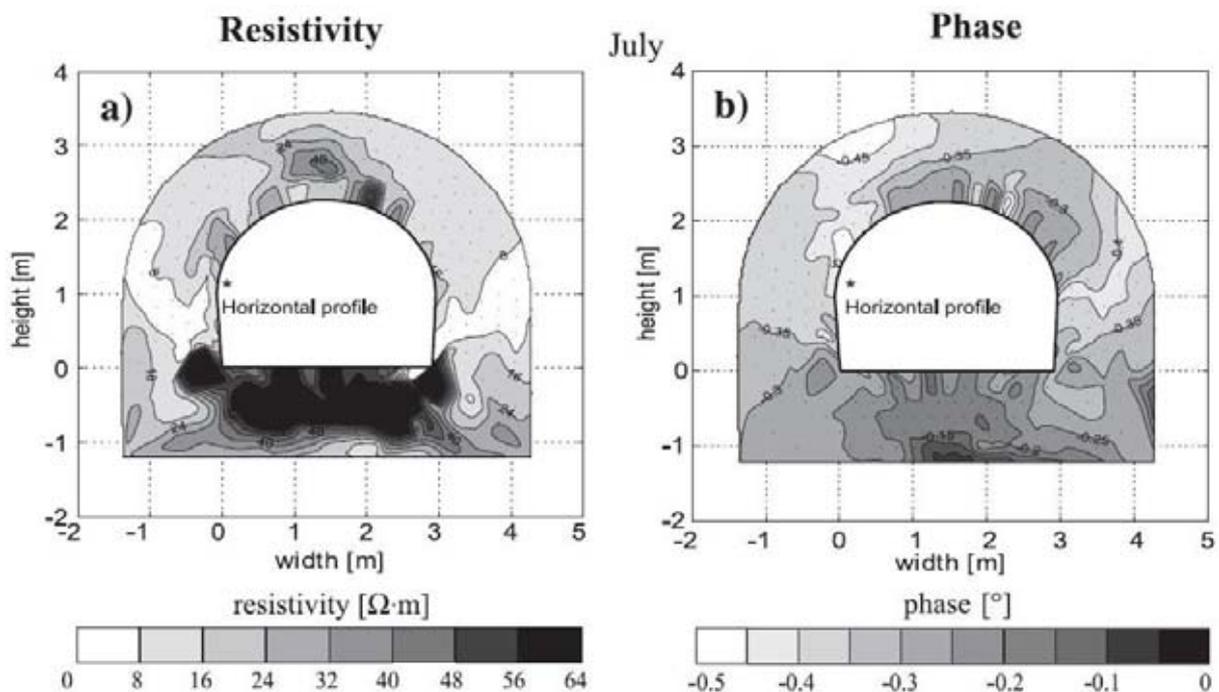


Figure I.33. (a) Sections de résistivités interprétées ($\Omega \cdot m$) (b) et de phases ($^{\circ}$) à 1 Hz (anneau 1 ; acquisition en juillet 2004 Kruschwitz & Yaramanci, 2004). Il convient de souligner que le radier de la galerie a été couvert d'un revêtement en béton d'environ 70 cm d'épaisseur (zone de résistivités élevées sous le radier en a). Les valeurs des résistivités du béton (supérieures à 64 $\Omega \cdot m$) ont été « écrêtées » dans la section.

Les erreurs RMS obtenues finalement sur la résistivité et sur la phase furent comprises respectivement dans la gamme [5-8] % et [0,04-0,07] %. Les tomographies ainsi obtenues ont montré (**Figure I.33**) :

- Une zone qualifiée de saine sur les parements (parois verticales) et sur le radier car présentant des valeurs de résistivités plutôt faibles, comprises entre [8 et 16 Ω .m]. Cette zone a été associée à des valeurs de phase de l'ordre de [-0,4] ° (~15 mrad).
- Une EDZ localisée au plafond de la galerie. Cette zone se caractérisa par des valeurs plus fortes de résistivité dans la gamme [16-60 Ω .m] et des valeurs de phase dans la gamme [-0,2 et -0,3] °. Les valeurs de résistivités plus élevées dans cette zone associées à des valeurs plutôt faibles de la phase ont été interprétées comme des résultantes de la décompression mécanique des terrains et de la désaturation de la roche. L'extension de l'EDZ au plafond a été estimée de l'ordre de 1 m sur la base des images électriques.

Les anomalies de la phase se sont organisées de manière dissymétrique par rapport à l'axe de la galerie : les auteurs ont observé que dans la partie SW du plafond (à droite, N°1 sur la **Figure I.33**), les valeurs de phases furent beaucoup plus faibles que dans la partie NE. Pour expliquer cette caractéristique, les auteurs ont invoqué un mécanisme de rupture complexe guidé par l'orientation anisotrope des particules argileuses et donc par la stratigraphie du site (**Figure I.34**). Il convient ici de souligner que cette tendance (i.e., baisse de la phase avec la fracturation) semble contredire les résultats obtenus au laboratoire par [Cosenza et al. \(2007\)](#) qui avaient observé une augmentation de la phase avec la microfracturation de l'argilite.

Par ailleurs, le suivi mené de juin à septembre a mis en évidence une augmentation des valeurs de résistivité dans la zone SW du plafond et une baisse de résistivité au parement. L'augmentation de la résistivité a été interprétée comme une augmentation de la désaturation accompagnée d'une fracturation probable de la roche. La baisse de résistivité au parement a été associée à une baisse de la porosité de la roche consécutive de la redistribution des contraintes lors du processus de fracturation différée du plafond. Au cours de ce suivi, la phase n'a pas varié significativement.

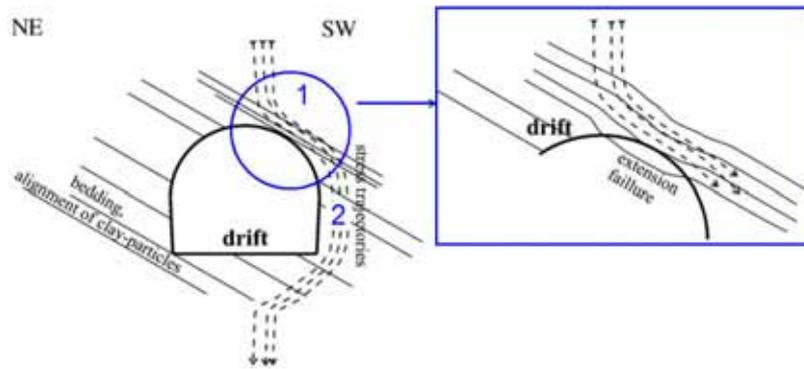


Figure I.34. Schéma explicatif du processus de fracturation dans la galerie 04 du laboratoire de Mont Terri. (Kruschwitz & Yaramanci, 2004).

Les travaux de Suzuki *et al.* (2004) ont été publiés de manière concomitante à ceux de Kruschwitz & Yaramanci, (2004). Toutefois, ils n'ont pas concerné directement l'utilisation de la Polarisation Provoquée en galerie. Plus précisément, Suzuki *et al.* (2004) ont réalisé des tomographies de résistivité et des tomographies sismiques, toutes les deux effectuées à partir des parois d'un tunnel circulaire afin d'en caractériser la zone endommagée. Le tunnel se trouvait à 500 m de profondeur et a été excavée dans des roches sédimentaires crétacées contenant des marnes.

On ne présentera ici que les résultats d'un suivi par tomographie électrique mis en œuvre sur un profil circulaire localisé dans une roche sédimentaire du tunnel contenant du schiste. Ce suivi électrique a été assuré suivant trois dates : un an, deux ans et trois ans après l'excavation du tunnel.

Le profil circulaire possédait 25 électrodes impolarisables (Oyo Co.) espacées d'environ 25 cm. Les mesures ont été réalisées à l'aide de l'appareil McOhm-21 (Oyo Co.) (courant alternatif de 2,5 Hz) suivant un dispositif dipôle-dipôle. L'inversion des données a été réalisée en 2D à partir d'un code numérique basé sur une technique d'optimisation de type moindres carrées (Sasaki, 1988 ; 1992). Cet outil numérique non commercial permet de prendre en compte explicitement une topographie élevée du profil d'électrodes (le diamètre du tunnel étant égal à 2,6 m).

Leurs résultats ont montré une zone d'extension métrique de plus faibles résistivités en paroi de la galerie (en rouge sur la **Figure I.35a**) un an après l'excavation. Cette zone de faibles valeurs de résistivité a été interprétée comme la conséquence de l'augmentation de la salinité de l'eau porale associée à la désaturation de la roche en paroi de l'ouvrage. Cette hypothèse a été validée par des mesures de la résistivité de l'eau porale qui s'est montrée plus faible au cours du temps. L'extension d'une zone fortement désaturée en paroi de la

galerie a été estimée de l'ordre de 30 cm sur la base de mesures dans le forage *Bor1* de perméabilité et d'un taux d'évaporation mesurée.

D'une manière générale, on notera la gamme de fortes valeurs de résistivités interprétées (loin et proches de la galerie), i.e. [400 - 63 000] $\Omega \cdot m$, comparativement à la gamme de résistivités attendue pour une formation argileuse (valeurs typiquement inférieures à 100 $\Omega \cdot m$).

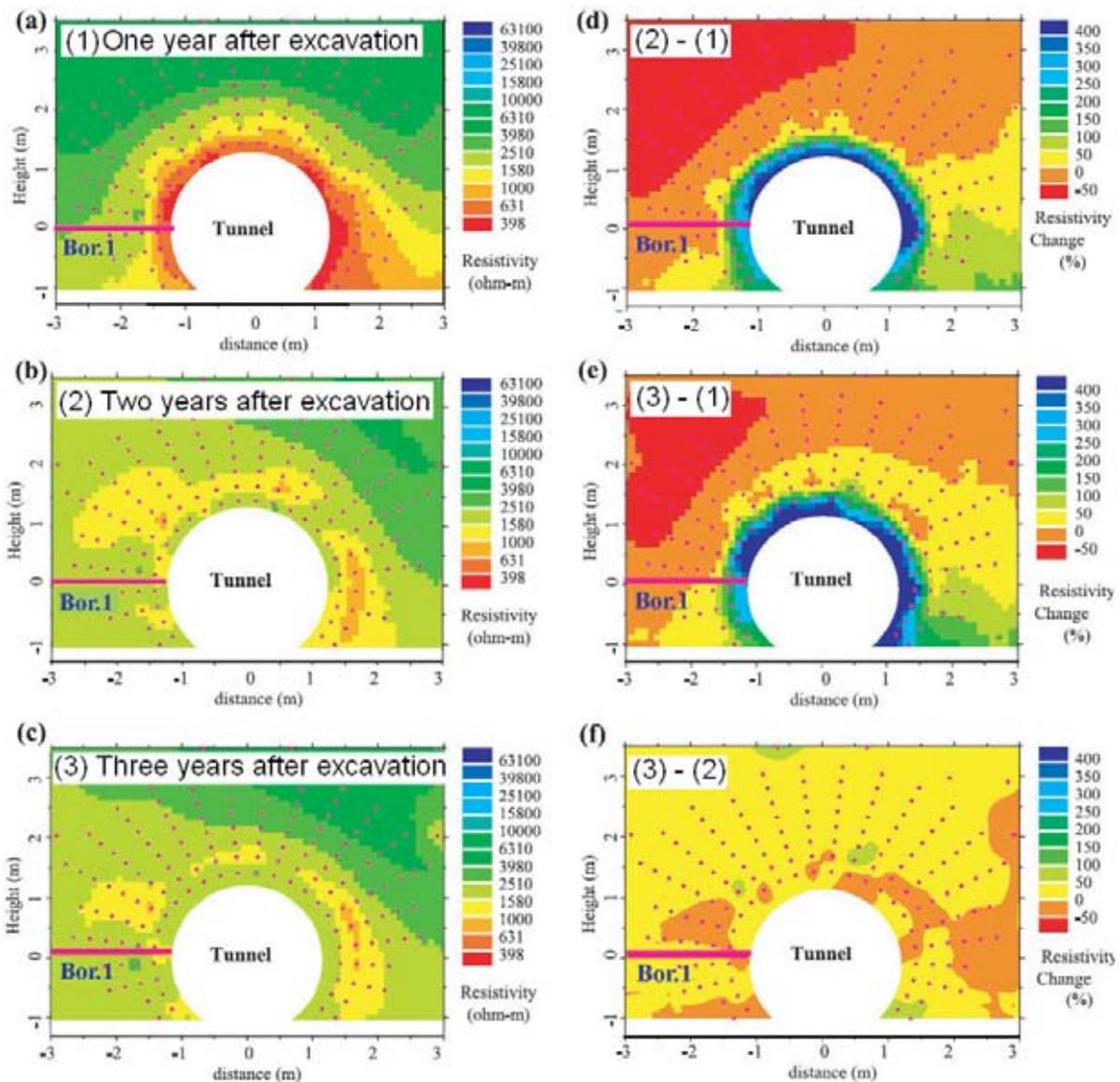


Figure I.35. Les sections de résistivités inversées. (a) un an après l'excavation, (b) deux ans après l'excavation, (c) trois ans après l'excavation, (d) section de différence de résistivités inversées entre 2 et 1 ans, (e) section de différence de résistivités inversées entre 3 et 1 ans, (f) section de différence de résistivités inversées entre 3 et 2 ans. La différence de résistivités inversées est calculée à partir de la résistivité mesurée à 2 ou 3 ans après l'excavation soustrait par celle mesurée à 1 ans après l'excavation normalisée par cette dernière ($\Delta\rho = (\rho_{(2,3)} - \rho_{(1)}) / \rho_{(1)}$) pour les cas (d) et (e), $\Delta\rho = (\rho_{(3)} - \rho_{(2)}) / \rho_{(1)}$ pour le cas (f) (Bor.1 : Forage horizontal creusé afin de réaliser des mesures de diagraphies électriques en parallèle) (Suzuki et al., 2004).

La zone de plus faibles résistivités observée près de la paroi du tunnel un an après l'excavation a progressivement disparu deux et trois ans après l'excavation. *A contrario*, les valeurs résistivités interprétées en champ lointain (loin de la paroi de la galerie) ont diminué deux et trois ans après l'excavation. Ce processus général d'homogénéisation des résistivités observé sur 2 années a été attribué un drainage (écoulement de l'eau interstitielle) à l'échelle du prospect qui aurait contribué notamment à l'augmentation de la saturation en eau de la roche en paroi de l'ouvrage et donc à l'augmentation locale de la résistivité observée.

Comparativement aux travaux de [Suzuki et al. \(2004\)](#), l'originalité de l'approche de [Gibert et al. \(2006\)](#) a consisté à effectuer un suivi par tomographie électrique *pendant l'excavation* d'une galerie. Comme dans les travaux de [Kruschwitz & Yaramanci \(2004\)](#), les mesures de tomographies électriques ont été réalisées dans la galerie 04 du laboratoire souterrain de Mont Terri. Le dispositif du suivi était constitué de trois profils circulaires distants de 0,5 m, 1 m et 4 m du front de la galerie (**Figure I.36**) et d'un profil horizontal en paroi à 1,1 m de hauteur au dessus du radier. Chaque profil circulaire possédait 32 électrodes avec un espacement angulaire constant (soit un espacement inter-électrode de l'ordre de 55 cm). Quant au profil horizontal, les auteurs ont utilisé 17 électrodes avec un espacement de 50 cm. Ces valeurs de distances inter-électrodes apparaissent plutôt élevées pour imaginer avec une bonne résolution l'EDZ d'extension souvent métrique.

La galerie possédant un revêtement en béton, il a fallu percer celui-ci pour atteindre la roche et mettre en place les électrodes. Des micro-forages de 16 mm de diamètre dans la partie bétonnée et de 8 mm de diamètre dans la roche, jusqu'à une profondeur de 5 cm, ont été réalisés. La partie des électrodes en acier inoxydable en contact avec la couche de béton a été isolée électriquement avec un scotch isolant. Ensuite, une résine époxy a été injectée dans les microforages, depuis la paroi bétonnée, afin de stabiliser et protéger les électrodes.

Les mesures ont été répétées 6 fois au cours de l'excavation en gardant les électrodes sur place (**Tableau I.5**). Le **Tableau I.5** illustre également les difficultés rencontrées lorsqu'une excavation et un suivi géophysique sont réalisés de manière concomitante (sectionnement des flûtes lors de l'excavation).

Tableau I.5. Calendrier des opérations liées à l'excavation et aux mesures électriques dans l'expérimentation de Gibert et al. (2006).

	Juillet 2004	Septembre 2004	Octobre 2004	Novembre 2004	Décembre 2004	Janvier 2005
Opérations liées à l'excavation	Excavation de 20 m	Redémarrage de l'excavation	Excavation continue	Fin de l'excavation	Veille du début du creusement des niches EZ-B et HG-A à voisinage	Après l'excavation des niches EZ-B et HG-A à voisinage
Planning et opérations liées aux mesures	Mesures à la fin de l'excavation durant quelques jours.	Mesures durant 3 semaines après le redémarrage de l'excavation	Mesures	Réparation des électrodes	Réparation des électrodes + Mesure	Mesures

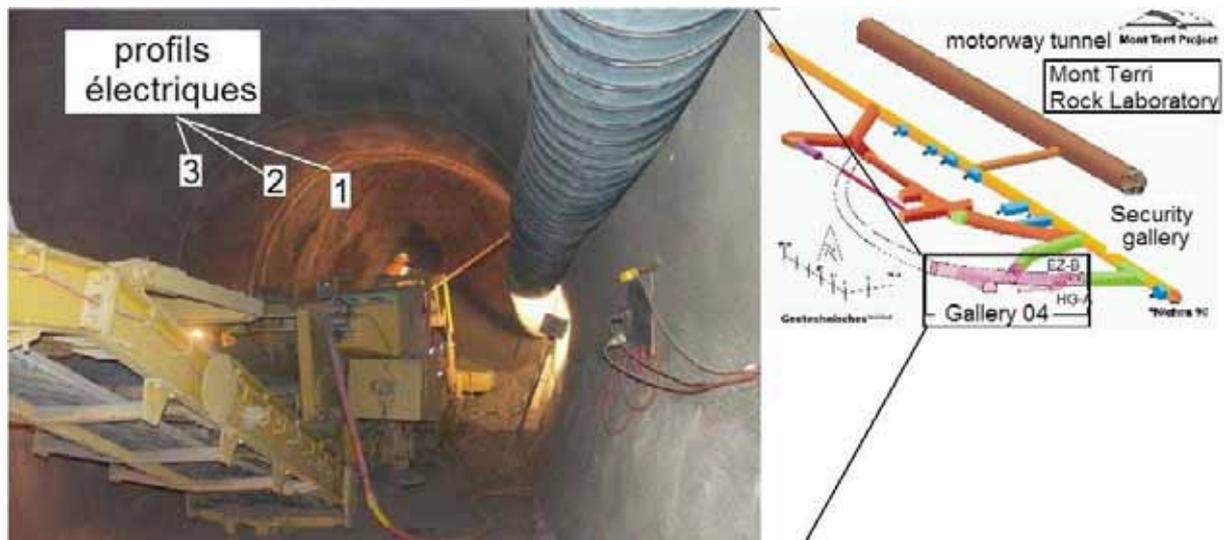


Figure I.36. A gauche : creusement de la galerie 04 et les profils électriques circulaires installés (profil horizontal sur la paroi ne figure pas sur la photo), A droite : plan de position de la galerie 04 dans le laboratoire du Mont Terri Gibert et al. (2006).

Afin de présenter les pseudo-sections de résistivité électrique, le calcul des coefficients géométriques a été effectué à partir d'une modélisation numérique aux différences finies pour une géométrie cylindrique (géométrie dite à 2.5 D). Les auteurs ont supposé que la galerie avait une géométrie circulaire alors qu'en réalité celle-ci avait une forme en « fer à cheval ».

Les données de résistivités apparentes n'ont pas été inversées de manière classique : les sections ou modèles de résistivités interprétées ont été obtenues par modélisation directe suivant un schéma itératif de type « essai-erreur » (**Figure I.37**). Cette modélisation a permis de mettre en évidence au cours de ce suivi des variations de résistivités de [6 Ω .m] dans la

zone saine, et de $[45 \Omega \cdot \text{m}]$ pour la zone fortement endommagée. Comme dans les travaux de [Kruschwitz & Yaramanci \(2004\)](#), les auteurs ont confirmé le rôle important des structures tectoniques préexistantes et de la stratification particulière du site dans le processus d'endommagement de la paroi de galerie (**Figure I.34**).

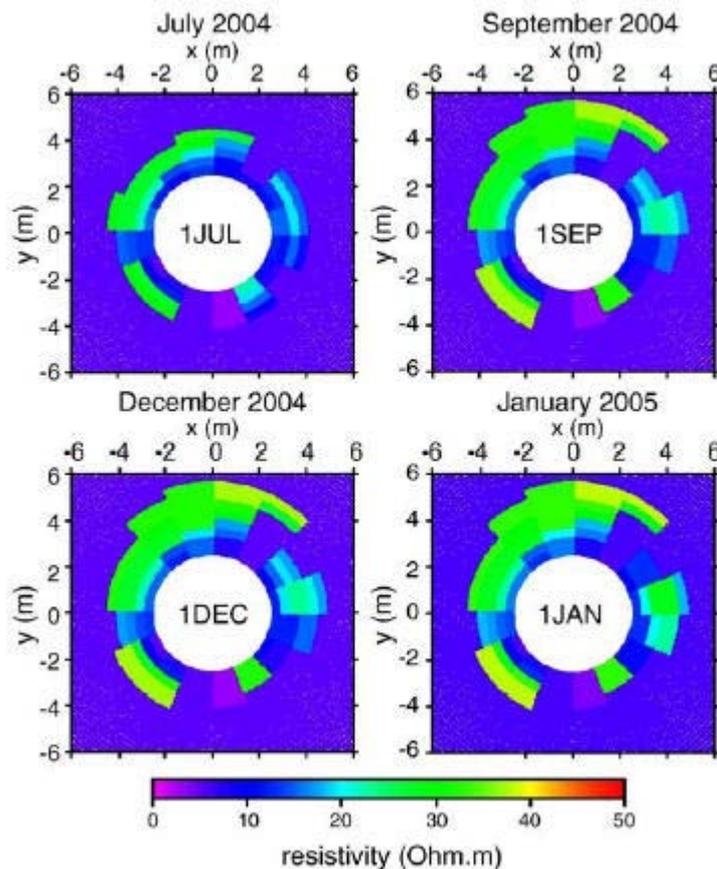


Figure I.37. Sections de résistivités interprétées de la galerie 04 ([Gibert et al., 2006](#)).

Les travaux de [Mayor et al. \(2007\)](#) réalisés également sur le site du Mont Terri ne visaient pas directement la caractérisation de l'EDZ d'un ouvrage souterrain. Les résultats obtenus sont néanmoins intéressants à présenter ici car les auteurs ont utilisé la tomographie électrique pour imager la zone désaturée en paroi d'un micro-tunnel.

Plus précisément, ces travaux visaient à étudier *in situ* le processus de désaturation d'une formation argileuse induit par une circulation d'air à différentes humidités relatives (HR). Cette expérimentation conduite sur une période d'environ 7,5 mois a été réalisée à partir d'un micro-tunnel de 1,3 m de diamètre et de 10 m de long, équipé de piézomètres, d'hygromètres, d'extensomètres et enfin d'électrodes pour les tomographies électriques. L'air à humidité relative et température contrôlées a été injecté à l'aide de deux pompes situées à chaque extrémité du micro-tunnel.

Les tomographies de résistivité électrique dans cette étude visaient à assurer un suivi indirect de la teneur en eau de la roche. Ce suivi électrique a été effectué grâce à quatre micro-forages supplémentaires, de 30 mm de diamètre et de 1 m de longueur, forés radialement dans un plan perpendiculaire à l'axe du micro-tunnel. Ces quatre micro-forages, percés depuis un quart de la circonférence du micro-tunnel, ont été équipés chacun de 20 électrodes espacées de 5 cm (**Figure I.38a**). Au total, il s'est donc trouvé 80 électrodes dans les quatre micro-forages et 19 électrodes supplémentaires placées directement sur la paroi du micro-tunnel. D'un point de vue méthodologique, la conception et la mise en place des électrodes des micro-forages ont constitué une originalité forte de ce travail. Les électrodes en acier de 5 mm de diamètre ont été fixées sur la paroi d'une moitié de tube en plastique qui a été introduite dans le micro-forage correspondant (**Figure I.39**). Les câbles de chaque électrode ont été scellés dans la même moitié de tube par une résine de silicone et relié à un boîtier fixé en paroi du micro-tunnel. Les électrodes ont été mises en contact avec la paroi du micro-forage en remplissant le même micro-forage d'une poudre compactée de roches issue de la phase forage.

L'expérimentation de désaturation a été réalisée en deux phases. Dans un premier temps, l'HR a été imposée égale à 30 % durant 2 mois. Dans un deuxième temps, HR a été fixée à 1-3 % pendant 5 mois. Ensuite pendant 3 mois, la resaturation de la roche a été opérée par la ventilation d'un air à l'humidité relative proche de 100 %. Cette expérimentation a été réalisée en condition isotherme ($T \approx 15-16 \text{ }^\circ\text{C}$).

Sur la **Figure I.38**, les sections de résistivité inversées obtenues lors des différents périodes de l'expérimentation sont présentées : **(a)** section avant le test de ventilation, **(b)** section à 18 jours, lors de la première phase de désaturation (HR=30 %), **(c et d)** sections acquises à 2 et 5 mois, lors de la deuxième phase de désaturation (HR=1-3 %), **(e)** section acquise lors de la phase de resaturation (HR proche de 100 %), **(f)** section à 2 mois après la fin de resaturation.

En avril avant la ventilation (**Figure I.38a**), la roche a présenté des résistivités homogènes dans la gamme $[6-25] \Omega \cdot \text{m}$ qui correspondent à l'argilite saturée. Les zones de résistivités élevées (en rouge) et de résistivités faibles (en bleu) sur la **Figure I.38a** sont interprétées comme des artefacts de mesure dus à un mauvais contact électrique entre les électrodes et la roche. Ce problème expérimental a d'ailleurs conduit les auteurs à diminuer la longueur des profils d'électrodes (remarquer la différence de surface investiguée entre la **Figures I.38a** et **I.38b**).

Lors de la période de désaturation la plus sévère (HR=1-3 %) (**Figures I.38c-38d**), les valeurs de résistivité ont augmenté de manière drastique comparativement aux valeurs obtenues dans la phase de désaturation précédente (HR=30 %) (**Figure I.38b**). A partir de ces résultats, les auteurs ont estimé l'extension de la zone désaturée dans la gamme [40-50] cm.

Lorsque la phase de resaturation a débuté (HR proche de 100 %), les résistivités ont commencé à diminuer (**Figure I.38e**). Finalement, après l'arrêt de la ventilation, les auteurs ont observé de nouveau une augmentation des valeurs de résistivités (**Figure I.38f**) qui a été interprétée comme une nouvelle désaturation de la roche.

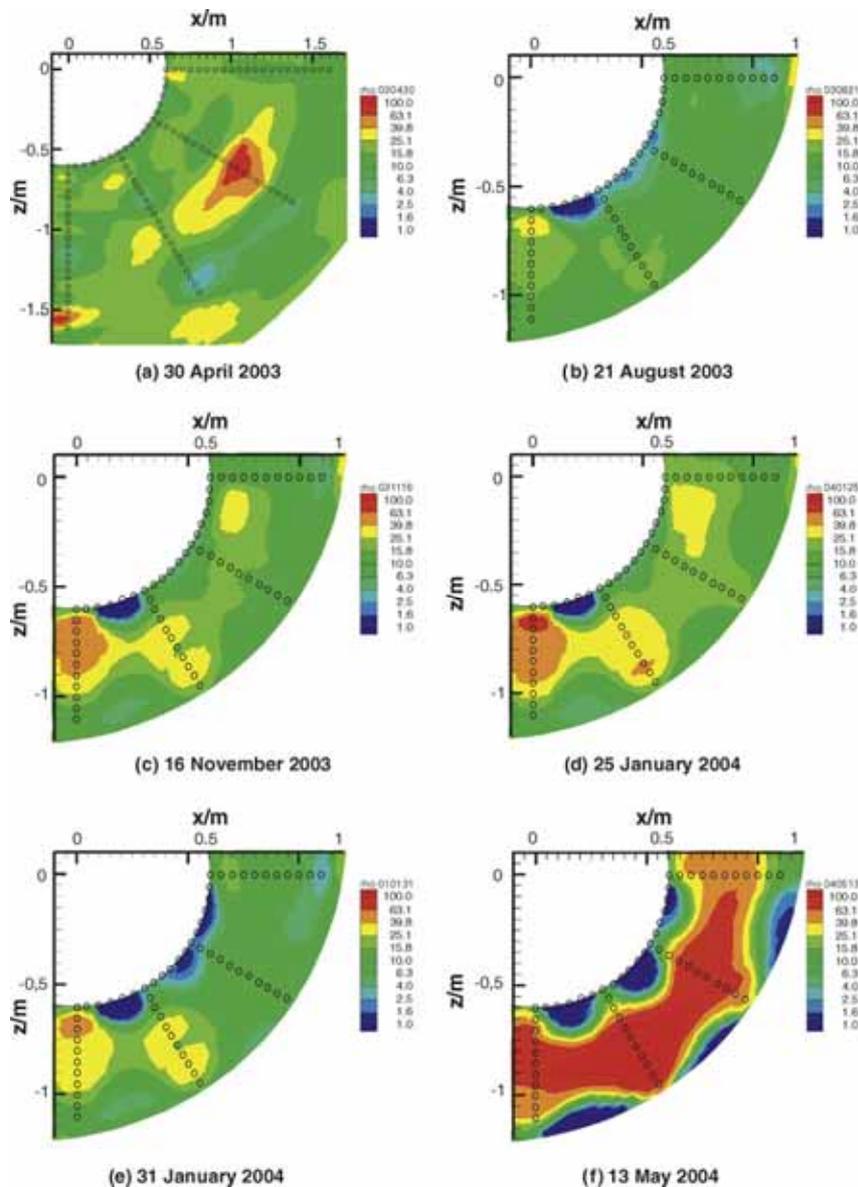


Figure I.38. Sections de résistivité inversées obtenus lors de l'expérimentation de ventilation au laboratoire de Mont Terri (Mayor et al., 2007). On distingue les quatre micro-forages radiaux dessinés avec des petits cercles. Chaque petit cercle correspond à une électrode.

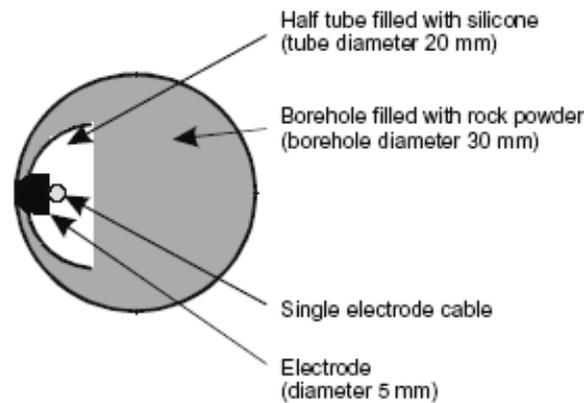


Figure I.39. Section d'un micro-forage possédant une électrode (Mayor *et al.*, 2007).

Sur le même site du Mont Terri, dans une étude récente, Nicollin *et al.* (2010) ont investigué l'anisotropie de la résistivité électrique dans l'EDZ localisée en front de la galerie 04. Les données ont été acquises en combinant d'une part, des dispositifs « carré » disposés sur 18 zones du front de la galerie et d'autre part, deux forages perpendiculaires au front de la galerie. Afin d'obtenir le tenseur de résistivité (tenseur symétrique d'ordre 2), chaque série de données a été inversée suivant une stratégie d'inversion basée sur une approche bayésienne couplée à une méthode de type Monte Carlo non linéaire.

Les résultats de l'inversion ont montré que le front de la galerie pouvait être divisé en deux zones séparées par une faille tectonique, montrant des résistivités très différentes (**Figure I.40**) mais avec une anisotropie identique. La direction du maximum de résistivité a été trouvée perpendiculaire à la stratification, et la direction du minimum de résistivité était contenue dans le plan du front. Ces résultats ont confirmé : (a) les résultats de Cosenza *et al.* (2007) obtenus au laboratoire sur l'anisotropie des propriétés électriques de l'argilite et (b) les résultats des travaux précédents obtenus sur ce site (Kruschwitz & Yaramanci, 2004 ; Gibert *et al.*, 2006) : l'organisation spatiale des résistivités dans l'EDZ est bien contrôlée par les structures tectoniques préexistantes, la stratigraphie du site et le processus de fracturation associé à l'excavation de la galerie.

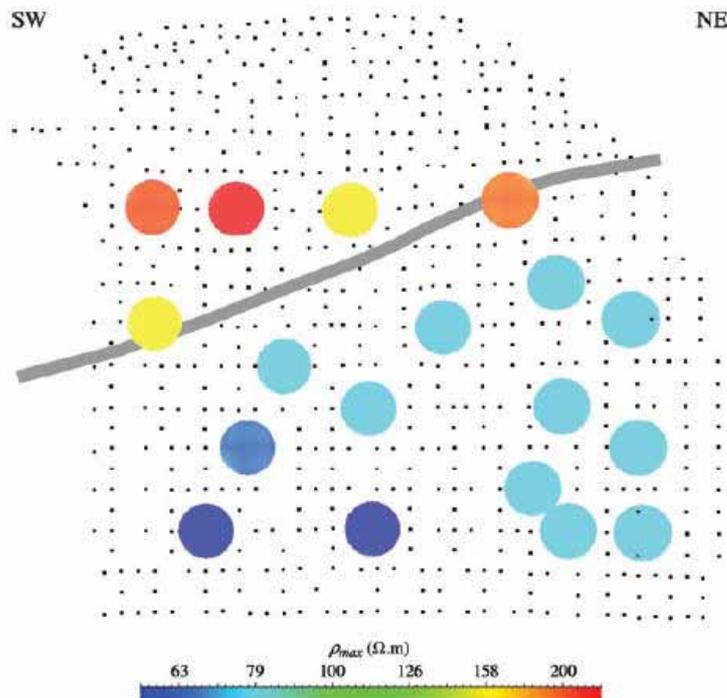


Figure I.40. Valeurs maximales du tenseur de résistivité obtenues par inversion des données acquises sur 18 zones du front de la galerie (Nicollin et al., 2010). La faille tectonique sur le front est indiquée en gris.

1.7.3. Synthèse et conclusion

Le **Tableau I.6** récapitule les principales caractéristiques des expérimentations menées en galerie dans l'objectif de caractériser d'une manière géoélectrique l'EDZ. Il ressort de ce tableau les éléments positifs suivants : (1) les méthodes géoélectriques sont performantes pour imaginer la zone désaturée en paroi, (2) ces investigations ont mis en évidence de bonnes corrélations entre des anomalies électriques et des structures tectoniques préexistantes, (3) les campagnes de suivi ont montré que la résistivité électrique était sensible à un processus de fracturation. Toutefois, le **Tableau I.6** met également en lumière les lacunes et les difficultés suivantes :

- *Il n'existe pas d'expérimentation exhaustive ayant été menée en galerie et utilisant la PP à la fois dans le domaine temporel et dans le domaine spectral.* Les expérimentations PP de Kruschwitz & Yaramanci (2004) n'ont utilisé qu'une seule fréquence (i.e., 1 Hz). Ce manque tient probablement aux difficultés métrologiques que pose l'utilisation de la méthode PP sur le terrain (**voir section 1.6**).
- Sur les six expérimentations présentées ici : cinq ont été menées sur *un seul site* (i.e. le laboratoire du Mont Terri). *Dans quelles mesures peut-on extrapoler les résultats obtenus à d'autres sites ?*

- Le choix de la configuration d'électrodes (dipôle-dipôle pour [Suzuki et al., 2004](#)), (Wenner pour [Kruschwitz & Yaramanci, 2004](#) et [Gibert et al., 2006](#)), carré pour [\(Nicollin et al., 2010\)](#) est rarement justifié. Dans le contexte particulier d'une prospection en galerie souterraine, une étude exhaustive sur l'influence de ce paramètre d'acquisition manque.
- Il n'existe pas de codes numériques disponibles pour l'inversion de données PP acquises en galerie. Dans ces études, chaque équipe a développé sa propre stratégie d'inversion. Cette spécificité n'existe pas pour les prospections menées à la surface d'un sol pour lesquelles le logiciel commercial RES2DInv est utilisé massivement. pour l'inversion des données.
- La grande majorité des galeries souterraines possède un revêtement en béton. Cet aspect n'est pas pris en compte dans les études présentées. Autrement dit, *est-ce que les performances mises en évidence dans ces travaux demeurent en présence d'un revêtement en béton ?*

Tableau I.6. Tableau récapitulatif des expérimentations réalisées.

Référence	Problématique	Propriétés électriques inversées	Points forts	Points faibles
Kruschwitz & Yaramanci (2004)	Caractérisation de l'EDZ par tomographie PP	Résistivité et Phase à 1 Hz	<ul style="list-style-type: none"> - Corrélation entre les anomalies électriques et la stratigraphie du site - Mise en évidence du rôle important des structures tectoniques préexistantes et de la stratification particulière dans le processus d'endommagement 	<ul style="list-style-type: none"> - L'ensemble des spectres d'amplitude et de phase n'est pas exploités. - Inversion qui prend partiellement en compte la géométrie de la galerie.
Suzuki et al. (2004)	Caractérisation de l'EDZ par tomographie électrique	Résistivité	<ul style="list-style-type: none"> - Suivi sur trois années. - Utilisation d'un code d'inversion adapté à la géométrie de la galerie. 	<ul style="list-style-type: none"> - Roches probablement peu argileuses. - Une seule configuration d'électrodes testée (ici dipôle-dipôle).
Gibert et al. (2006)	Caractérisation et suivi de l'EDZ par tomographie électrique	Résistivité	<ul style="list-style-type: none"> - Suivi en cours d'excavation sur plusieurs mois. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pseudo-inversion de type « essai-erreur ». - Faible résolution des images électrique en paroi (distances inter-électrodes comprises entre 50 et 55 cm). - Une seule configuration d'électrodes testée (ici Wenner-α).
Mayor et al. (2007)	Caractérisation de la zone désaturée en paroi par tomographie électrique	Résistivité	<ul style="list-style-type: none"> - Suivi sur presque un an. - La tomographie électrique est capable de mettre en évidence la zone désaturée. 	<ul style="list-style-type: none"> - Réalisation de micro-forages (destructifs par nature). - Dimensions du micro-tunnel plus petites qu'un ouvrage réel.
Nicollin et al. (2010)	Caractérisation de l'EDZ en paroi d'un front de galerie par tomographie électrique	Tenseur de résistivité	<ul style="list-style-type: none"> - Inversion du tenseur de résistivité. - Mise en évidence <i>in situ</i> du caractère fortement anisotrope de la résistivité électrique d'une roche argileuse. 	<ul style="list-style-type: none"> - L'extension de l'EDZ dans la roche n'est pas discutée.

Conclusion

L'étude bibliographique conduite dans ce chapitre a montré que les propriétés électriques obtenues par la méthode PP offraient de bonnes corrélations avec des propriétés pétrophysiques (surface spécifique, porosité de fissures), (micro)structurales (tailles de grains/pores) et hydriques (degré de saturation, conductivité hydraulique) des géomatériaux. L'apport de la méthode PP, en extension de la méthode de résistivité électrique, apparaît donc justifié pour des applications environnementales, et particulièrement pour la caractérisation de l'EDZ, surtout en présence de roches contenant de l'argile. En effet, au contact d'une solution aqueuse et en présence d'hétérogénéités, les propriétés électriques particulières attachées à l'argile sont exacerbées et la méthode PPS apparaît alors très prometteuse pour comprendre les modifications microstructurales et hydriques associées à l'EDZ. Toutefois, notre étude bibliographique a également mis en évidence deux ensembles de lacunes que nous voudrions en partie comblées au cours ce travail de thèse.

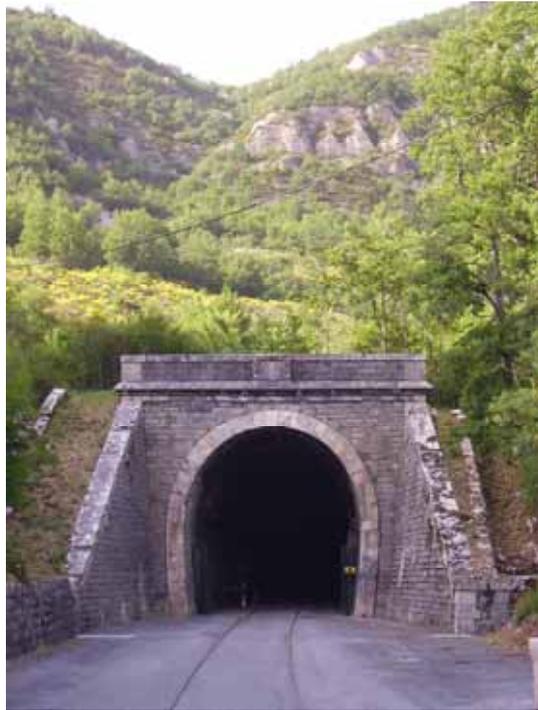
Le premier ensemble de lacunes est de nature méthodologique. L'état de l'art dressé ici a montré que les applications de la méthode PP en galerie souterraine étaient très limitées. A notre connaissance, il n'existe dans la littérature qu'une seule investigation expérimentale sur la caractérisation *in situ* de l'EDZ par la méthode PP. Cette étude conduite par [Kruschwitz & Yaramanci \(2004\)](#) sur le site du Mont-Terri en Suisse est loin d'être exhaustive : une seule fréquence (i.e., 1 Hz) en PPS a été utilisée ; les effets de la désaturation sur la phase ne sont pas significatifs ; la méthode n'a pas été testée dans le domaine temporel ; l'effet de la configuration des électrodes n'a pas été étudié ; l'influence d'un revêtement en béton n'a pas été discutée.

Dans ce contexte, la méthode PP dans les domaines temporel et spectral est proposée pour la caractérisation de l'EDZ dans la station expérimentale souterraine de Tournemire (*Aveyron, France*). Les travaux menés à Tournemire font l'objet du **chapitre 2** de ce mémoire.

Le deuxième ensemble de lacunes mis en lumière par notre étude bibliographique est de nature théorique. La caractérisation des milieux hétérogènes, surtout en présence d'argile, est très délicate puisque le signal PP obtenu correspond à la superposition de la réponse de différents mécanismes physiques de polarisation. A l'heure actuelle, il n'existe pas d'approche théorique permettant de discriminer sans ambiguïté l'ensemble des processus de polarisation dans un géomatériau argileux. [Leroy & Revil \(2009\)](#), dans un travail théorique, le plus récent en la matière, soulignent ainsi que la modélisation du couplage de tous les processus de polarisation avec notamment la polarisation dite de membrane est encore un objectif non encore atteint aujourd'hui. Nous sommes convaincus que la discrimination de ces différents

processus de polarisation ne pourra être résolue qu'en combinant des travaux phénoménologiques sur des systèmes-modèles, en conditions contrôlées, et des modèles micro-macro rigoureux.

Dans ce contexte, notre contribution sera essentiellement expérimentale. Nous avons mené des mesures expérimentales en laboratoire afin d'étudier la phénoménologie du signal PP et l'influence des paramètres physico-chimiques (teneur en argile, ratio pondéral argile/sable, minéralogie des minéraux argileux, salinité de la solution porale) en conditions contrôlées. Les résultats de ces travaux, présentés dans le **chapitre 3** de ce mémoire constituent également une base de données pour tester les modèles micro-macro actuels et futurs.



Chapitre 2. Applications géoélectriques *in situ* dans la Station Expérimentale de Tournemire (Aveyron, France)

Introduction

L'étude bibliographique conduite dans le chapitre précédent a identifié les lacunes des expérimentations géoélectriques menées en galerie pour la caractérisation de l'EDZ. Elle a ainsi montré clairement qu'aucune campagne PP (dans le domaine temporel) exhaustive n'avait été réalisée pour cet objectif.

Nous présentons dans ce chapitre les travaux expérimentaux de nature géoélectrique effectués dans les galeries de la station expérimentale de Tournemire. Outre évidemment la caractérisation de l'EDZ des différents ouvrages du site, ces travaux visaient à apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- Quelle est la meilleure méthodologie PP (avantages/inconvénients des domaines temporel et spectral, géométrie des dispositifs, paramètres d'acquisition au sens large) pour cette caractérisation ?
- Est-ce que les méthodes géoélectriques sont adaptées pour un suivi temporel de la zone désaturée en paroi des ouvrages ?
- Peut-on mesurer des paramètres PP de la roche endommagée lorsqu'un parement en béton existe ?
- Est-ce que les EDZ des galeries d'âge différent caractérisées par la méthode PP présentent les mêmes caractéristiques géométriques et électriques ?

Ce chapitre comprend deux grandes parties. Dans une première partie, nous présentons le contexte géologique, géotechnique et géophysique de la station expérimentale de Tournemire. Plus particulièrement, nous montrons et discutons les résultats des études géophysiques antérieures menées sur le site pour la caractérisation de l'EDZ.

La deuxième partie de ce chapitre débute par une description de notre stratégie d'acquisition et sur la méthodologie générale que nous avons utilisé dans nos expériences. Puis nous présentons les résultats acquis dans les différentes galeries (Est-1996, Est-2003, et Nord-2008) du site. Nous montrons dans les sections suivantes : (a) les résultats obtenus par des petits dispositifs sur des hétérogénéités bien identifiées (fractures de différentes natures et nodules calcaires) et (b) un suivi temporel mis en œuvre dans la galerie Est-1996.

2.1. Contexte géologique

La station Expérimentale IRSN de Tournemire est située au Sud du Massif Central français (Sud Aveyron), à environ 25 km au sud de Millau, entre les communes de Tournemire, Roquefort sur Souzou et Saint Rome de Cernon (**Figure II.1**).

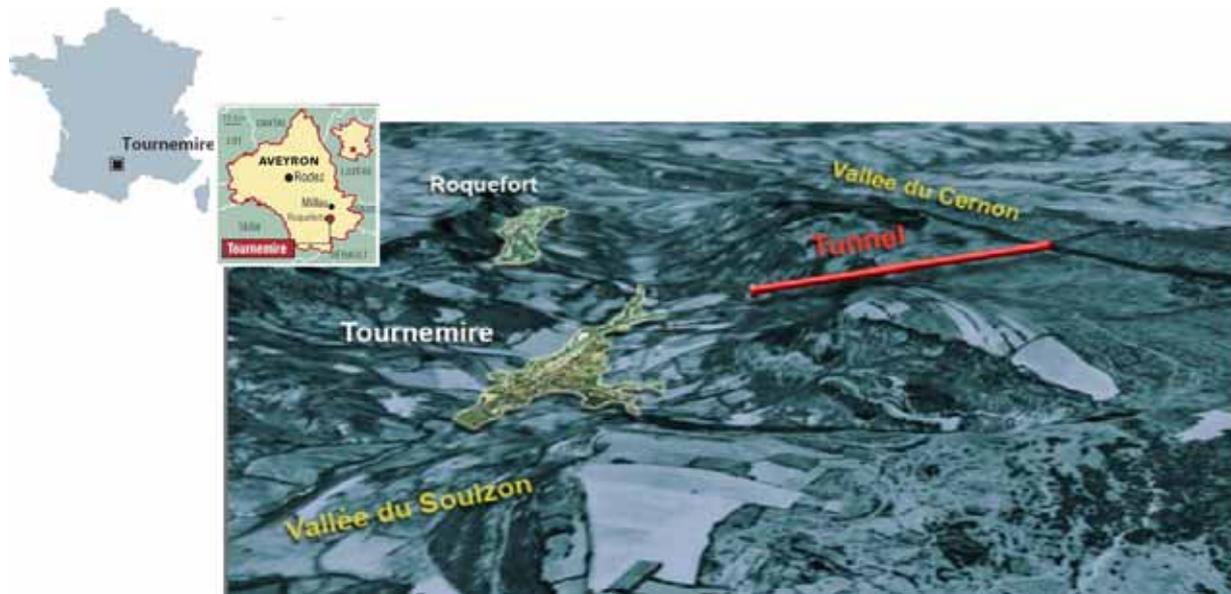


Figure II.1. Localisation de la Station Expérimentale de Tournemire. Le tunnel ferroviaire du site est indiqué en rouge (longueur 1885 m.)

Le massif de Tournemire appartient au grand ensemble des Causses, situé dans la partie sud-orientale du Massif Central (Dubois, 1985). Le contexte géologique du secteur de Tournemire est relativement simple et il constitue d'un bloc formé de couches sédimentaires subhorizontales avec un pendage d'environ 4-5 ° vers le Nord.

On peut identifier trois grands ensembles sédimentaires jurassiques d'origine marine (**Figure II.2**) :

- 1) une couche inférieure formée de roches calcaires et dolomies d'environ 300 m d'épaisseur (d'âge géologique Hettangien, Sinémurien, Carixien)
- 2) une couche intermédiaire argileuse (Domérien et Toarcien)
- 3) une couverture calcaire et dolomitique de plus de 300 m (Aalénien sup., Bajocien, Bathonien).

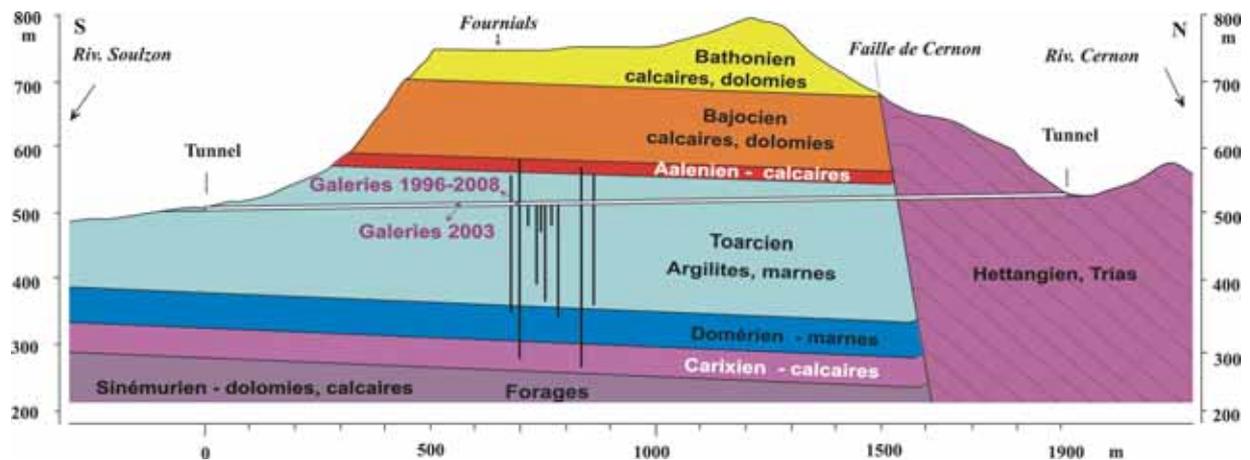


Figure II.2. Coupe géologique générale de la Station Expérimentale de Tournemire le long du tunnel (d'après IRSN, 2009).

La formation intermédiaire argileuse constitue la formation cible pour l'étude de la caractérisation du milieu argileux. Il s'agit d'argilites et de marnes jurassiques (Toarcien et Domérien). Cette formation, de 250 m d'épaisseur, s'est formée en domaine marin, il y a plus de 180 millions d'année et acquis les propriétés des argiles profondes lors de la diagénèse et l'enfouissement (Bonin, 1998).

A l'échelle des campagnes de mesures géophysiques effectuées dans le cadre de ce travail de thèse, en champ proche donc autour des ouvrages, notre caractérisation concerne plutôt la partie dite « Toarcien supérieur ». Cette série qui fait 160 m d'épaisseur, est formée principalement par les argilites et marnes. Par contre, le sommet du Toarcien supérieur présente de niveaux à nodules et bancs calcaires (Cabrera *et al.*, 2001).

Un tunnel ferroviaire d'une longueur de 1885 m, orienté approximativement Nord-Sud, traverse cette formation du Toarcien supérieur et y permet un accès direct. Plus précisément, ce tunnel traverse d'abord la formation argileuse d'âge Toarcien sur 1550 m jusqu'à la faille régionale du Cernon, puis les calcaires de l'Hettangien et du Trias (Figure II.2). L'entrée Sud se situe à la côte 507 m et le point le plus haut du plateau à l'aplomb du tunnel se situe vers 800 m.

Le massif de Tournemire est délimité par deux failles : la faille régionale de Cernon au Nord (80 km de long) et la faille locale de Tournemire à l'Est (11 km de long). Ces deux failles régionale et locale (plurikilométrique) sont les plus proches du site d'étude. Dans la station expérimentale, deux failles d'échelle hectométrique à kilométrique sont présentes de direction N-S environ et affectent la couche argileuse : une faille principale avec des zones de brèches et une faille secondaire avec une argilite broyée (Figure II.3). Des petites failles à l'échelle décimétrique et des microfissures d'origine tectonique sont présentes dans le milieu argileux. Elles se caractérisent par un remplissage de calcite. La plupart de ces failles sont

décrochantes (déplacement sub-horizontale) et inverses formées lors de la tectonique en compression de la phase pyrénéenne, il y a 40-50 millions d'années. Cette tectonique a structuré une grande partie la région. Quelques failles normales anciennes sont observées et correspondent à la tectonique en extension jurassique.

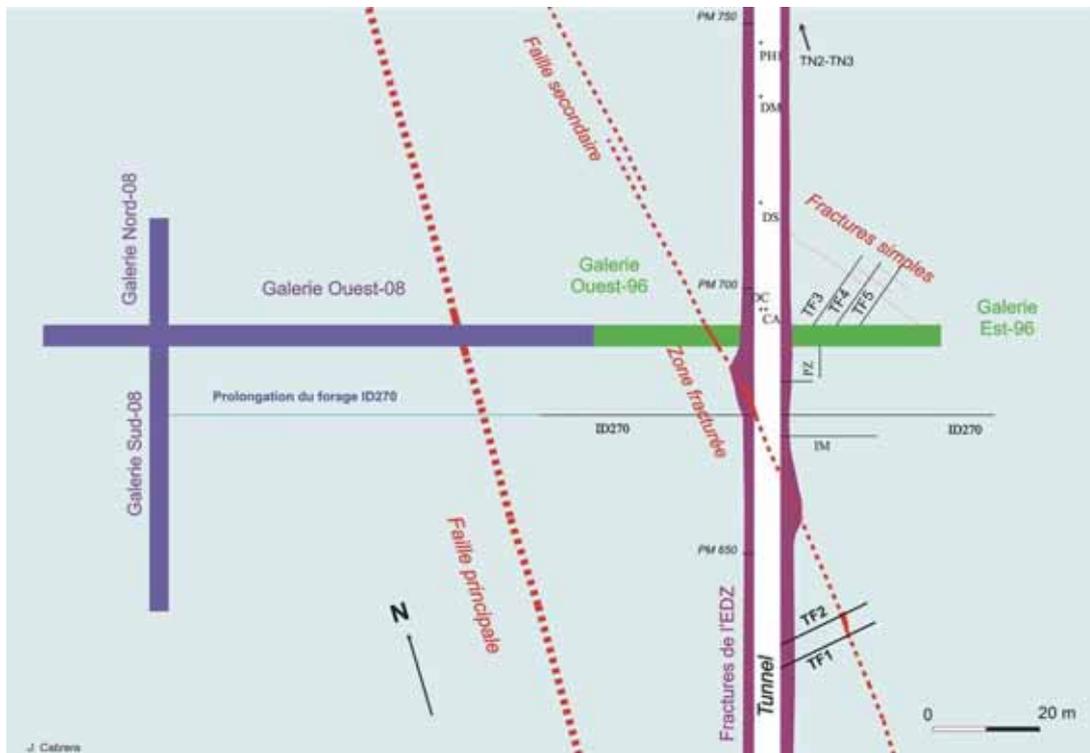


Figure II.3. Position des failles secondaire et principale à l'échelle du tunnel (d'après l'IRSN, 2009).

Dans la Station Expérimentale, en dehors de la fracturation naturelle d'origine tectonique, une fracturation artificielle d'échelle centimétrique à métrique est présente. Cette fracturation est liée aux travaux d'excavation et en général ne présente pas de remplissage.

Comme nous le verrons plus loin, le remplissage des failles d'origine tectonique va constituer un élément clé pour l'interprétation de nos données géophysiques. C'est pourquoi il nous ait apparu important, à ce stade, de procéder à un état des connaissances sur la minéralogie de ces remplissages de calcite.

Les premières études de ces calcites (Mathieu *et al.*, 2000) correspondent à la zone fracturée associée à la faille secondaire (Figure II.3). La section réalisée à l'aide des forages rayonnants de 1994 (Figure II.4) montre la position spatiale des échantillons acquis. Les échantillons prélevés correspondent à la zone dite saine à l'Est (en marron sur la Figure II.4A), à la zone fracturée associée à la faille secondaire (en jaune et bleu) et à la zone faillée (en vert).

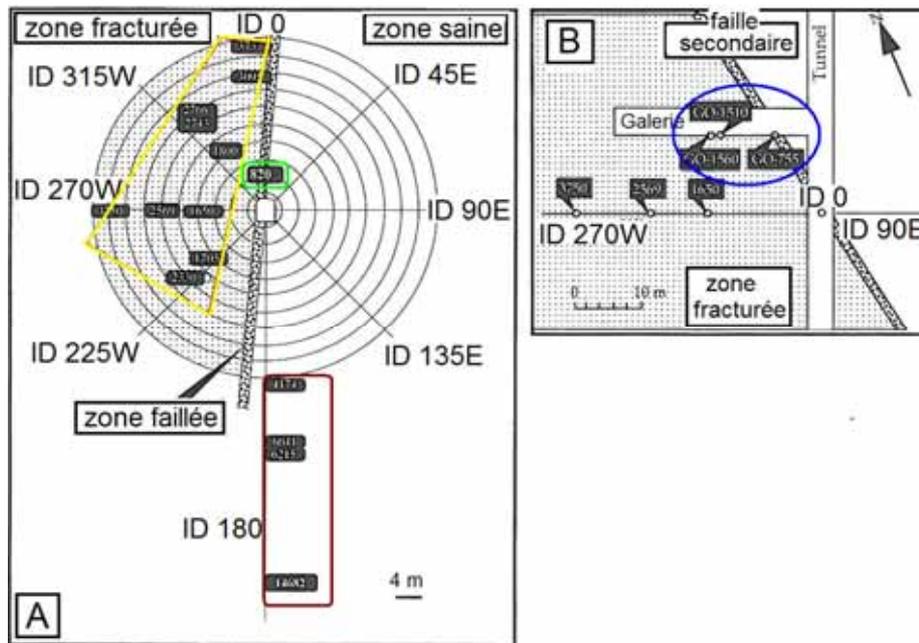


Figure II.4. Positions des échantillons de calcite acquis par Mathieu et al. (2000) (d'après Cabrera, 1995). (A) section verticale dans les forages ID 1994, (B) Plan de localisation dans la galerie Ouest (1996) (en marron : échantillons de la zone saine, en jaune et bleu : échantillons de la zone fracturée associée à la faille secondaire, en vert : échantillon de la zone faillée).

Cette étude a permis de mettre en évidence la cristallisation de quatre paragenèses minérales dans ces fractures à partir de circulations de fluides induites par l'activité tectonique pyrénéenne. Ces quatre paragenèses minérales correspondent à l'association des minéraux suivants : (i) calcite, (ii) calcite et pyrite framboïdale, (iii) calcite et pyrite cubique et (iiii) calcite et barytine (Figure II.5).

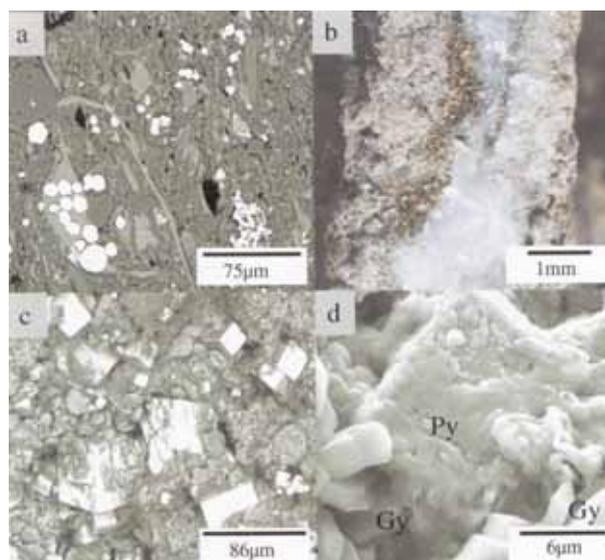


Figure II.5. (a) Framboïdes et cristaux cubiques de pyrite dispersés dans les lits argileux, framboïdes de pyrite incluses dans un bioclaste. (b) Pyrite dans une veine à calcite. (c) Cristaux cubiques de pyrite dans une veine à calcite. (d) Pyrite cubique (Py) avec figures de corrosion et gypse automorphe (Gy) (Charpentier, 2001).

Comme le montre la **Figure II.5**, la présence de pyrite est systématiquement attestée. Les auteurs n'ont observé aucune relation entre orientation structurale-paragénèses minérales. Hors faille secondaire, on peut distinguer trois échelles de fracturation d'origine tectonique :

1. une fracturation d'extension décamétrique, avec remplissage de calcite centimétrique,
2. une fracturation d'extension métrique, avec remplissage de calcite millimétrique,
3. une fracturation d'extension métrique à décimétrique, avec remplissage de calcite millimétrique ou inférieur.

Les fracturations artificielles liées aux travaux d'excavation seront présentées ultérieurement en établissant un lien avec les notions de la zone endommagée.

2.2. Contexte minéralogique et pétrophysique

Après une présentation générale du contexte géologique du site de Tournemire, nous nous focalisons ici sur les propriétés minéralogiques et pétrophysiques de l'argilite. Du point de vue minéralogique, le milieu argileux du site Tournemire est constitué par une fraction prédominante de minéraux argileux d'environ (20-50 %) majoritairement composé de (5-15 %) d'illite, (5-10 %) de l'interstratifié illite/smectite (la proportion de smectite de l'ordre de 10 %), de (1-5 %) chlorite et de (15-20 %) de kaolinite. Les autres phases de minéraux disponibles comprennent calcite, dolomite, quartz, sidérite et pyrite. La calcite se présente comme le carbonate prédominant (10-40 %); et les proportions de dolomite apparaissent faibles. Le quartz se trouve en forme de grains fins (10-20 %) (Cabrera *et al.*, 2001 ; Savoye *et al.*, 2001, 2006). La teneur pondérale en pyrite varie entre 2 et 9 %.

Le milieu argileux du site de Tournemire est constitué de roches compactes (argilites et marnes) avec une texture anisotrope. La matrice argileuse présente une teneur en eau très faible (de 1 à 5 %, poids), une porosité comprise entre 6 et 9 %, et une taille moyenne de pores extrêmement faible (2,5 nm). Les faibles valeurs de porosité et tailles de pores sont probablement dues à la compaction de la roche et aux processus diagénétiques (i.e., cimentation) (Bonin, 1998). La surface spécifique varie de 23 à 29 m²/g. La capacité d'échange cationique est d'environ 10 meq/100 g et l'eau interstitielle possède une salinité modérée (1500 mg/l) (Cabrera *et al.*, 2001). Les valeurs de perméabilité de la matrice argileuse, mesurée sur les échantillons en laboratoire et aussi *in situ* se situent respectivement dans la gamme 10⁻¹² -10⁻¹³ m/s dans la zone fracturée et 10⁻¹⁴ - 10⁻¹⁵ m/s dans la zone non fracturée du massif (i.e., en champ lointain) (Barbreau & Boisson, 1993 ; Boisson, 1995 ; Boisson, 1996a ; Boisson, 1996b). La résistance des argilites à la compression est de l'ordre de 35 MPa et le module de Young est supérieur à 10000 MPa (Boisson *et al.*, 1998). Le

Tableau II.1 rassemble toutes les propriétés minéralogiques et physiques de l'argilite du site de Tournemire.

Tableau II.1. Propriétés minéralogique, chimique et pétrophysique de l'argilite de Tournemire (modifié, d'après Boisson, 2005).

Roche argileuses: argilites et marnes du Domérien et Toarcien du site					
paramètres	min	meilleur estimation	max	méthode	références
MINERALOGIE					
<i>minéraux argileux</i> [masse totale sèche %]	25,0	37,5	50,0	DRX	Boisson et al., 1998
<i>Chlorite</i> [masse total sèche %]	1,0	2,5	5,0	DRX	Boisson et al., 1998
<i>Kaolinite</i> [masse total sèche %]	5,0	15,0	25,0	DRX	Boisson et al., 1998
<i>Illite/Smectite</i> [masse total sèche %]	9,0	12,0	15,0	DRX	Boisson et al., 1998
<i>Quartz</i> [masse total sèche %]	10,0	17,5	25,0	DRX	Boisson et al., 1998
<i>Carbonate</i> [masse total sèche %]	18,0	36,0	54,0	DRX	Boisson et al., 1998
<i>Calcite</i> [masse total sèche %]	10,0	25,0	45,0	DRX	Boisson et al., 1998
<i>Dolomite</i> [masse total sèche %]	3,0	5,0	25,0	DRX	Boisson et al., 1998
<i>Sidérite</i> [masse total sèche %]	1,0	2,0	4,0	DRX	Boisson et al., 1998
<i>Pyrite</i> [masse total sèche %]	2,0	5,5	9,0	DRX	Boisson et al., 1998
PROPRIETE PHYSICO-CHIMIE DE LA ROCHE					
CEC [meq/100g]		10		ammonium acétate (Jackson, 1964)	Boisson et al., 1998 De Windt et al., 1998

paramètres	min	meilleur estimation	max	méthode	références
PARAMETRES PETROPHYSIQUES					
<i>Masse volumique sèche</i> [$10^3/m^3$]	2,40	2,46	3,06	perte de poids (105 °C)	Barbreau & Boisson, 1993 ; Boisson et al., 1998
<i>Masse volumique moyenne du grain solide</i> [$10^3/m^3$]	2,60	2,65	2,70	Littérature sur la base de la composition minéralogique de la roche	Barbreau & Boisson, 1993 ; Boisson et al., 1998
<i>Teneur en eau</i> [masse d'eau/masse sèche] [%]	1,0	4,0	6,0	perte de poids (105 °C)	Barbreau & Boisson, 1993 ; Boisson et al., 1998
<i>Porosité</i>	1,4	2,0	3,8	Porosimètre au mercure	Barbreau & Boisson, 1993 ; Boisson et al., 1998
<i>Surface spécifique externe</i> [m^2/g]	23	26	29	Adsorption N ₂ (BET)	Boisson et al., 1998

2.3. Contexte géotechnique

Le site de Tournemire totalise (i) six galeries creusées dans deux directions (proches de Est-Ouest et de Nord-Sud) soit une longueur totale de 285 m de galeries et (ii) plus de 200 forages réalisés depuis 1990 à partir du tunnel et des galeries (**Figure II.6**).

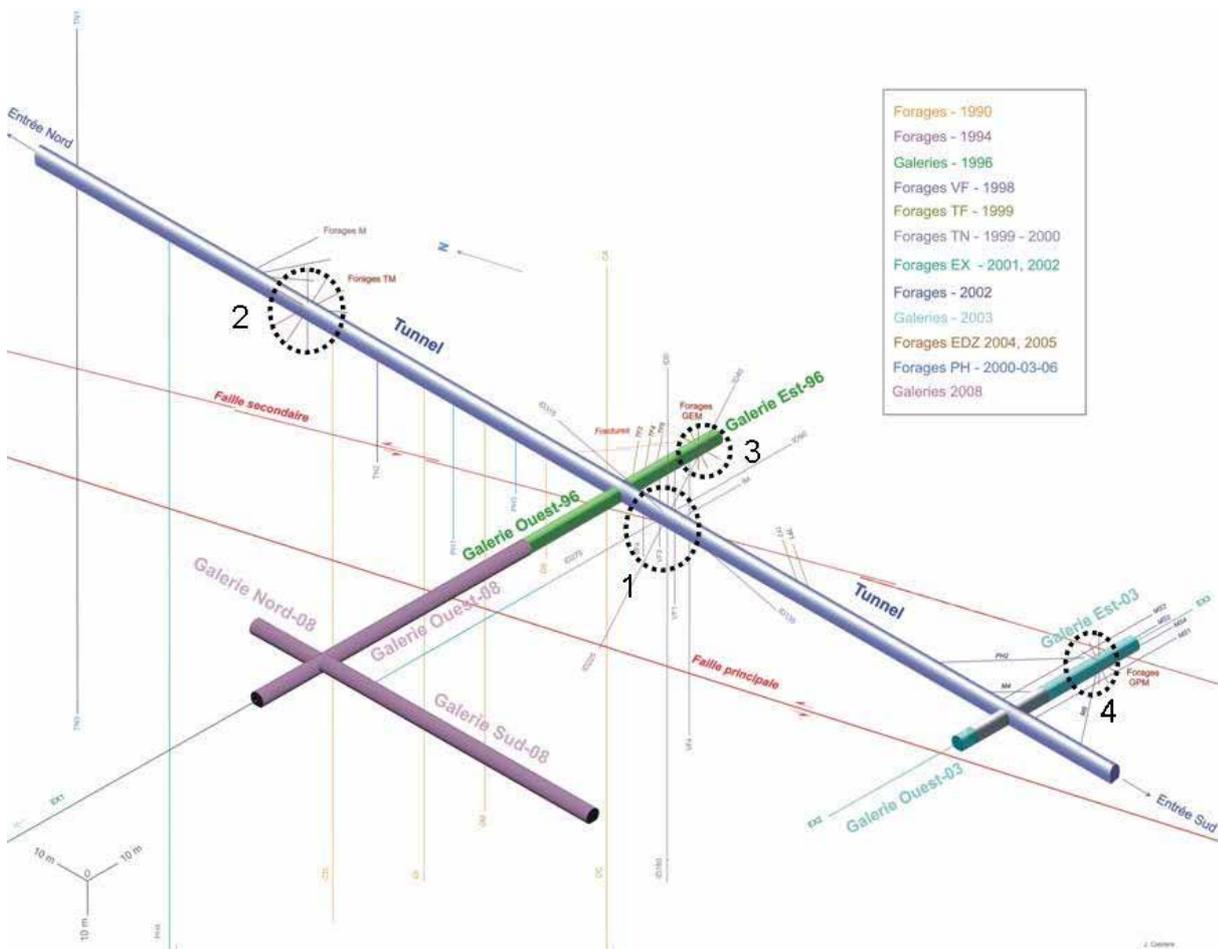


Figure II.6. Localisation des forages et des galeries dans la zone centrale de la Station Expérimentale de Tournemire (d'après IRSN, 2009). Les numéros N° 1,2,3,4 correspondent aux forages rayonnants mis en place pour l'étude de l'extension et de l'évolution de la zone endommagée. Il s'agit des forages rayonnants (TM) autour du tunnel (N° 1-2), des forages (GEM) autour de la galerie Est-96 (N° 3) et des forages (GPM) autour de la galerie Est-03 (N° 4).

Les programmes expérimentaux développés dans l'installation de Tournemire peuvent être résumés chronologiquement de la manière suivante :

1990-1992 : Travaux de reconnaissance géologique, hydrogéologique et géomécanique. Acquisition du tunnel en 1992 (cinq forages verticaux en orange) sur la **Figure II.6**.

1993-1998 : Etudes des propriétés hydro-géochimiques et développement de techniques de prélèvement, études des propriétés rhéologiques et premiers travaux sur l'effet des creusements. Ces études comprennent les forages rayonnants (ID) réalisées à partir du tunnel (N° 1 sur la **Figure II.6**), les premières galeries du site excavées en 1996 (galeries Est-96 et Ouest-96 en vert *idem*) pour étudier le comportement géomécanique des argilites à l'excavation, la fracturation et les phénomènes de désaturation-resaturation. Les forages

verticaux (VF) sont réalisés à partir de la galerie Est (en gris *idem*) pour les essais de ventilation en forage.

1999-2005 : Etude de l'influence des failles par des traceurs naturels à l'aide des forages (TF ou TN) réalisés à partir du tunnel et de la galerie Est-96 (en vert foncé *idem*). En 2001-2002, les forages d'exploration (EX) sont effectués pour explorer les zones intéressantes pour de futures galeries planifiées et creusées en 2003 (Ouest-03 et Est-03). Ces galeries ont été réalisées principalement pour étudier la réponse hydromécanique des argilites à l'excavation avec une instrumentation avant le creusement. En 2004, des forages rayonnants (EDZ) sont mis en place pour l'étude de l'extension et de l'évolution de la zone endommagée (en marron *idem*). Il s'agit des forages rayonnants (TM) autour du tunnel, des forages (GEM) autour de la galerie Est (1996) et des forages (GPM) autour de la galerie Est (2003) (N°2, 3, 4 respectivement sur la **Figure II.6**).

2006-2008 : Caractérisation des propriétés et mécanismes de transport dans la couche argileuse saine, profils de pression et de traceurs naturels (forages verticaux - PH4, PH5). En 2008, la galerie Ouest (1996) est prolongée et deux galeries parallèles au tunnel sont creusées pour développer une plate-forme expérimentale plus orientée vers les aspects technologiques. Ces aspects comprennent l'étude de l'efficacité des scellements, des méthodes d'auscultation géophysique de la zone endommagée et de failles, des études de transferts dans les argilites, l'évolution de l'EDZ entre autres.

Après l'introduction des programmes expérimentaux dans le site, on présente maintenant certaines caractéristiques géotechniques de ces mêmes ouvrages. Il convient d'emblée de souligner que les galeries ont été réalisées à l'aide d'une machine à attaque ponctuelle (à sec) afin de perturber le moins possible la roche. Ainsi, le mode d'excavation des galeries ne constituera pas une variable dont il faudrait discuter l'influence sur la nature et l'extension de l'EDZ. La forme des ouvrages sont généralement en « fer à cheval » sauf les galeries 2003 (forme : circulaire). Les dimensions de ces ouvrages sont précisées sur la **Figure II.7**.

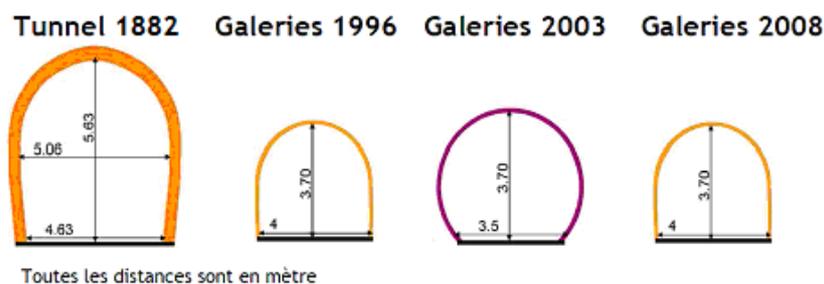


Figure II.7. Présentation des dimensions (en mètres) et des sections des diverses galeries présentes sur le site selon l'âge du creusement.

Le parement et le soutènement du tunnel ferroviaire de 1882 sont assurés par des blocs calcaires qui sont fortement résistantes mécaniquement (et aussi électriquement comme l'on montré des mesures électrostatiques préliminaires⁽¹⁾). L'épaisseur de la maçonnerie est de l'ordre de 40-50 cm (**Figure II.8**). Le radier est bétonné et en dessous de la couche en béton d'épaisseur 20-30 cm, il existe le ballaste sur environ 1 m d'épaisseur.

Le soutènement des galeries est caractérisé par des cintres métalliques avec un grillage en voûte. Ces cintres sont espacés de 2 m sauf dans les zones de failles et de fracturation où ils sont espacés de 1 m.

La galerie Est-96, orientée Est-Ouest environ, est d'une longueur de 30 m (**Figure II.9**). L'argilite est accessible en paroi et en radier (pas de bétonnage). Les galeries Ouest-96 et Est-96 montrent une densité de fracturation tectonique différente. La fracturation plus élevée dans la galerie Ouest-96 s'explique par le rôle des failles à proximité de celle-ci (**Figure II.3**).

La galerie Est-03, orientée Est-Ouest environ, présente une longueur de 40 m et une section circulaire. Les parois et le radier de cette galerie sont bétonnés sur les dix premiers mètres afin d'étudier le comportement géomécanique de la roche en présence d'un bétonnage des parois et pour les études des interactions argile-béton (**Figure II.10**). La totalité du radier de la galerie est bétonné (environ 30 cm d'épaisseur ; béton non armé).

La galerie Nord-08 orientée Nord-Sud, possède une longueur de 20 m. Elle possède les mêmes caractéristiques géotechniques que la galerie Est-96 (même dimension et même forme de galerie). Le radier de la galerie est également bétonné sur une partie située à l'entrée de la galerie (sur une longueur de 7 m).

(1) Okay, G., Ghorbani, A., Cosenza, P., Camerlynck, C., Cabrera, J., (2009) Résultats des missions effectuées en 2009 sur le site de Tournemire (rapport d'avancement).



Figure II.8. (a) Vue de l'intérieur du Tunnel ferroviaire, (b) Zone de transition maçonnerie du tunnel (en blanc)-argilite (en gris foncé) observée à l'entrée de la galerie Est-96. La fracturation induite par le creusement est visible sur la paroi. La maçonnerie est de 40-50 cm d'épaisseur.

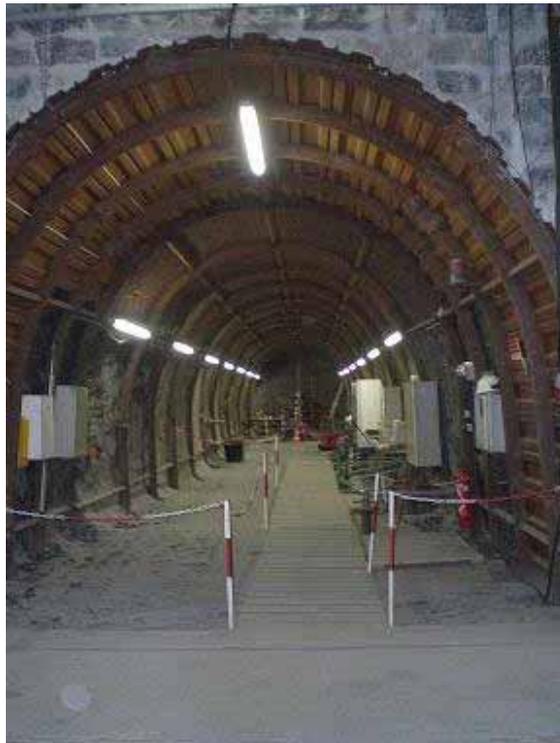


Figure II.9. Galerie Est-96 (vue du côté Ouest à partir du tunnel).

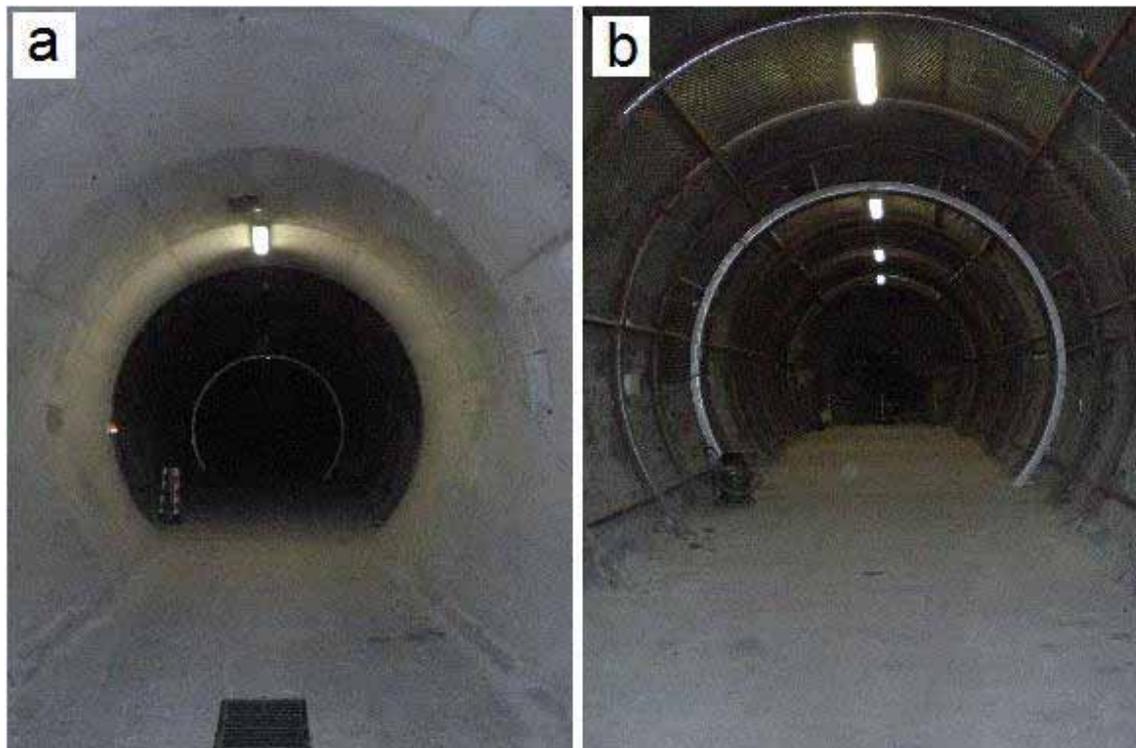


Figure II.10. Galerie Est-03 (a) premiers 10 m bétonnés en paroi et au radier, (b) suite de la galerie bétonnée seulement au radier (présence des cintres métalliques).

2.4. L'EDZ de Tournemire et méthodes de caractérisation appliquées

Dans cette section, les connaissances acquises pour la caractérisation des zones endommagées autour des ouvrages de la station expérimentale de Tournemire seront présentées. Il s'agit principalement des études menées dans les galeries Est-96, Est-03 et Nord-08 où se sont déroulées les prospections géophysiques de ce travail de thèse. L'importance de ces connaissances *a priori* permettront ultérieurement de faire des interprétations approfondies et des comparaisons avec les résultats du présent travail.

2.4.1. Tunnel ferroviaire (1882-88)

Nous présentons sur la **Figure II.11** ci-dessous, la synthèse des résultats expérimentaux menées à partir du tunnel ferroviaire.

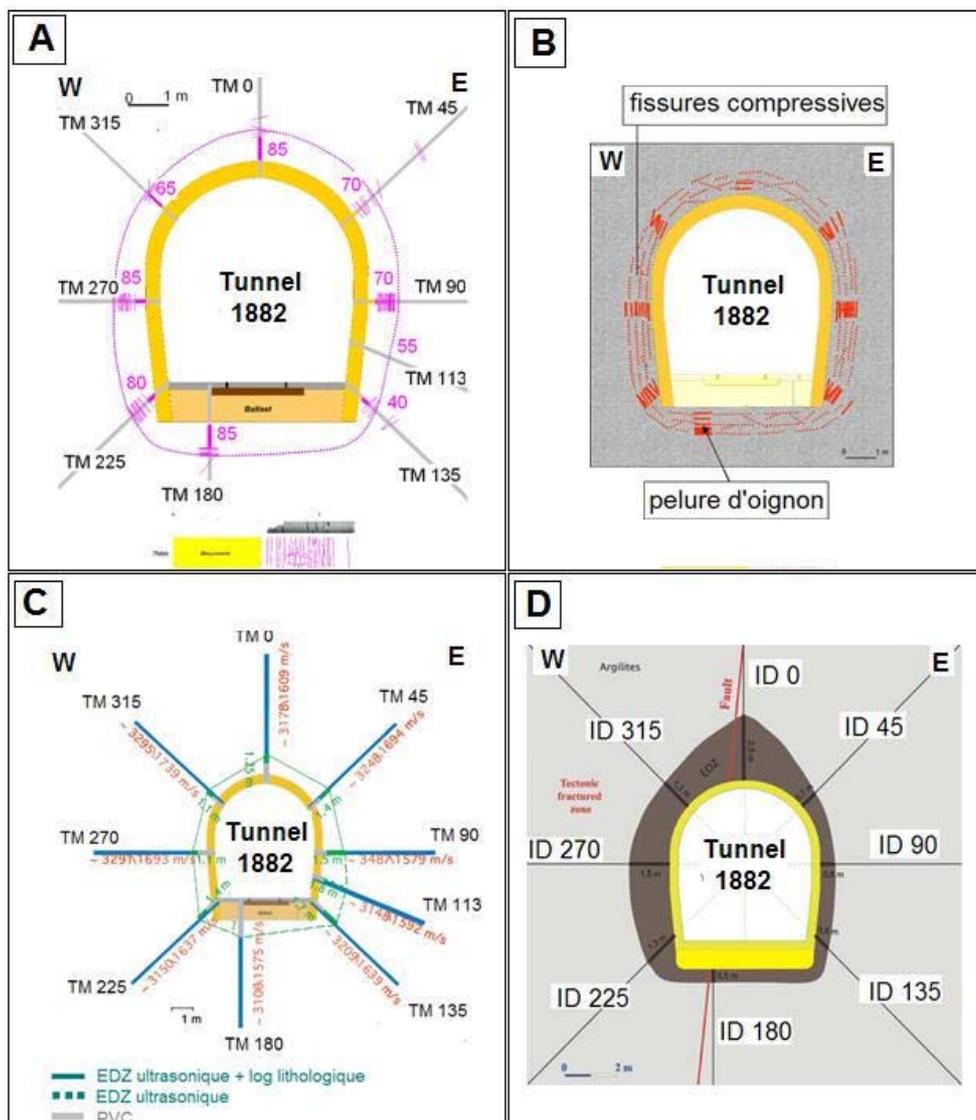


Figure II.11. Différents techniques de caractérisation de la zone endommagée autour du tunnel ferroviaire (1882), (A) Caractérisation structurale de l'EDZ sur des échantillons prélevés à partir des forages rayonnants TM (Cabrera, 2005 ; Millard *et al.*, 2009), (B) Schéma de la fissuration en forme de pelure d'oignon autour du tunnel (Millard *et al.*, 2009), (C) Mesures de diagraphies ultrasoniques (Contrucci *et al.*, 2007), (D) Mesures pétrophysiques et de perméabilité sur des échantillons prélevés à partir des forages rayonnants ID (Cabrera, 1995 ; Rejeb, 2005).

A-B. Caractérisation structural de l'EDZ

L'existence de l'EDZ autour du tunnel a été confirmée par l'analyse des carottes analysées à partir de nombreux forages réalisés à partir des parements du tunnel et des forages rayonnants (TM) (Figure II.6, zone N° 1 ou Figure II.11A). Une fracturation principalement perpendiculaire à l'axe des forages a été observée tout autour de l'ouvrage avec une extension qui varie de 0,50 à 2,50 m et qui a permis de définir une enveloppe préliminaire de l'EDZ autour du tunnel (Cabrera, 2005 ; Rejeb, 2006).

C. Mesures de diagraphies ultrasoniques

La caractérisation de l'EDZ du tunnel par des mesures de diagraphies ultrasoniques a été réalisée (Contrucci *et al.*, 2007) à partir des forages rayonnants autour du tunnel (TM) de 6-15 m de longueur (**Figure II.6 zone N°2 et Figure II.11A**). Le dispositif expérimental consistait en un émetteur et deux récepteurs ultrasoniques, opérant dans une bande de fréquence de 50 à 700 kHz avec un pic de réponse à 100 kHz. La technique de mesure a consisté à émettre des ondes ultrasoniques et à mesurer le temps de propagation de ces ondes entre l'émetteur et chaque récepteur afin de calculer les variations de vitesse dans les forages (les distances entre émetteur-récepteur étant connue : 10 et 30 cm). Les mesures de vitesses des ondes P et S permettent la caractérisation des changements lithologiques, l'état de la roche et l'analyse des densités de microfractures. Leurs résultats montrent que la zone endommagée autour du tunnel est comprise entre 1,1 et 1,8 m (**Figure II.11C**).

D. Mesures pétrophysiques à partir des forages rayonnants (ID)

Outre que les forages rayonnants (TM) l'analyse de l'EDZ autour du tunnel a été aussi effectué à partir des forages rayonnants (ID) localisés à proximité d'une faille. Les analyses pétrophysiques (i.e., mesures de perméabilité) effectuées sur des échantillons prélevés des forages rayonnants (ID) révèlent que l'EDZ du tunnel est mise en évidence par une fracturation dense, homogène et parallèle aux parois du tunnel en forme dite de « pelures d'oignon » (**Figure II.11B**). Les auteurs estiment à approximativement 70 cm, l'épaisseur de cette couche d'enveloppe.

2.4.2. Galerie Est-96

La **Figure II.12** ci-dessous représente un ensemble de résultats de caractérisation dans la galerie Est-96.

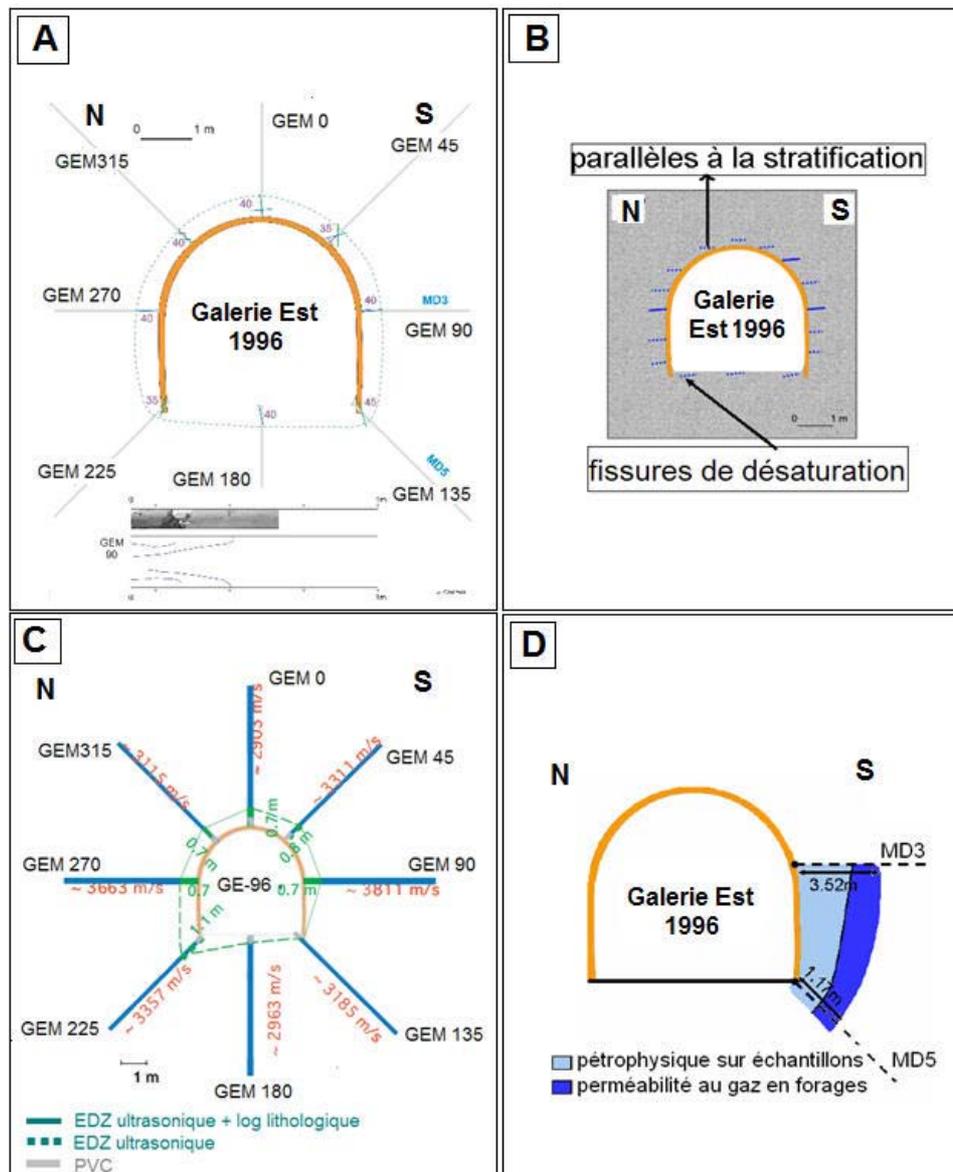


Figure II.12. Différents techniques de caractérisation de la zone endommagée autour de la galerie Est (1996), (A) Caractérisation structurale de l'EDZ sur des échantillons prélevés à partir des forages rayonnants GEM (Cabrera, 2005), (B) Schéma de la fissuration parallèles à la stratigraphies (fissures de désaturation) autour de la galerie, (C) Mesures de diagraphies ultrasoniques (Contrucci et al., 2007), (D) Mesures pétrophysiques et de perméabilité au gaz sur des échantillons prélevés à partir des forages MD3 et MD5 (Matray et al., 2007).

A-B. Caractérisation structural de l'EDZ

Des analyses structurales en paroi, radier et sur carottes de forages (GEM) ont permis de souligner que la fracturation présente dans la zone perturbée par l'excavation sont de trois types (Cabrera et al., 2001) ; (i) les fractures d'origine tectonique remplies de calcite, (ii) les fractures néoformées liées à l'excavation, (iii) les fractures liées à la désaturation de la roche et localisées le long des plans d'anisotropie de la roche (plans de stratification) (Figure II.13).

Les fractures tectoniques remplis de calcite (fracturation donc naturelle et préexistante) sont traversées par la galerie et visibles au radier, aux parements et au fond de l'ouvrage. Il s'agit de fractures d'échelle décimétrique, pour la plupart subverticales et de direction proche de N-S à NW-SE (**voir annexe A2**). Elles sont associées à la tectonique en compression pyrénéenne, il y a 40-50 millions d'années. Il existe quelques failles normales anciennes de l'extension jurassique. Quelques fractures d'origine tectonique sont ouvertes (d'ordre millimétrique) par les travaux d'excavation et la désaturation.

Les fractures néoformées (fracturation artificielle liée au creusement) sont localisées principalement au radier ; elles sont de direction N-S proche de la direction des fractures tectoniques et se mettent en place progressivement dans le temps, après l'excavation (**voir annexe A2**). Contrairement aux fractures tectoniques remplis de calcite d'origine naturelle, ces fractures artificielles ne sont pas scellées par un remplissage minéral. Ces fractures sont d'origine mécanique et l'ouverture de l'ordre de 1-2 mm ne varie pas en fonction des variations saisonnières comme c'est le cas des fractures liées à la désaturation.

Enfin, *les fractures de désaturation* sont observées aux parois et au front de la galerie et elles sont localisées dans les plans de stratification. L'orientation de ces fractures subhorizontales est contrôlée par la nature anisotrope de l'argilite ([Cabrera et al., 1999](#)). Elles s'étendent dans le premier mètre en profondeur, avec une ouverture millimétrique et sont équidistantes en moyenne de 10-20 cm. Ce réseau de fractures est directement lié aux variations saisonnières de l'hygrométrie et de la température ambiante. L'hygrométrie dans les ouvrages depuis 1999 indique des variations saisonnières (40 % d'humidité relative et 8 °C en hiver et près de 100 % et 14 °C en été) avec une humidité relative annuelle moyenne de 77 % induisant l'évaporation partielle de l'eau interstitielle.

En été, à cause d'une atmosphère humide, les fractures se ferment. Alors qu'en hiver, à cause d'une atmosphère sèche, les fractures s'ouvrent ([Ramambasoa, 2001](#)). La corrélation entre l'ouverture et l'hygrométrie a été validé par les enregistrements des extensomètres et des thermohygromètres ([Fatmi et al., 2004](#)). Les observations de ces fractures, qui s'ouvrent et se ferment selon les variations saisonnières d'hygrométrie, obtenues sur le site de Tournemire ([Rejeb & Cabrera, 2006](#)) et aussi en laboratoire ([Valès et al., 2004](#)) ont ainsi confirmé l'importance de processus hygromécaniques dans le développement de l'EDZ dans les roches argileuses.

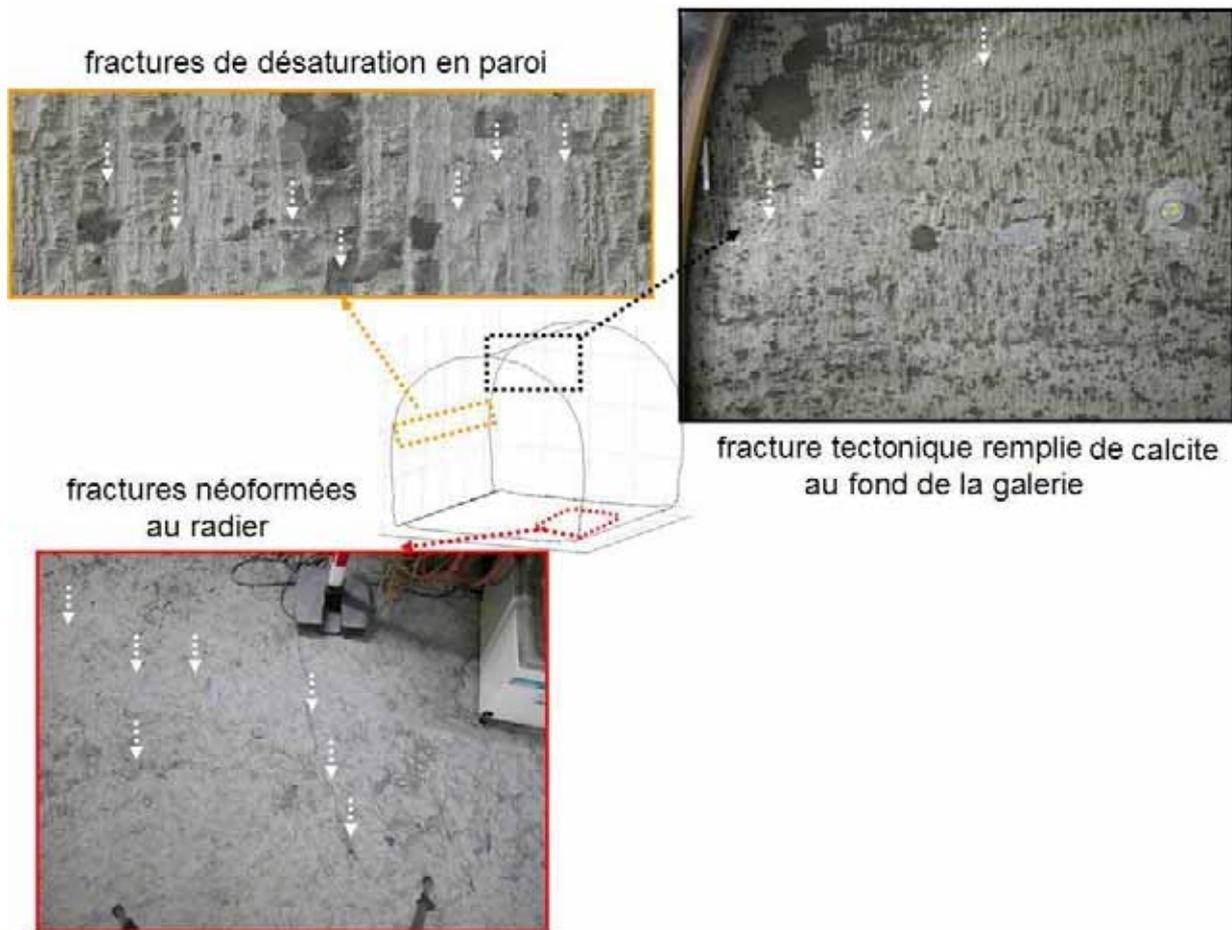


Figure II.13. Différents types de fracturation observés dans la galerie Est-96 (NB : les fractures tectoniques remplies de calcite se trouvent également au radier à l'échelle millimétrique. Celles-ci ne sont pas présentées sur la figure).

C. Mesures de diagraphies ultrasoniques

Les mesures ont été effectuées à partir des forages rayonnants (GEM) réalisés autour de la galerie Est-96 (Figure II.6, zone N° 3) (Contrucci *et al.*, 2007). La zone endommagée autour de la galerie Est, est beaucoup moins développée que celle du tunnel ferroviaire. Son extension varie entre 0,7 et 1,1 m (Figure II.12C).

D. Mesures pétrophysiques et de perméabilité au gaz à partir des forages

Les mesures pétrophysiques réalisées à partir des forages MD3 et MD5 concernent les mesures de la teneur en eau, les masses volumiques humides et sèches et enfin la masse volumique des grains solides obtenues sur des échantillons prélevés dans chaque forage (Matray *et al.*, 2007). La mesure de la teneur en eau est effectuée par la mise en étuve des échantillons pendant 48 à 72 heures à 105 et 150 °C jusqu'à stabilisation de la masse. A partir de ces données, l'évolution des teneurs en eau, de la porosité totale et efficace, et de la saturation en fonction de la distance à la paroi de l'ouvrage a été analysée.

Concernant les profils de perméabilité, une sonde de 5 chambres de mesure d'une longueur de 10 m a été introduite dans les forages pour effectuer des tests pneumatiques (au gaz) et hydrauliques (à l'eau synthétique préparée en laboratoire). La position exacte des chambres de mesure a été définie en fonction des observations faites sur les carottes des forages rayonnants. Les premiers tests, notamment dans les deux premiers mètres du forage ont été faits au gaz. Les chambres ont été ensuite saturées, lorsque cela était possible, pour des tests hydrauliques en zone saturée (Rejeb, 2006). Les résultats de toutes ces analyses montrent un endommagement de l'ordre de 3,52 m (MD3 : forage horizontal en paroi) et de 1,17 m (MD5 : forage incliné) sur la **Figure II.12D**.

E. Ecoute sismique

L'écoute de l'activité microsismique a été réalisée à l'aide d'un réseau de 16 accéléromètres de haute fréquence, de 1 à 10 kHz (Cabrera *et al.*, 2001). Cette méthode a été expérimentée au fond de la Galerie Est-96 (dans le secteur du front), dans une zone faiblement fracturée.

Un total de 158 événements microsismiques a été enregistré, dont 64 événements (enregistré par un seul capteur) ont été mis en relation avec des écaillages superficiels des parois. Il a été montré également que les événements enregistrés par plusieurs capteurs étaient dus à la microfissuration en champ proche (i.e., à proximité de l'ouvrage) associée aux phénomènes de désaturation du milieu argileux.

La localisation de ces événements a permis de donner une indication quant à l'extension de la zone perturbée. Compte tenu de la marge d'erreur sur la localisation, cette zone a été estimée s'étendre sur plusieurs dizaines de centimètres à l'intérieur du front. Cette profondeur des fractures a été vérifiée lors de la réalisation des forages (carottés).

F. Sismique réfraction

Principe de la méthode

Au contraire de l'écoute sismique qui vise à localiser des émissions acoustiques naturelles dans le massif, il est possible d'émettre et d'enregistrer des ondes sismiques se propageant dans le milieu à investiguer. Ces ondes portent des informations sur les propriétés sismiques du milieu traversé, comme la vitesse des ondes P (ondes de volume de pression/décompression, premières arrivées) et des ondes S (ondes de volume cisailantes, arrivées secondes). Pour étudier les capacités et limites des méthodes sismiques à investiguer l'EDZ, des campagnes de sismique réfraction et de sismique par ondes de surface ont été mises en œuvre à Tournemire.

La méthode de sismique réfraction est une méthode non destructive d'investigation du sous-sol basée sur l'étude des temps d'arrivée des ondes sismiques réfractées le long de certaines interfaces, permettant de déduire les vitesses de propagation et la profondeur de ces interfaces. Les interfaces susceptibles de générer des ondes réfractées sont celles qui séparent deux couches géologiques de propriétés sismiques différentes, la couche supérieure ayant une vitesse sismique $V1$ plus lente que la couche inférieure de vitesse $V2$.

De manière très schématique, on peut considérer que les ondes émises par la source sismique descendent obliquement dans le milieu supérieur à la vitesse $V1$ jusqu'à l'interface avec le milieu plus rapide de vitesse $V2$ sous l'angle d'incidence critique :

$$\theta_L = \arcsin(V1/V2) \quad \text{équation (II.1)}$$

Ces ondes se propagent ensuite le long de l'interface à la vitesse $V2$, émergent sous l'angle θ_L et remontent dans le milieu de vitesse $V1$ jusqu'au capteur sismique où elles sont enregistrées (**Figure II.14**).

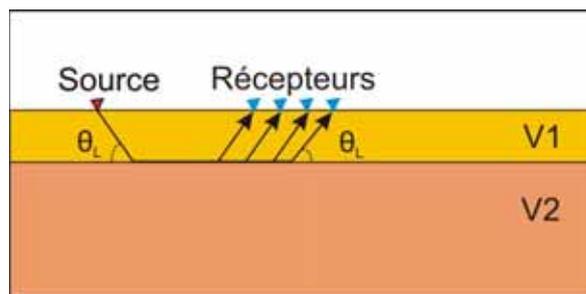


Figure II.14. Propagation des ondes sismiques dans un milieu à deux couches de vitesses sismiques $V1$ et $V2$.

La méthode vise à localiser en profondeur les différentes interfaces ayant généré des ondes réfractées et à déterminer les vitesses sismiques le long de ces interfaces. Pour cela, on étudie les temps d'arrivée des ondes réfractées à la surface du sol en fonction de la distance source-récepteur. Cette analyse des temps de propagation en fonction de la distance source-capteurs (courbes de dromochroniques) permet de calculer la vitesse des ondes dans les différentes couches, le pendage de ces mêmes couches et leurs profondeurs (Lavergne, 1986).

Des méthodes plus sophistiquées, comme la méthode Plus-Minus utilisée par Magnin *et al.* (2008), permettent d'étudier les variations latérales des propriétés du milieu le long du profil. Il est ainsi possible de proposer une coupe du terrain étudié (e.g, <http://www.wgeosoft.ch/Acquisition/HR-seismic/Sismique-HR.pdf>).

A Tournemire, les profondeurs auscultées sont de l'ordre métrique. Afin de pouvoir enregistrer les temps d'arrivée des ondes réfractées avec une précision suffisante et de

pouvoir déterminer finement la position du toit du milieu sain, des dispositifs dits de haute résolution ou de très haute résolution ont été mis en œuvre : la distance entre les capteurs est de l'ordre de la dizaine de centimètres, les capteurs sismiques sont des accéléromètres permettant de pointer précisément les temps d'arrivée des ondes. Les sources utilisées, correspondant à des forces verticales, génèrent des ondes P. Ces mesures ont donc permis d'avoir des informations sur la vitesse des ondes P dans le milieu investigué.

Profils de sismique réfraction haute résolution mesurés en 1999

Des profils de sismique réfraction haute résolution ont été réalisés le long d'une paroi de la galerie ou sur le radier (Cabrera *et al.*, 2001). La source sismique était une chute de poids (marteau). Les accéléromètres enregistrant le signal étaient espacés de 25 et 50 cm (Cabrera *et al.*, 1999). Les résultats ont montré l'existence d'une première couche (zone perturbée i.e., EDZ) de faibles vitesses sismiques pour la galerie Est (ondes P, dans la gamme 2085-2575 m/s) et une deuxième couche (roche saine) de vitesse plus élevée (ondes P, dans la gamme 3000-3500 m/s). Cette première couche varie entre 15 et 35 cm d'épaisseur pour les parements, et entre 31 et 65 cm pour les radiers. La présence de la couche à faible vitesse a été justifiée par l'existence d'une microfissuration et/ou une désaturation de la roche argileuse.

Profils de sismique réfraction haute résolution mesurés en 2007

Magnin *et al.* (2008) ont réalisé en 2007 des campagnes de mesures de sismique réfraction Très Haute Résolution. Magnin *et al.* (2008) ont installé deux dispositifs constitués de 30 capteurs espacés de 10 cm sur une longueur totale de 2,9 m, 8 tirs sismiques ont été émis. Parmi ces deux dispositifs, l'un était parallèle, l'autre perpendiculaire à la fracturation observée sur le radier de la galerie Est-96. Ils ont observé une différence de 600 ms des temps d'arrivées du front d'ondes en bout de dispositif entre les dispositifs parallèle et perpendiculaire à la fracturation. Les temps d'arrivée aux différents capteurs étaient beaucoup plus longs pour le cas du dispositif perpendiculaire à la fracturation. Ils ont observé que le dispositif orienté parallèlement se caractérisait par des dromochroniques peu perturbées dont l'interprétation donnait une épaisseur d'EDZ faible d'environ 40 cm. Les dromochroniques du dispositif orienté perpendiculairement à la fracturation étaient très perturbées. Les sauts de temps observés sur les dromochroniques ont été interprétés comme la présence de fissures atteignant une épaisseur plus importante estimée à 80 cm. La vitesse des ondes P dans le milieu sain a été estimée à 3700-3800 m/s (propagation dans le plan horizontal) tandis qu'elles sont en moyenne de 3300-3400 m/s dans l'EDZ.

En résumé, l'interprétation quantitative de l'ensemble a permis de proposer le modèle de la **Figure II.15** : au niveau du radier, il existerait une zone de faibles vitesses sismiques sur une profondeur de 40 cm associée à réseau de fissures se prolongeant jusqu'à 80 cm de profondeur (la roche non endommagée commencerait donc à apparaître sous le radier à 80 cm de profondeur).

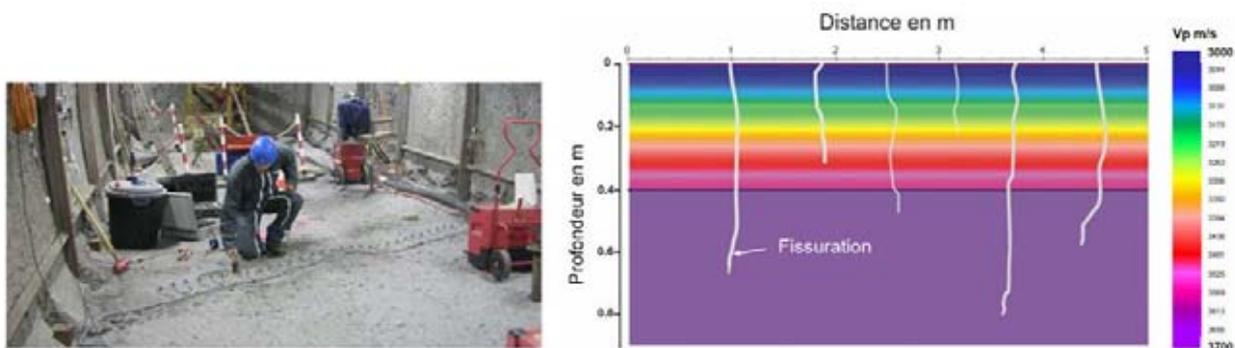


Figure II.15. A gauche : profil sismique parallèle à la fissuration à la galerie Est-96. A droite : le modèle de l'EDZ selon les interprétations sismiques quantitatives.

2.4.3. Galerie Est-03

La **Figure II.16** ci-dessous représente un ensemble de résultats de caractérisation dans la galerie Est-03.

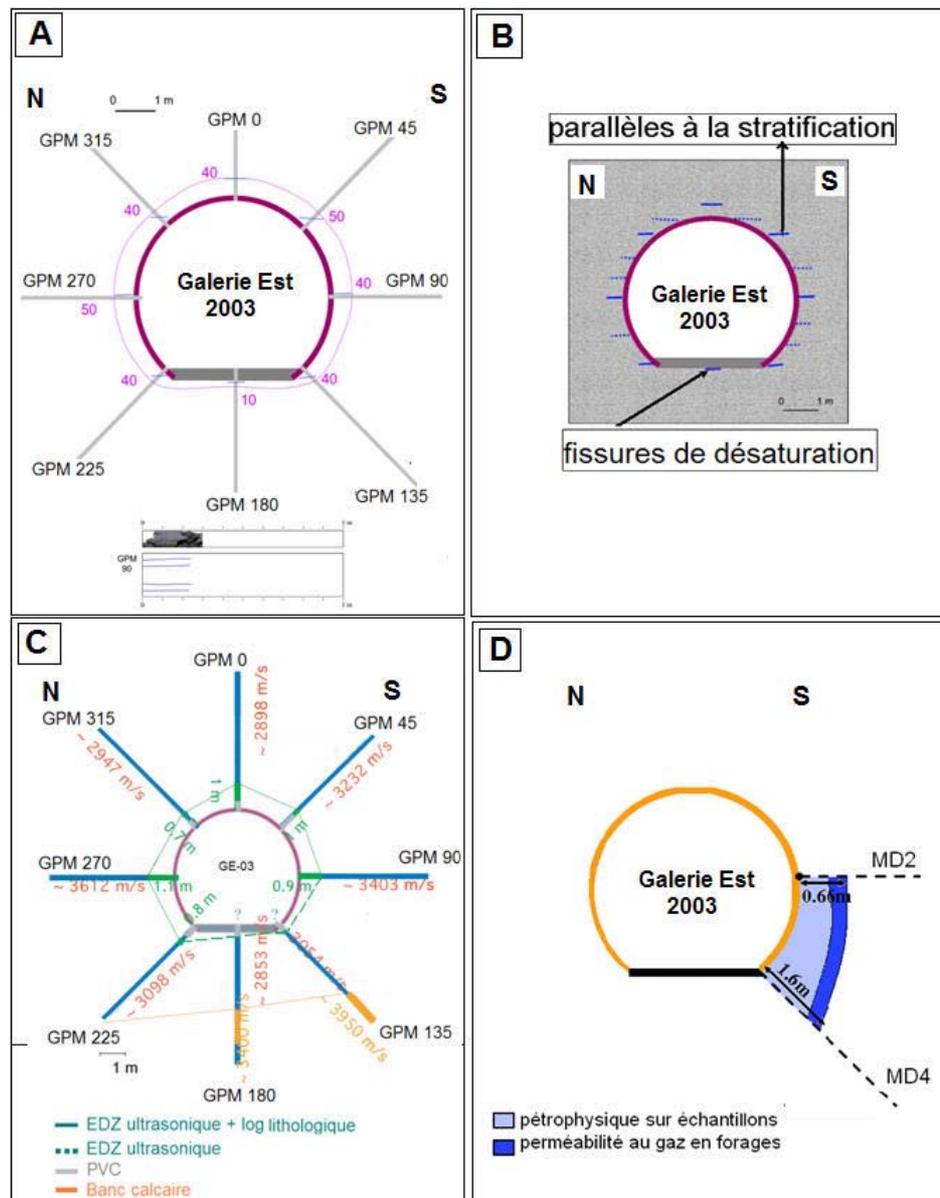


Figure II.16. Différents techniques de caractérisation de la zone endommagée autour de la galerie Est-03, (A) Caractérisation structurale de l'EDZ sur des échantillons prélevés à partir des forages rayonnants GPM, (B) Schéma de la fissuration parallèles à la stratigraphie (fissures de désaturation) autour de la galerie, (C) Mesures de diagraphies ultrasoniques (Contrucci *et al.*, 2007), (D) Mesures pétrophysiques et perméabilité au gaz (Matray *et al.*, 2007).

A-B. Caractérisation structural de l'EDZ

L'analyse structurale de l'EDZ a été réalisée sur des échantillons prélevés à partir des forages rayonnants (GPM). Dans cette galerie, seules les fractures de désaturation parallèles à la stratification en paroi et en radier sont observées. Elles ont les mêmes caractéristiques que celles observées dans la galerie Est-96. Ces quelques fissures observées autour de cet ouvrage ne ressemblent pas à celles observées autour du tunnel. Par le contact avec l'air, la désaturation de la roche intervient et celle-ci a induit l'apparition de ces fissures. Elles apparaissent peu de temps après le creusement de l'ouvrage (Cabrera, 2005). On en conclue,

que pour l'instant, similairement qu'à la galerie Est, il n'existe pas d'EDZ autour de la galerie-03, comme celle mis en évidence autour du tunnel ferroviaire (Rejeb, 2006). Au fond de la galerie (côté Est), le secteur est affecté par la présence de la faille secondaire (**Figure II.6**).

C. Mesures de diagraphies ultrasoniques

Les mesures ont été effectuées à partir des forages rayonnants (GPM) réalisés autour de la galerie Est-03 (**Figure II.6, zone N° 4**). La zone endommagée de cette galerie présente une extension équivalente ou plus développée qu'à la galerie Est-96. Ceci peut être expliqué par la présence de la faille tectonique (faille secondaire) et/ou par la vitesse de creusement avec une machine à l'attaque ponctuelle plus puissante.

D. Mesures pétrophysiques et perméabilité au gaz

Une autre étude dédiée à l'extension de la zone désaturée autour de la galerie Est-03 a été réalisée à partir des forages (MD2 et MD4, **Figure II.16D**). Elle a consisté en une campagne de mesures de teneur en eau et de perméabilité au gaz. Ces mesures ont été mises en œuvre de la même manière qu'à la galerie Est-96. Les résultats de cette campagne de mesures sont présentés sur la **Figure II.16D**. Comme l'indique cette figure, la méthode de mesure de la perméabilité au gaz en forage a donné une extension de la zone désaturée plus importante que celle obtenue par les mesures pétrophysiques. Elle semble donc être plus sensible que la méthode pétrophysique de la teneur en eau (utilisant un processus de séchage et une pesée de petits échantillons) (http://www.irsn.fr/FR/larecherche/Information_scientifique/Publications_Documentation/rapports-scientifiques-techniques/Documents/F3RST05-3.pdf).

E. Analyse de dispersion des ondes de surface

Dans la galerie Est-03, Côte & Leparoux (2007) et Côte & Leparoux (2008) ont mis en œuvre une méthode de sismique par ondes de surface. Il s'agit de la MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves, Park *et al.*, 1999), basée sur l'analyse des courbes de dispersion des ondes de surface.

Les ondes de surface, considérées comme des ondes parasites lors d'études de sismique réflexion, sont des ondes très énergétiques qui contiennent 2/3 de l'énergie émise par une source en milieu homogène (Miller & Pursey, 1955). Elles résultent d'interférences constructives entre ondes de volume à la surface libre. Dans le plan 2D vertical étudié ici, les ondes de surface sont nommées ondes de Rayleigh, elles sont polarisées elliptiquement.

Dans un milieu homogène, seul le mode fondamental des ondes de Rayleigh se propage. Dans un milieu tabulaire, les ondes de Rayleigh sont dispersives, c'est-à-dire que leur vitesse de propagation dépend de la fréquence. Ainsi, lorsque la vitesse augmente avec

la profondeur, ce qui est généralement le cas dans les milieux réels, les composantes hautes fréquences qui parcourent la partie superficielle du sol où les vitesses sont plus lentes, se propagent à des vitesses plus faibles que les composantes basse fréquence qui atteignent des profondeurs plus importantes où les vitesses sont plus élevées. En effet, la vitesse de propagation de l'onde prend en compte les vitesses des ondes sur toute l'épaisseur du sol sondée. La méthode MASW (Park et al., 1999) exploite cette propriété de dispersion des ondes de surface. Les courbes de dispersion utilisées représentent la vitesse (de groupe ou de phase) des ondes de surface en fonction de leur fréquence.

Les ondes de surface sont principalement sensibles à la vitesse des ondes S. La méthode MASW (Park et al., 1999) consiste à construire un modèle de vitesse 1D (milieu tabulaire plan) à l'aide de l'ajustement des courbes de dispersion enregistrées et calculées. Ce modèle de vitesse renseigne principalement sur la vitesse des ondes S, la méthode étant moins sensible à la vitesse des ondes P et à l'épaisseur des couches. Le modèle de vitesses des ondes P peut être obtenu à partir des méthodes classiques de sismique (de type réfraction, par exemple) (Reynolds, 1997). Dans la galerie Est-03, trois types de dispositifs sont mises en place. Les caractéristiques de ces dispositifs peuvent être trouvées au **Tableau II.2)**

Tableau II.2. Caractéristiques des dispositifs utilisées pour la prospection sismique dans la galerie Est-03 (Côte & Leparoux, 2007, 2008).

dispositif	source	nombre de géophones	espacement inter-géophones	longueur du profil
1. dispositif court	marteau	30	20 cm	6 m
2. dispositif long	marteau	93	10 cm	9,2 m
3. dispositif long	vibro-acoustique	93	10 cm	9,2 m

Les résultats de ces acquisitions ont montré une cohérence globale des arrivées en ondes de surface mais également deux zones atténuées : une première atténuation en début de profil au niveau des récepteurs situés entre 50 et 80 cm du premier géophone et une deuxième zone atténuée entre 5 et 6 m. Elles peuvent être dues à la présence de fractures (dispositif N°2, **Tableau II.2**). Les premières mesures montrent une amélioration de l'information pour un dispositif long et une source vibro-acoustique (dispositif N°3, **Tableau II.2**). En conclusion, les prospections sismiques menées dans la galerie Est-03 permettent d'explorer le massif grâce aux ondes de surface au travers du revêtement béton.

2.4.4. Galerie Nord-08

A. Caractérisation structurale de l'EDZ

Dans cette galerie, on observe les mêmes types de fracturation existant dans la galerie Est-96 : les fractures tectoniques remplies de calcite, les fractures néoformées (qui apparaissent progressivement après l'excavation) et les fractures de saturation-désaturation (**Figure II.17**). En plus de ces structures, il existe un banc de nodules calcaires qui affleure sur une grande partie de la surface de la galerie. Nous verrons plus loin qu'ils joueront un rôle pour expliquer nos mesures.

Comme pour les autres galeries, les fractures néoformées sont observées essentiellement sur le radier. L'extension de ces fractures est métrique. Leur ouverture est de l'ordre du millimètre. La fracture tectonique principale de la galerie (qui passe par le profil en radier choisi) est d'extension décamétrique avec un remplissage de calcite d'épaisseur millimétrique à centimétrique qui évolue vers une brèche et un broyage de la roche. Cette faille est associée à la compression pyrénéenne il y a 40-50 millions d'années.

Les nodules calcaires se trouvent dans des niveaux qui affleurent partiellement sur le radier et dans certaines parties des parois. En général, ces nodules constituent un banc avec un pendage léger vers le Nord (plans de stratification des argilites). Ces nodules calcaires se sont formés pendant la sédimentation et la diagénèse il y a 180 millions d'années environ. Leur taille est centimétrique voire décimétrique. Du point de vue mécanique, ils sont beaucoup plus rigides que la matrice argileuse. Du point de vue électrique, ils sont clairement plus résistants que l'argilite (on peut même les considérer comme des matériaux isolants électriquement).

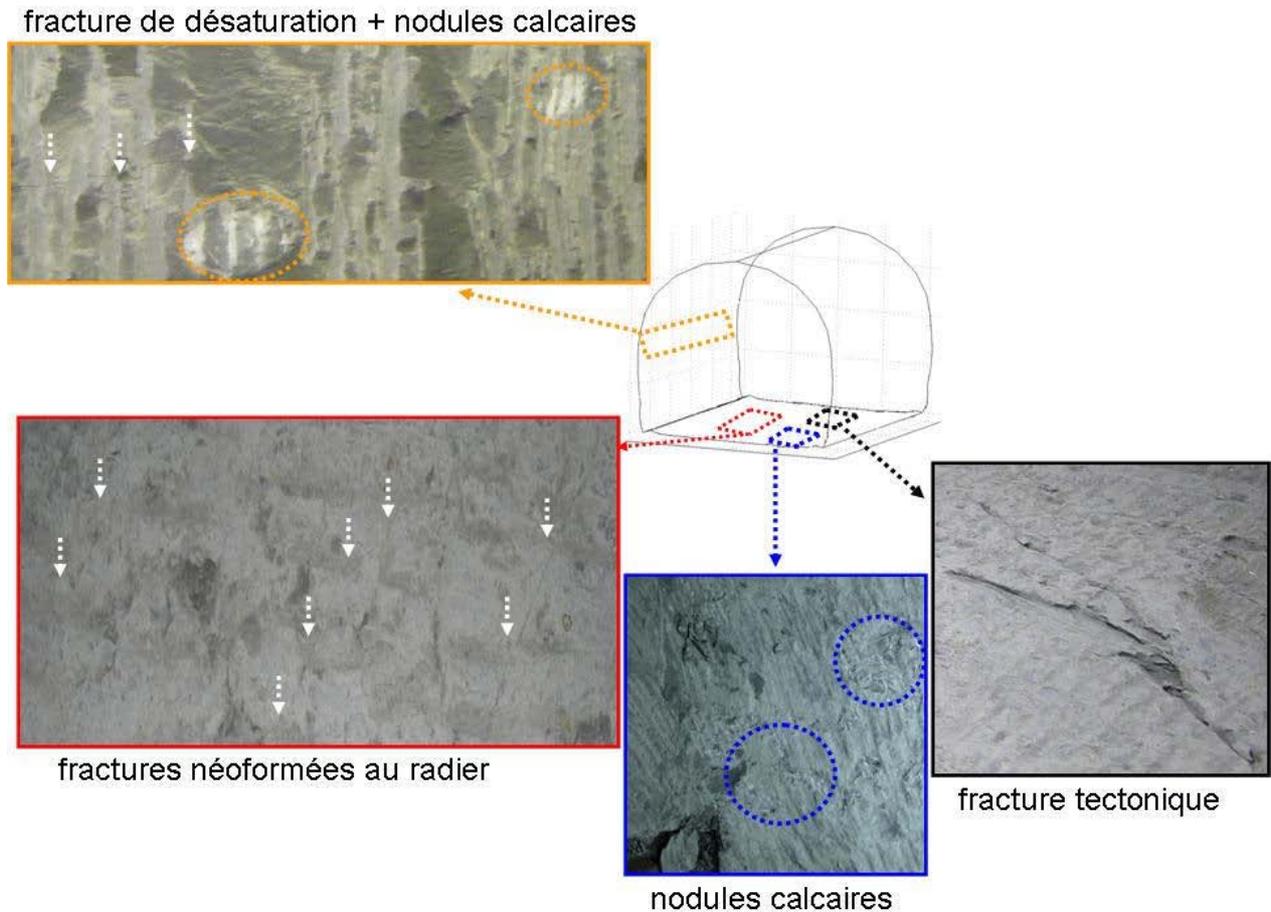


Figure II.17. Hétérogénéités sédimentaires et structurales observées à la galerie Nord-08.

2.4.5. Synthèse de l'EDZ autour des ouvrages de la station expérimentale de Tournemire

En résumé, le processus de création et d'extension de l'EDZ sur le site de Tournemire varie d'un ouvrage à l'autre. En se basant sur les travaux de caractérisation expérimentale du site, [Cabrera \(2005\)](#) ; [Rejeb & Cabrera \(2006\)](#) supposent que pour le cas du tunnel ferroviaire, l'EDZ est liée à une rupture mécanique instantanée et différée alors que pour les galeries, l'EDZ résulte plutôt d'une rupture mécanique différée ([Millard et al., 2009](#)).

De par le mode d'excavation particulier; leurs dimensions et leur orientation selon l'état de contrainte initial, les ruptures mécaniques instantanées n'interviennent pas dans les galeries au moment du creusement. Par contre, quelques mois après la fin de l'excavation, nous observons des ruptures différées liées à la fois aux perturbations hydriques (le processus de désaturation) et aux perturbations mécaniques. Les perturbations hydriques induisent des fractures dites fractures de désaturation prenant place autour des galeries accompagnées par des microfissures observées sur les plans parallèles à la stratification en paroi. Quant aux perturbations mécaniques, ils induisent des fractures dites fractures néoformées se mettant

en place dans les radiers. Plus loin dans le temps, les variations saisonnières (cycles de désaturation-resaturation répétés plusieurs fois suivant l'âge de l'ouvrage) peuvent provoquer une dégradation croissante de la roche induisant des ruptures accompagnées par la création de fractures dites en forme de « pelures d'oignon » comme c'est le cas dans le tunnel ferroviaire (Rejeb & Cabrera, 2006 ; Millard *et al.*, 2009). Sur les Figures II.18 et II.19, nous présentons une synthèse sur l'extension de l'EDZ pour le tunnel et la galerie Est-96 du site de Tournemire.

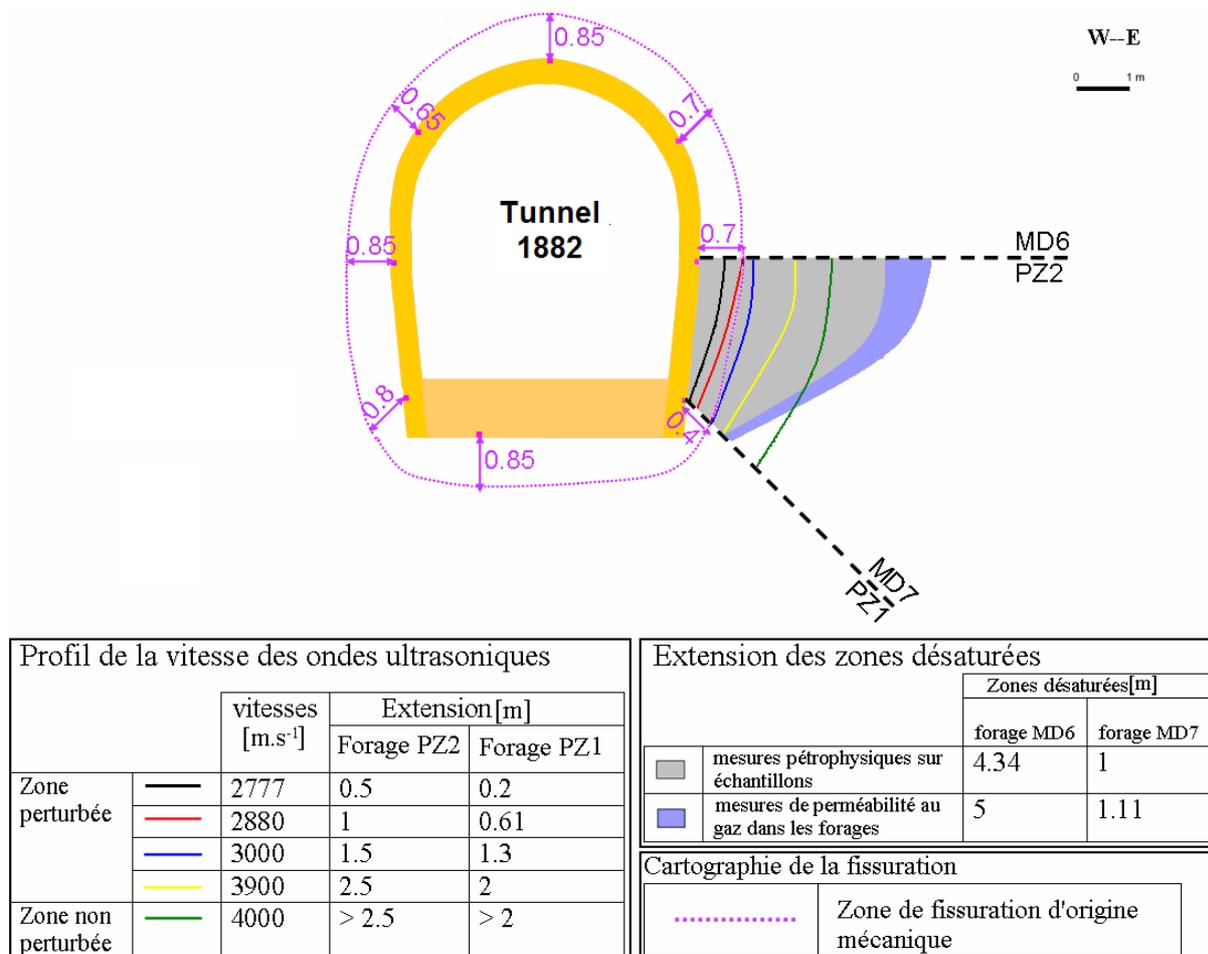
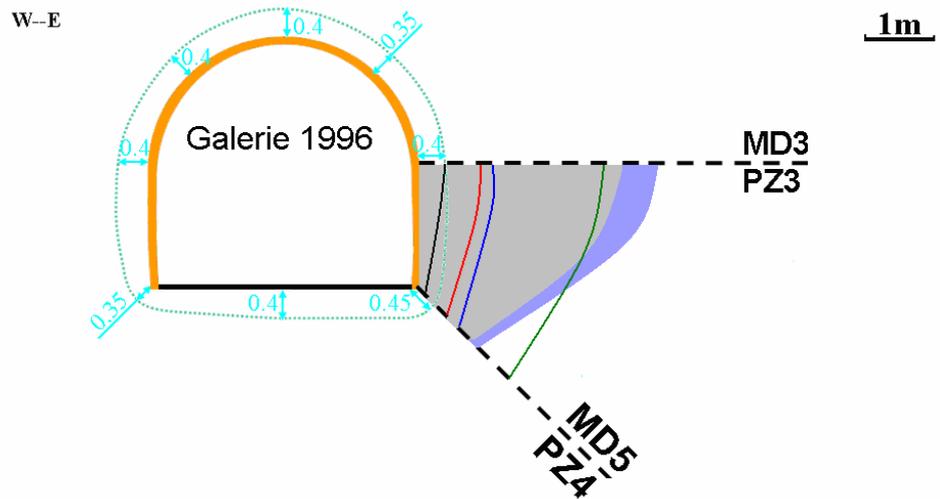


Figure II.18. Synthèse des résultats expérimentaux pour le tunnel de 1882 (Rejeb, 2006).



Zone	vitesses [m.s ⁻¹]	Extension [m]	
		Forage PZ3	Forage PZ5
Zone perturbée	—	0.41	0.16
	—	0.91	0.51
	—	1.01	0.81
Zone non perturbée	—	2	2.21

	Zone de fissuration d'origine hydrique
--	--

		Zones désaturées [m]	
		forage MD3	forage MD5
	mesures pétrophysiques sur échantillons	3	1.09
	mesures de perméabilité au gaz dans les forages	3.52	1.17

Figure II.19. Synthèse des résultats expérimentaux pour la galerie Est 1996 (Rejeb, 2006).

2.5. Applications des méthodes PP à l'échelle de la galerie

2.5.1. Stratégie d'acquisition et méthodologie générale

Dans cette section, après un bref rappel sur nos objectifs et sur les méthodes utilisées, nous présentons nos stratégies d'acquisition (suivant les différents objectifs définis) et la méthodologie générale retenue. Ces éléments permettront notamment de mieux comprendre les travaux préliminaires à l'acquisition proprement dite des données PP en galerie.

❖ Objectif scientifique

Nous rappelons ici que l'objectif principal des campagnes de mesures menées à la station expérimentale de Tournemire, à l'échelle des galeries, vise à examiner la faisabilité d'une caractérisation par tomographie électrique PP (dans les domaines temporel et spectral) et par tomographie de résistivité électrique de la zone endommagée induite par l'excavation. Cette zone présente un réseau de fissures et de microfissures sur une épaisseur variable (décimétrique à métrique) suivant l'amplitude de la sollicitation mécanique et l'âge de la galerie. Plus précisément, il s'agira également d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- Est-ce que les EDZ des galeries d'âge différent et caractérisées par la méthode PP présentent les mêmes caractéristiques géométriques et électriques ?
- Peut-on mesurer des paramètres PP de la roche endommagée lorsqu'un parement en béton existe ?
- Est-ce que les méthodes géoélectriques sont adaptées pour un suivi temporel de la zone désaturée en paroi des ouvrages ?

❖ Choix des méthodes

La stratégie de prospection optée, comprend l'application de la méthode non seulement dans le domaine spectral mais aussi dans le domaine temporel. En outre, en sachant l'utilité et l'importance de coupler les différentes méthodes, la méthode de résistivité électrique est aussi prévue afin d'approfondir ultérieurement les interprétations. Ceci permettra aussi de juger l'apport de la méthode PP par rapport à la méthode de résistivité électrique. Toutes ces méthodes ont été appliquées par la technique de mesure appelée « tomographie » qui consiste à reconstruire le volume d'un objet à partir d'une série de mesures effectuées depuis l'extérieur de cet objet sur une partie de sa surface. Cette technique sera ultérieurement détaillée.

Méthodologie

Les paramètres d'acquisition qui ont été modulés afin d'obtenir le meilleur rapport signal/bruit, de valider et d'étudier leur influence suivant la réponse du milieu sont les suivants :

❖ L'intensité d'injection

Le fait de varier l'intensité d'injection a pour objectif de vérifier la linéarité des phénomènes électriques étudiés (les densités de courant pouvant être très élevées pour des petits écartements inter-électrodes et de forts voltages injectés).

❖ La durée d'injection

Concernant *la durée d'injection* pour les mesures PPT, nous avons pour objectif de définir d'une part, une durée d'acquisition optimale, d'autre part d'étudier la réponse du milieu à différentes durées de créneaux temporels (1 et 2 s) d'injection. Quant la méthode PP est en jeu, la durée d'injection a une influence connue sur les phénomènes de polarisation. Plus la durée d'injection est longue plus le milieu est chargé et quand l'injection du courant est arrêtée, le signal associé aux phénomènes de polarisation est plus accentué.

❖ La réponse des électrodes

Concernant *le type d'électrode*, nous soulignons d'emblée que le signal électrique reçu est un couplage de la réponse du milieu et du système d'acquisition (appareil de mesure, câbles et électrodes) ainsi que du bruit aléatoire. En gardant la même configuration et des paramètres identiques, c'est-à-dire, le même milieu avec le même type d'appareil et câblage, les acquisitions ont été planifiées avec deux types d'électrodes (électrodes impolarisables de type Cu/CuSO₄ et électrodes en acier).

❖ La configuration d'électrodes

Concernant *la configuration d'électrodes*, en méthode électrique, il existe plusieurs arrangements d'électrodes (**c.f. Figure I.2**) qui permettent d'évaluer une résistivité apparente (ρ_a) du milieu à partir des mesures de différences de potentiel induite (ΔV) et du courant injecté (I). La différence parmi ces configurations est liée au positionnement et à l'espacement des électrodes d'injection (A et B) et des électrodes de mesure du potentiel (M et N). Cette variation permet d'étudier le sol avec différentes sensibilités (suivant les directions horizontales et/ou verticales). Les acquisitions électriques (PPT ou PPS) ont été menées en faisant varier la configuration d'électrodes.

Stratégies d'acquisition

❖ Période de la prospection

Une fois que le choix des méthodes et la méthodologie sont clairs, il faut répondre à la question suivante : à *quelle période de l'année* faut-t-il lancer les acquisitions ? Mais pourquoi cette question est si importante ? La réponse est simple. Selon certaines périodes de l'année que cela soit, l'été ou l'hiver, les ordres de grandeurs de certains paramètres physiques varient. Parmi lesquels, on peut citer l'humidité relative. *A priori* en été (période humide), les fractures de désaturation se ferment alors qu'en hiver (période sèche), ces fractures s'ouvrent (Ramambaso, 2001). En connaissant ce type de comportement des hétérogénéités, la première campagne de mesure a été réalisée en juin (période humide) et la deuxième, en fin février (période sèche) dans la même galerie sur les mêmes profils afin d'étudier l'impact des variations saisonnières de l'hygrométrie ambiante sur les propriétés électriques de la roche. Ces deux périodes offraient un contraste d'humidité maximum entre l'air ambiant et la zone saturée. Cette étude sera ultérieurement présentée dans la **section 2.12**. Dans l'objectif d'étudier les caractéristiques géométriques et électriques des galeries d'âge différent, nous avons également choisi la même période de l'année (i.e., en juin).

❖ Choix de l'ouvrage

Où s'installer pour les campagnes de mesure ? Pour répondre à cette question, nous avons utilisé trois critères. Le premier critère fut la simplicité : les prospections dans des galeries avec des radiers et des parois non bétonnées (galerie Est-96 et galerie Nord-08, **Figure II.6**) ont été réalisées dans un premier temps. Dans ce cas, l'argilite est alors directement accessible à partir de sa surface afin de réaliser les mesures électriques.

En outre, afin d'étudier la structure complexe de l'EDZ, il a paru plus sage de choisir des zones de prospections loin des failles majeures (ou secondaires) pour pouvoir localement étudier l'EDZ. Suivant un troisième critère, il paraissait plus pratique de se focaliser sur les zones d'études déjà prospectées afin de profiter et de comparer les résultats obtenus pour des interprétations fiables. Les endroits où il existait déjà des forages ont été aussi privilégiés pour comparer les résultats acquis antérieurement sur ces mêmes forages (diagraphies par exemple).

❖ Géométrie des profils

La prochaine étape dans la définition des stratégies d'acquisition a visé le choix de *la géométrie des profils*. Les profils circulaires dans les galeries sont toujours intéressants puisqu'ils permettent de caractériser l'EDZ tout autour de l'ouvrage en intégrant à la fois les parois verticales et le radier sur des volumes importants. Néanmoins, le traitement (inversion)

des données acquises à partir des profils de ce type de géométrie est assez problématique. Lorsque nous désirons ausculter la structure d'un tunnel (par des mesures en galerie), il est bien difficile d'assimiler l'objet à un milieu simple (demi-espace infini par exemple). Les algorithmes d'inversion traditionnellement utilisés souffrent de fortes limitations quant à leur utilisation sur ce type de structures (Marescot, 2004). Il existe très peu de codes d'inversion numérique en électrique qui tiennent compte des géométries circulaires. Dans la **section 1.7.2**, il a été constaté que parmi le peu d'études réalisées en galeries circulaires, les auteurs ont utilisé soit un logiciel commercial (RES2DInv) avec plusieurs étapes de traitement (c'est-à-dire, en inversant bout par bout les pseudo-sections afin de respecter les hypothèses de l'algorithme e.g, Kruschwitz & Yaramanci, 2004), soit ils se sont orientés vers une modélisation *ad hoc* (Gibert *et al.*, 2006).

Concernant la modélisation des résistivités électriques acquises à partir des profils circulaires, aucun de ces codes actuels ne permet d'inverser la chargeabilité ou la phase pour une telle géométrie. Malgré toutes ces contraintes, nous avons réalisé des profils circulaires dans les galeries en sachant les difficultés associées au traitement. Dans la suite, comme nous le verrons, nous tacherons pour l'inversion d'avoir une approche hybride : le logiciel Res2DInv sera privilégié mais nous explorerons également les potentialités de logiciels plus adaptés et facilement accessibles (e.g., <http://www.resistivity.net/index.php?id=bert>).

Outre les difficultés liées au traitement des profils circulaires, il existe une autre contrainte liée à l'installation de ces profils : la présence des cintres métalliques en fer. Ces structures espacées de 2 m sont présentes pour assurer la stabilité mécanique de la galerie (voir **section 2.3** contexte géotechnique). Au plafond de la partie prolongée, on peut également observer au toit, un grillage métallique pour éviter la chute de blocs liée à l'écaillage de la paroi. La réalisation des mesures à partir d'un profil circulaire (en arc) en présence des cintres métalliques posent deux difficultés :

- Des mesures électriques en présence de corps conducteurs (cintres métalliques, grillage au toit) en contact avec la roche peuvent constituer des chemins préférentiels pour le courant électrique,
- Des mesures électriques avec des courants variables dans le temps peuvent générer des courants induits (phénomène d'induction) dans les corps conducteurs voisins (cintres métalliques, grillage au toit).

Pour essayer de palier à ces difficultés, les recommandations suivantes ont été formulées :

- Localisation du profil en arc en partie basse de la galerie (loin du grillage) et entre deux cintres verticaux (distants de 2 m),

- La partie horizontale des cintres en partie basse devrait être démontée pour les expérimentations.

En dehors des profils circulaires, des profils longitudinaux parallèles à l'axe des galeries sur le radier, ont été ajoutés (longueur : 9,4 m).

❖ **Espacement inter-électrodes**

L'*espacement des électrodes* est un des paramètres qui contrôle la résolution des futures tomographies. Il doit être défini selon la cible de l'étude. Des espacements très réguliers, d'une part permettent d'augmenter la résolution mais d'autre part, ils vont causer des probables erreurs de positionnement et aussi des durées d'acquisition longues surtout si la longueur du profil est importante. Ce paramètre doit donc être optimisé afin d'avoir une durée d'acquisition optimale et une bonne résolution selon la cible recherchée. Dans cette thèse, en sachant *a priori* l'extension de l'EDZ autour des galeries de l'ordre de plusieurs décimètres, un pas d'échantillonnage (distance inter-électrodes) de 20 cm maximum est choisi pour les profils circulaires et longitudinaux. Cette valeur constitue un bon compromis entre d'une part la possibilité de caractériser convenablement la zone cible et d'autre part, la nécessité de garder un caractère ponctuel aux électrodes (le diamètre de l'électrode doit être très petit devant la distance inter-électrodes ; cette hypothèse est nécessaire pour l'inversion ultérieure des données).

❖ **Choix du type d'électrode et l'installation des électrodes**

Afin d'installer sans problème les électrodes, la rigidité importante de la roche nécessite de réaliser des microforages. En effet, nous n'avons pas privilégié des électrodes impolarisables autocollantes de chez Oyo Co. Ces dernières sont d'une part très coûteuses (surtout quand il faut installer un nombre significatif de réseaux d'électrodes pour la tomographie), d'autre part il pourrait y avoir des problèmes de contact électrique entre les électrodes et la roche si la surface de collage n'est pas lisse. En outre, suivant la surface des électrodes autocollantes et l'espacement retenu, l'hypothèse de ponctualité des électrodes ne pourrait ne pas être respectée.

En résumé, il faut réfléchir à un type d'électrode (impolarisable) adaptée à la méthode choisie, avec un diamètre raisonnable en termes de ponctualité, de contact électrique, et de maniabilité (i.e. flexible et souple pour ne pas les casser). Avant tout, bien évidemment, le fonctionnement de ces électrodes doit être fiable. Finalement, nous avons retenu comme solution des électrodes habituellement utilisées *en laboratoire*. Ces électrodes impolarisables sont composées d'une bougie poreuse en céramique (6 mm de diamètre et 25 mm de longueur), un tube plastique, du fil métallique en cuivre. Les bougies poreuses sont collées au

bout du tube plastique rempli d'une solution saturée de sulfate cuivre (Cu/CuSO_4) (Figure II.20).

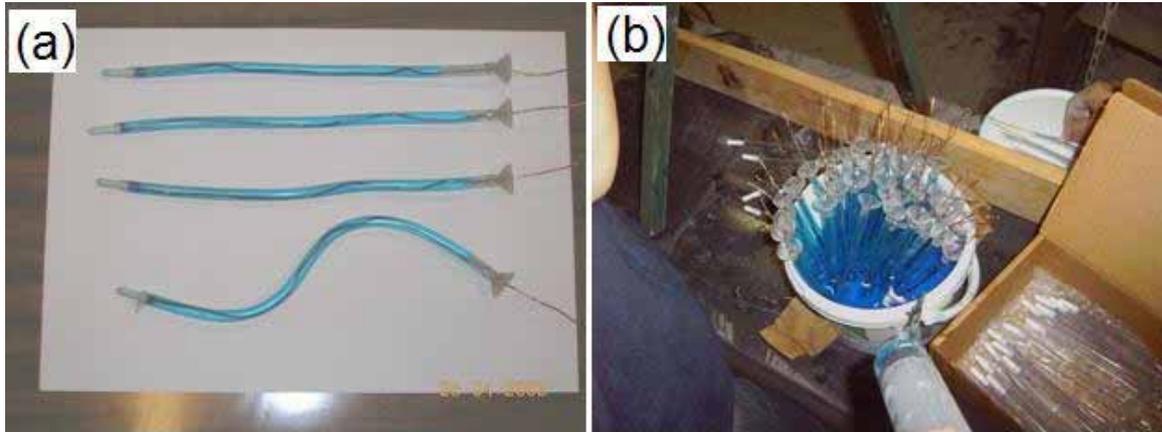


Figure II.20. (a) Les électrodes impolarisables Cu/CuSO_4 de grandes longueurs utilisées au laboratoire, (b) Les électrodes Cu/CuSO_4 réalisées et utilisées *in situ*.

Un avantage important de ces électrodes est la possibilité de les préparer sur place, en galerie. Toutefois, afin d'étudier la différence de réponse de différents types d'électrodes, les électrodes en acier (3x55 mm) ont été aussi utilisées lors de certaines prospections.

Nous soulignons que ce sont ces mêmes électrodes de type Cu/CuSO_4 qui ont été utilisées pour la mesure du potentiel électrique et l'injection du courant. Vu le diamètre des électrodes (6 mm pour les bougies poreuses dont pour un total 9 mm avec le tube en plastique), des microforages de 12 mm de diamètre et de 5 cm de profondeur ont été réalisés dans l'argilite pour les accueillir. Le positionnement des microforages ont été effectués par l'utilisation d'un laser permettant d'assurer avec précision l'alignement et l'espacement de électrodes (précision inférieure au millimètre) (Figure II.21).

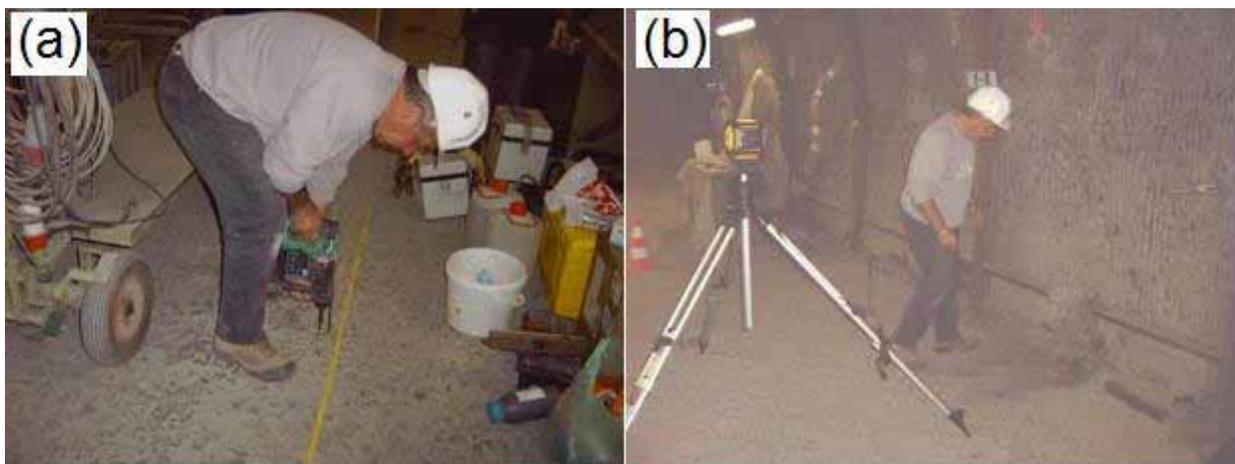


Figure II.21. (a) Réalisation des microforages, (b) Utilisation du laser pour le positionnement des électrodes.

❖ Contact électrode-argilite

Pour la qualité de l'acquisition, il faut aussi s'assurer du bon contact électrique entre la roche et les électrodes. Si le contact électrique n'est pas bon, ceci induit une résistance supplémentaire au circuit électrique de mesure appelée « *résistance de contact (R_c)* » qui défavorise le rapport signal/bruit. Pour cela, l'argile sous forme de poudre (une bentonite à base de montmorillonite sodique) a été saturée avec de l'eau distillée et a été injectée dans les microforages avant l'installation des électrodes (**Figure II.22**).



Figure II.22. (a) Préparation de la bentonite humide à partir d'argile sous forme de poudre, (b) Injection de la bentonite humide dans les microforages.

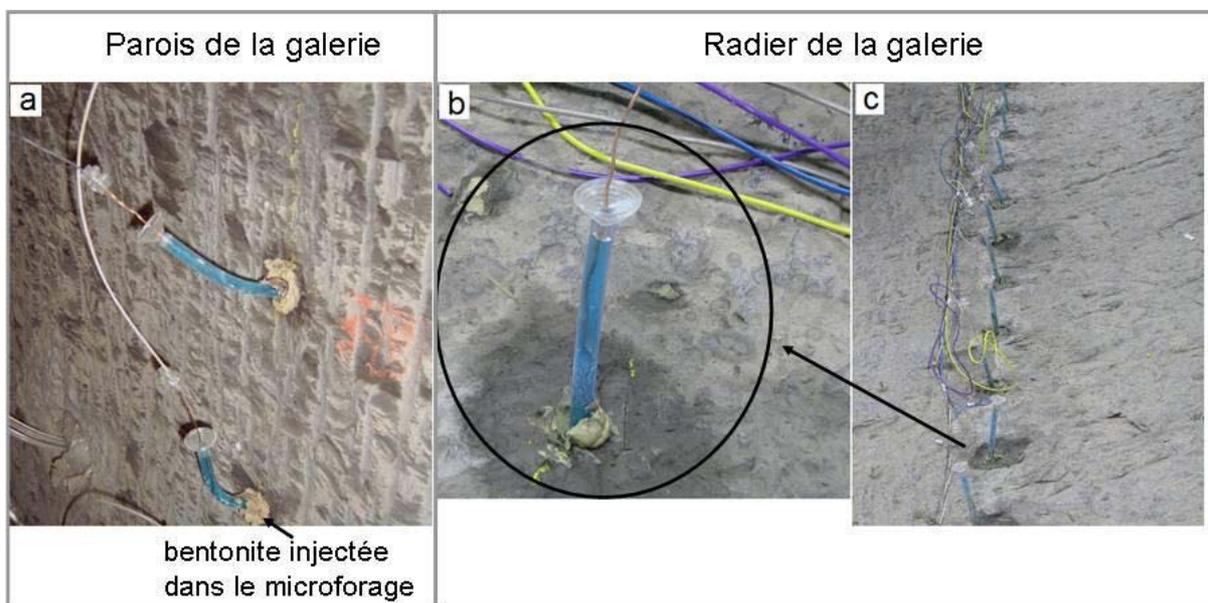


Figure II.23. Électrodes impolarisables de type Cu/CuSO₄ installées (a) en paroi verticale et (b), (c) au radier de la galerie après l'injection de la bentonite dans les microforages.

Après les campagnes d'acquisition, nous avons mesuré la teneur en eau massique et la conductivité de la bentonite préparée. La mesure de la teneur en eau est faite à partir du séchage de 30 g d'échantillon (préparé sur le site), pendant 24 heures, sous 150 °C. La teneur en eau massique de la bentonite fut comprise entre 86 % et 88 %. La mesure de la conductivité de la bentonite effectuée avec un conductivimètre Multi 340i WTW a indiqué une valeur moyenne de 86 mS/m (~11,55 Ω .m).

❖ **Appareillage**

Nous avons utilisé les appareils de mesures suivant en fonction de la méthode :

- Pour les mesures de Polarisation Provoquée Temporelle et de résistivité électrique, le « Syscal Pro » de chez Iris Instruments (<http://www.iris-instruments.com>), a été privilégié,
- Pour les mesures de Polarisation Provoquée Spectral, le « SIP FUCHS II » de chez Radic Research (Niederleithinger *et al.*, 1997) (<http://www.radic-research.homepage.t-online.de/default.html>) » et le SECR-1 (Spectral-Electrostatic-Complex-Resistivitymeter : prototype développé à l'UMR Sisyphe) ont été utilisés.

Tableau II.3. Synthèse de la méthodologie appliquée dans les galeries non-bétonnées.

Méthodes	PPT, PPS, ERT
Appareils de mesure	Syscal Pro, SIP FUCHS, SECR-1
Choix de l'ouvrage (non bétonnée)	galerie Est-96, galerie Nord-08
Périodes de prospection	Juin 2008, Février 2009
Géométries des profils	profils en arc, profils longitudinaux (9.4 m)
Installation des électrodes	Microforages (diamètre : 12 mm profondeur : 5 cm)
Espacement inter-électrode	20 cm
Contact « électrode-argilite »	injection de bentonite humide
Types d'électrodes	électrodes de type Cu/CuSO ₄ (diamètre : 6 mm) électrodes en acier (diamètre : 3 mm longueur : 55 mm)
Configurations d'électrodes	Wenner- α , Wenner-Schlumberger, Dipôle-Dipôle
Tension d'injection	100 V, 50 V, 25 V, 12 V
Durées d'injection	1 s, 2 s

PPT : Polarisation Provoquée Temporelle

PPS : Polarisation Provoquée Spectrale

ERT : Electrical Resistivity Tomography (Tomographie de Résistivité Electrique)

❖ **Technique de la tomographie électrique (2D)**

La technique de la tomographie électrique ou imagerie électrique a pour objectif la reconnaissance dans plusieurs dimensions de l'espace, des résistivités d'un milieu. Elle permet d'obtenir une "image électrique" du sous-sol. Dans cette image, la répartition des résistivités varie verticalement (axe des Z) et horizontalement (axe des X) le long du profil. On suppose que la résistivité ne change pas dans la direction perpendiculaire au profil (axe des Y) d'où le terme d'imagerie 2D (c'est pour cette raison que les profils électriques sont généralement placés perpendiculairement au corps allongés à étudier).

Un dispositif de tomographie électrique 2D est constitué par une ligne pré implantée à la surface du sol de N électrodes. Les électrodes sont équidistantes d'un écart a . Ces électrodes sont reliées à un système d'acquisition (appareil de mesure) dans lequel une séquence de mesures (i.e., une séquence de quadripôles électrique) est programmée.

La séquence de mesures consiste à sélectionner 4 électrodes (quadripôle) et à varier la position et la distance entre elles. Parmi les 4 électrodes, une paire sert à l'injection du courant (électrodes d'injection) et l'autre paire à la mesure du potentiel (électrode de mesure du potentiel).

L'incrémentation de la distance inter-électrode permet d'accroître la profondeur d'investigation. La profondeur d'investigation dépend également de la distribution des résistivités dans le milieu et du dispositif électrique utilisée. Le nombre d'électrodes utilisé pour une mesure, ainsi que leur agencement définissent le dispositif électrique encore appelé configuration d'électrodes utilisée. Plusieurs dispositifs ou configurations sont disponibles pour avoir la réponse du sous-sol selon l'objectif de l'étude et suivant les différentes sensibilités désirée (verticale et/ou horizontale). Nous pouvons distinguer les dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle etc. **(Figure I.2)**.

Les séquences de mesures se préparent selon le dispositif choisi et selon la problématique de l'étude. Les séquences peuvent être préparées à partir des logiciels disponibles. Parmi ces logiciels on peut citer *Electre II* (support *Iris Instruments*) ou *X2ipi* (<http://geophys.geol.msu.ru/x2ipi/x2ipi.html>). Ces logiciels permettent de simuler la position de chaque quadripôle suivant un profil avec un espacement inter-électrodes différent. Ces deux logiciels ont été utilisés lors de la préparation de nos séquences de mesures. Une fois la séquence prête, celle-ci est transférée sur l'appareil de mesure (résistivimètre). Le résistivimètre possède un microprocesseur et un système de multiplexage **(Figure II.24)**.

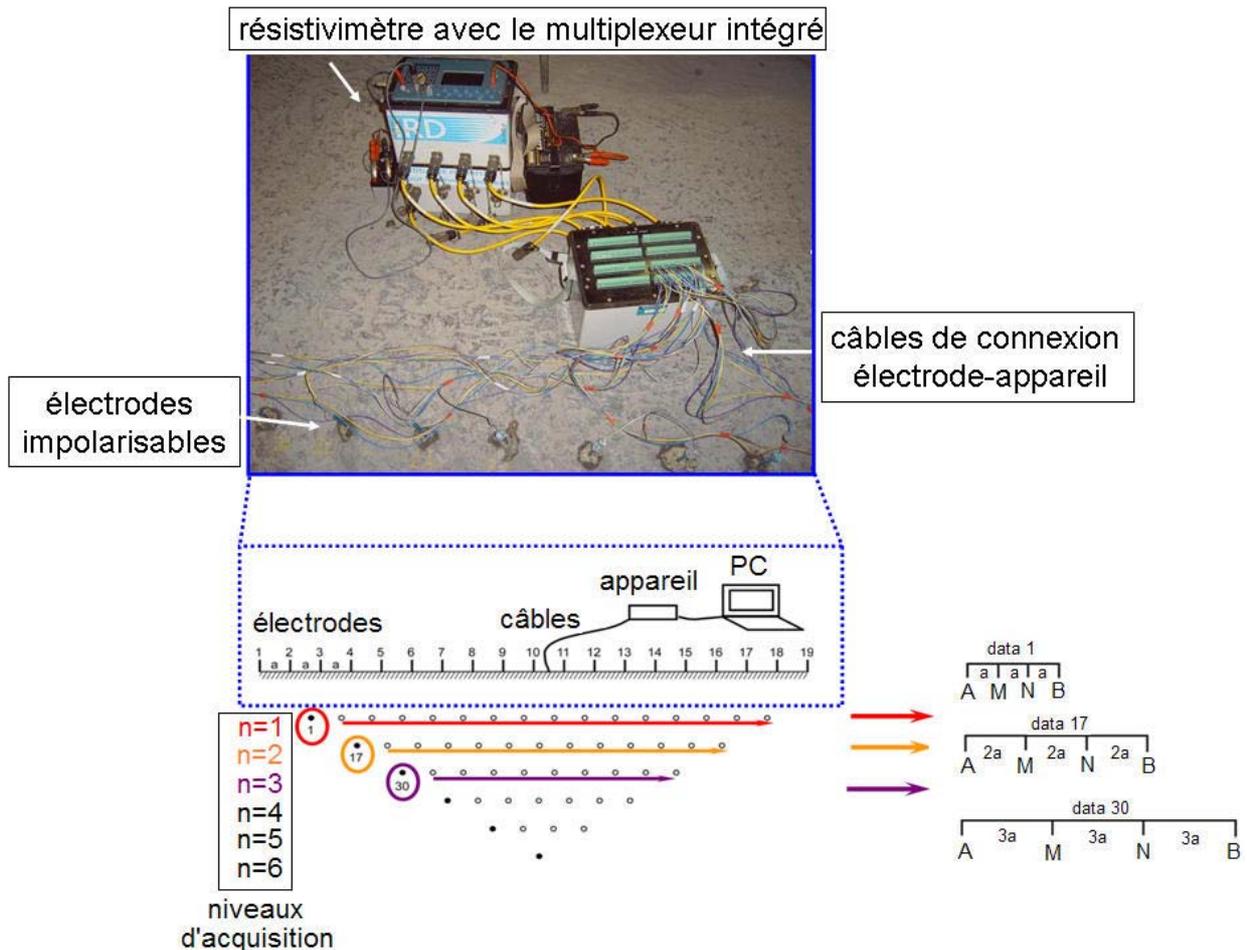


Figure II.24. Principe de la tomographie 2D pour une acquisition avec le dispositif Wenner- α (appareil de mesure Syscal Pro). Les points illustrent des positions spatiales des données acquises.

Le système de multiplexage permettra au résistivimètre d'interroger de manière séquentielle une série prédéfinie de quadripôles suivant le programme de séquences prédéfinies. Les données ainsi acquises sont stockées numériquement dans le résistivimètre (Loke, 2001). Ces données qui représentent des résistances électriques vont subir deux phases de traitement que nous présentons maintenant.

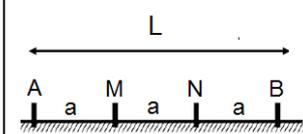
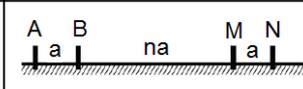
- **1^{ère} étape de traitement des données de tomographie : pseudosections**

La 1^{ère} étape de la phase d'interprétation consiste en la construction d'une **pseudosection**. La pseudosection est une carte interpolée des valeurs de *résistivités apparentes*. Ces résistivités apparentes ont été calculées à partir des résistances mesurées et des valeurs des coefficients géométriques des quadripôles correspondant.

Sur la pseudosection, les résistivités apparentes sont reportées selon certaines conventions. Les points de mesure sont reportés à l'aplomb du centre du dispositif et à une ordonnée proportionnelle à l'écartement entre les électrodes de mesure. La position en X étant

toujours au centre du dispositif (pour un dispositif symétrique), le choix de la position en Z du pseudopoint est plus problématique et a fait l'objet de nombreuses recherches dans le passé. En effet, la convention choisie pour l'axe des Z est liée à l'étude de la *profondeur d'investigation*, notion complexe à appréhender en géophysique de subsurface. La profondeur d'investigation est souvent définie comme la profondeur dans le sous-sol à laquelle une couche de faible épaisseur exprime sa contribution maximale au signal total mesuré en surface (Evjen, 1938). Roy & Apparao (1971) ; Roy (1972) ; Apparao & Rao (1974) ont calculé les contributions d'un milieu homogène et isotrope au signal mesuré. Ce calcul est fait à partir d'une solution de la fonction de sensibilité ou dérivée de Fréchet (McGillivray & Oldenburg, 1990) pour plusieurs dispositifs. Edwards (1977) a développé la notion de profondeur effective z_e (ou profondeur médiane) en se basant sur le travail de Roy & Apparao (1971). Cette profondeur est celle à laquelle la portion de terrain située au dessus de cette limite, a la même influence que la portion de terrain située en dessous. Le **Tableau II.4** rassemble les résultats de certaines études pour le calcul de la profondeur d'investigation pour différents dispositifs.

Tableau II.4. Profondeur d'investigation pour les dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle d'après Roy & Apparao (1971) et Barker (1989).

Dispositifs		Prof. d'investigation	
		Roy (1971)	Barker (1989)
Wenner- α		0.11L	0.17L
Dipôle-Dipôle		0.195L	0.25L

Toutes ces études réalisées concernent évidemment des acquisitions à partir d'une surface plane 2D. Quant à la représentation des pseudosections des données acquises (résistivité ou chargeabilité apparente) à partir d'un profil en arc, nous avons défini une convention simple. La **Figure II.25** illustre le positionnement des pseudopoints selon différents écartements pour le dispositif Wenner- α . Lors d'une séquence de mesures, si les quatre électrodes (A1, M1, N1, B1) se trouvent toutes sur le même segment de la paroi verticale ou du radier, la profondeur du pseudopoint est attribuée à la demi-distance de l'écartement inter-électrode.

Si les électrodes se trouvent dispersées dans différentes parties ou segments de la paroi verticale et du radier, la profondeur du pseudopoint est calculée suivant deux étapes.

Prenons l'exemple de la **Figure II.25** pour être claire : deux électrodes (A2, M2) sont localisées sur la paroi verticale et deux autres électrodes (N2, B2) se situent sur le radier. Dans une première étape, la distance entre A2 et B2 est calculée. Ensuite dans une deuxième étape, nous traçons la médiatrice au segment [A2, B2]. La « profondeur » du pseudopoint est alors positionnée sur cette médiatrice, vers la roche, à la demi-distance entre les électrodes A2 et B2.

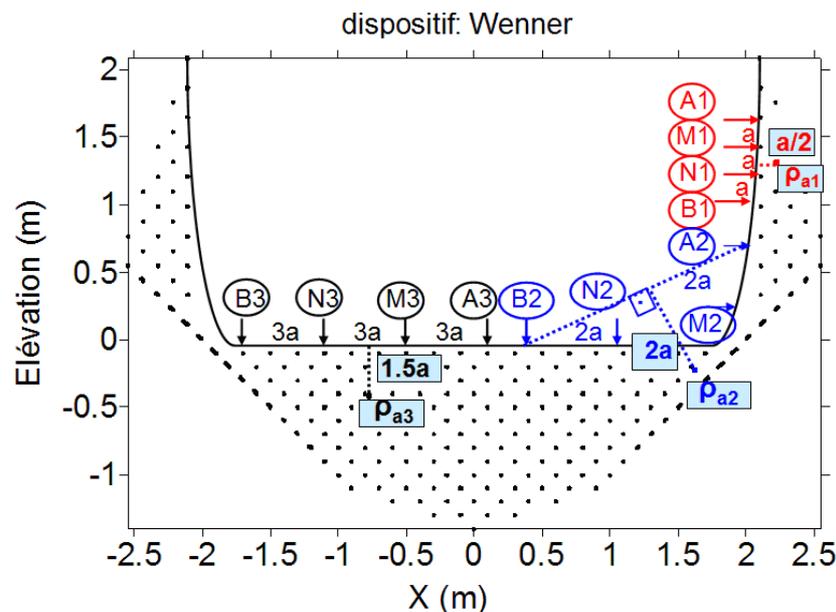


Figure II.25. Convention utilisée pour la représentation des résistivités et chargeabilités apparentes (PPT) sur les profils en arc concernant le dispositif Wenner- α (la distribution des données est issue des séquences utilisées à la galerie Est-96).

Finalement on a vérifié sur cette convention qu'elle induisait une distribution symétrique des pseudopoints pour le dispositif Wenner.

- **2^{ème} étape de traitement des données de tomographie : inversion**

Même si pour une interprétation préliminaire qualitative, les pseudosections sont intéressantes, elles restent néanmoins limitées pour avoir une information précise de l'organisation spatiale des propriétés électriques du sous-sol. Afin d'obtenir une image représentative des variations de résistivité en fonction de la profondeur, il est nécessaire de passer par un processus d'**inversion**. Celui-ci constitue la 2^{ème} étape de traitement des données de la tomographie électrique.

Dans le processus d'inversion, on cherche un modèle mathématique qui va fournir des valeurs calculées les plus proches possibles des valeurs mesurées. Ce modèle est une représentation mathématique idéalisée du sous-sol défini par un certain nombre de paramètres (i.e., ici la résistivité, la chargeabilité ou tous autres paramètres PP).

Le processus d'inversion se fait suivant un processus itératif qui tente de minimiser l'écart entre les données mesurées et les données recalculées par modélisation directe. La modélisation directe qui établit le lien mathématique entre les paramètres et la réponse du modèle utilise les méthodes de type différences finies (Dey & Morrison, 1979a,b) ou éléments finis (Silvester & Ferrari, 1990).

Ce processus itératif est géré par des méthodes d'optimisation. Parmi ces méthodes, celle des moindres carrées (DeGroot-Hedlin & Constable, 1990 ; Sasaki, 1992) est la plus connue et utilisée. Le modèle de départ (généralement un milieu homogène) est modifié à chaque itération jusqu'à ce que les données mesurées et calculées atteignent une concordance acceptable. L'inversion peut être aussi arrêtée si on n'observe pas d'amélioration significative (généralement le cas au bout de 3 à 5 itérations). A la fin de l'inversion, le résultat obtenu permet de définir la présence et la vraie position d'hétérogénéités plus ou moins résistantes ou conductrices dans le milieu.

D'un point de vue pratique, le résultat obtenu est une coupe du sous-sol en *résistivités calculées* ou qualifiée encore de *résistivités interprétées*, donnant une image plausible de la répartition des propriétés électriques réelles du sous-sol. Nous présentons le modèle sous forme de blocs ou sous une forme lissée (contourage des valeurs des blocs).

Pendant le processus de calcul, nous adoptons généralement comme critère de convergence, la valeur de l'erreur quadratique moyenne (RMS : Root Mean Square) entre les données expérimentales et de la réponse du modèle mise à jour à chaque itération. Il est important d'indiquer ici que l'erreur RMS a une signification purement mathématique : une valeur de RMS très faible ne signifie pas toujours que la solution est géologiquement correcte. En outre, il faut noter qu'il existe une infinité de solutions possibles (problèmes d'équivalences classiques en géophysique). C'est pour cela, afin d'assurer une bonne inversion qu'il faut aussi se baser sur des connaissances *a priori* sur le milieu d'étude. Nous présentons dans le **Tableau II.5**, les logiciels d'inversion classiquement utilisés pour la méthode PP.

Tableau II.5. Synthèse des logiciels d'inversion des données de résistivités et de PP (chargeabilité, phase) dans les domaines temporel et spectral.

	Inversion 2D	ERT	PPT	PPS
Res2Dinv : Loke & Barker (1996)	√	√	√	√
Kemna (2000)	√			√
BERT : Günther <i>et al.</i> (2006)	√	√		
Loke <i>et al.</i> (2006)	√			√

le cas d'une inversion simultanée, à chaque itération, les données de résistivités sont inversées, suivies pour la même itération des données de chargeabilité. Dans le cas d'une inversion séquentielle, l'inversion des chargeabilités apparentes démarre une fois que l'inversion des résistivités apparentes est terminée. Le modèle final des résistivités calculées est utilisé comme modèle de départ pour l'inversion des données de chargeabilité. Il est conseillé d'utiliser cette option si les résistivités apparentes ne sont pas bruitées (Loke, 2001).

L'inversion des chargeabilités sous Res2DInv se base sur les travaux d'Oldenburg & Li (1994). Le logiciel peut inverser les différents paramètres liés à la polarisabilité (chargeabilité, PFE, MF, phase) acquis par la méthode PP dans les domaines (i) temporel, et (ii) fréquentiel. Lors du processus d'inversion, il est important de souligner que les valeurs de PP d'entrée à inverser dans le domaine fréquentiel, sont d'abord transformées en chargeabilités temporelles. L'inversion se fait à partir de ces dernières. Ensuite les valeurs inversées sont retransformées en paramètre PP d'entrée. Les équations de transformation sont fournies par Van Voorhis *et al.* (1973) et Nelson & Van Voorhis (1973) à partir de l'équation II.2. L'équation II.2 (modèle) est proposée pour définir le spectre d'amplitude et de phase observée lors d'une prospection électrique en domaine minier. Les paramètres de PP (PFE, phase, chargeabilité) peuvent être calculés à partir de ce modèle grâce aux équations II.3 à II.5. Ce modèle est aussi connu comme le modèle de phase constante (Weller *et al.*, 1996) (voir aussi la section 1.5.1 de ce mémoire).

$$\rho(\omega) = K(j\omega)^{-b} \quad \text{équation (II.2)}$$

$$PFE = (10^b - 1).100 \quad \text{équation (II.3)}$$

$$\varphi = 1571b \quad \text{équation (II.4)}$$

$$m_t = 1320b \quad \text{équation (II.5)}$$

Le paramètre *PFE* exprime l'effet de pourcentage fréquentiel, φ exprime la phase, m_t la chargeabilité temporelle, b est suggéré comme une mesure de la polarisation (Weller *et al.*, 1996). C'est un paramètre positif compris entre 0-0,1 et K est une constante.

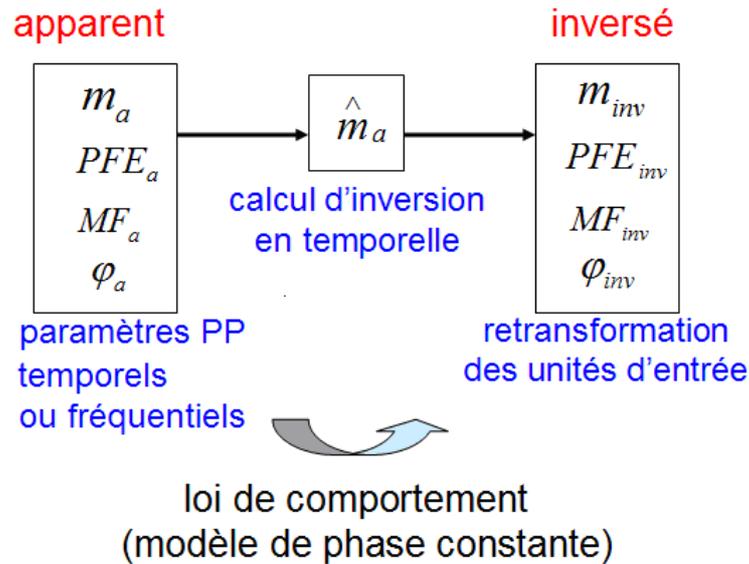


Figure II.27. Processus d'inversion des paramètres PP apparents temporels ou fréquentiels avec Res2DInv.

Le **Tableau II.6** résume les paramètres d'inversion utilisés pour la plupart des cas des traitements effectués avec Res2DInv. Pour faciliter la lecture, les erreurs RMS obtenues seront indiquées sur les figures des modèles inversés.

Tableau II.6. Paramètres de maillage et d'inversion utilisés lors des traitements avec Res2DInv.

Paramètres de maillage et d'inversion	Choix retenu
finite mesh grid size	4 nodes
finite element method	finite element with triangular elements
mesh refinement	finer mesh
number of iterations	4
inversion method	Smoothness-constrained least-squares inversion
Jacobian matrix calculation	recalculate the Jacobian matrix for all iterations
number of iteration to recalculate Jacobian matrix	same number as iteration
fast calculation of Jacobian matrix	no
optimisation method	standard Gauss-Newton
model refinement	model cells with widths of half the unit spacing
IP inversion method	Invert resistivity/IP data concurrently

2. Logiciel d'inversion en électrique : BERT (Boundless Electrical Resistivity Tomography)

Précédemment, nous avons présenté un des logiciels d'inversion des données électriques le plus utilisé (Res2DInv). Ce logiciel est assez commode quand la surface d'acquisition est relativement simple en termes de topographie. Pour des surfaces

d'acquisition de géométrie complexe, p.ex. un profil en arc, l'utilisation de ce dernier est assez limitée. Par conséquent, nous avons cherché à tester un logiciel d'inversion qui respecte la complexité de la géométrie d'une galerie souterraine.

Le logiciel BERT (Boundless Electrical Resistivity Tomography), développé par [Günther et al. \(2006\)](#) permet d'inverser les données de tomographie de résistivité pour une géométrie quelconque. La géométrie peut être en 2D ou en 3D, avec ou sans topographie, en domaine fermé ou ouvert. La première étape de l'inversion, c'est-à-dire, la modélisation directe et l'identification des paramètres sont calculés par la méthode des éléments finis. L'inversion se fait à l'aide de maillages non-structurés dont l'avantage est d'une part la flexibilité de la taille des éléments dans le modèle et d'autre part, le respect de la complexité de surface.

Alors que les autres logiciels utilisent des algorithmes de maillage composés de deux étapes, le maillage dans BERT se déroule en trois étapes (**Figure II.28**) :

1. Dans une première étape, le maillage paramétrique, à partir d'un maillage grossier, les éléments pour lesquels leurs résistivités doivent être définies, est précisé. On décrit de cette manière le domaine de la modélisation et/ou l'inversion. L'extension latérale du modèle est caractérisée en fonction de l'agencement des électrodes. La région maillée est élargie de quelque fois la distance inter-électrode.
2. Dans une deuxième étape, le calcul du modèle directe est effectué en utilisant la méthode du potentiel secondaire ([Coggon, 1971](#)). Cette fois-ci le maillage est globalement raffiné et prolongé (afin d'éviter les effets des conditions aux limites) pour le calcul du modèle directe. Cette approche permet de réduire le temps de calcul par rapport aux autres algorithmes ayant deux étapes de maillage pour lesquels ce calcul se déroule à partir d'un maillage fin.
3. Dans une troisième étape, à partir d'un maillage très fin raffiné autour des électrodes, les potentiels primaires sont calculés pour un terrain homogène ($\sigma = 1 S/m$) avant le calcul du modèle direct.

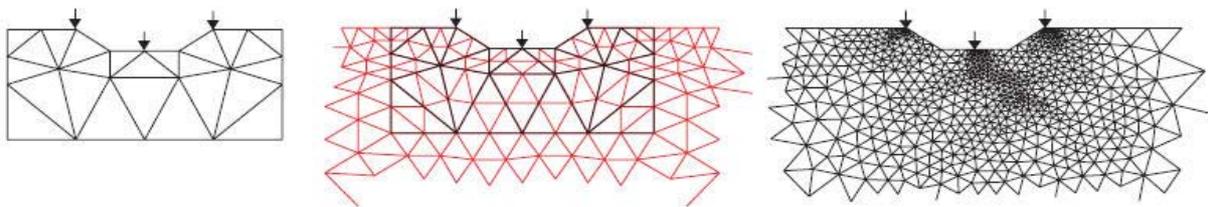


Figure II.28. Trois étapes de maillage pour une discrétisation 2D : (à gauche) maillage paramétrique, (au centre) maillage du champ secondaire et (à droite) maillage du champ primaire ([Günther et al., 2006](#)).

La **Figure II.29** résume le schéma de l'inversion de BERT. Tout d'abord, la construction de maillages en trois étapes se fait en utilisant la topographie (maillage paramétrique, maillage du champ secondaire et primaire). Au début du processus de l'inversion, les potentiels primaires sont calculés à partir du maillage du champ primaire (maillage non-structuré et raffiné localement autour des électrodes) pour un milieu homogène ($\sigma = 1 S/m$). Ce calcul offre les potentiels de référence. Tous ces potentiels primaires calculés sont interpolés sur le maillage secondaire où le calcul du modèle direct est réalisé. Auparavant, nous déterminons les coefficients géométriques correspondant à la topographie et donc les résistivités apparentes, ainsi que la matrice de sensibilité pour un milieu homogène isotrope. Le calcul du modèle direct est rectifié à chaque itération jusqu'à obtenir une concordance satisfaisante entre les données et le modèle calculé. Pour plus de détails sur la procédure de la modélisation directe et de l'inversion, le lecteur est invité de se référer à [Günther et al. \(2006\)](#) et [Rücker et al. \(2006\)](#).

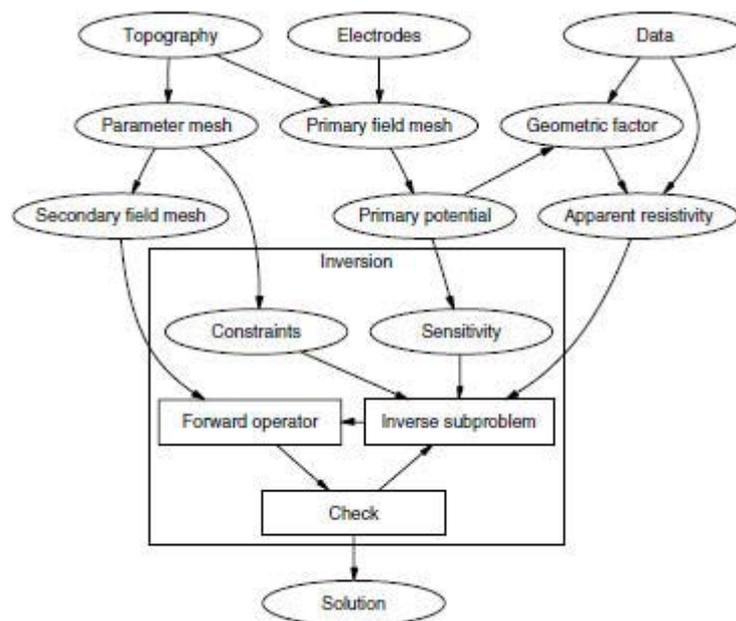


Figure II.29. Etapes d'inversion. La construction des mailles est réalisée à partir de la topographie. Le potentiel primaire définit les facteurs géométriques et les résistivités apparentes. Le maillage secondaire permet de calculer le modèle direct. Le cadre en noir représente les niveaux du calcul du modèle direct et de l'inversion. Ce calcul continue jusqu'à ce que le résultat soit satisfaisant ([Günther et al., 2006](#)).

2.5.2. Etudes méthodologiques

Dans cette partie, on présente les travaux méthodologiques menés *in situ* dans la station expérimentale de Tournemire sur les profils au radier des galeries Est-96 et Nord-08. Ces mesures de nature méthodologique ont été effectuées dans les deux domaines temporel et spectral. Elles avaient pour objectif de :

- Vérifier la qualité du signal à partir de différentes intensités (ou tensions) d'injection,
- Définir un temps d'acquisition et la réponse optimale du terrain à partir des différents créneaux d'injection,
- Etudier la réponse de deux différents types d'électrodes.

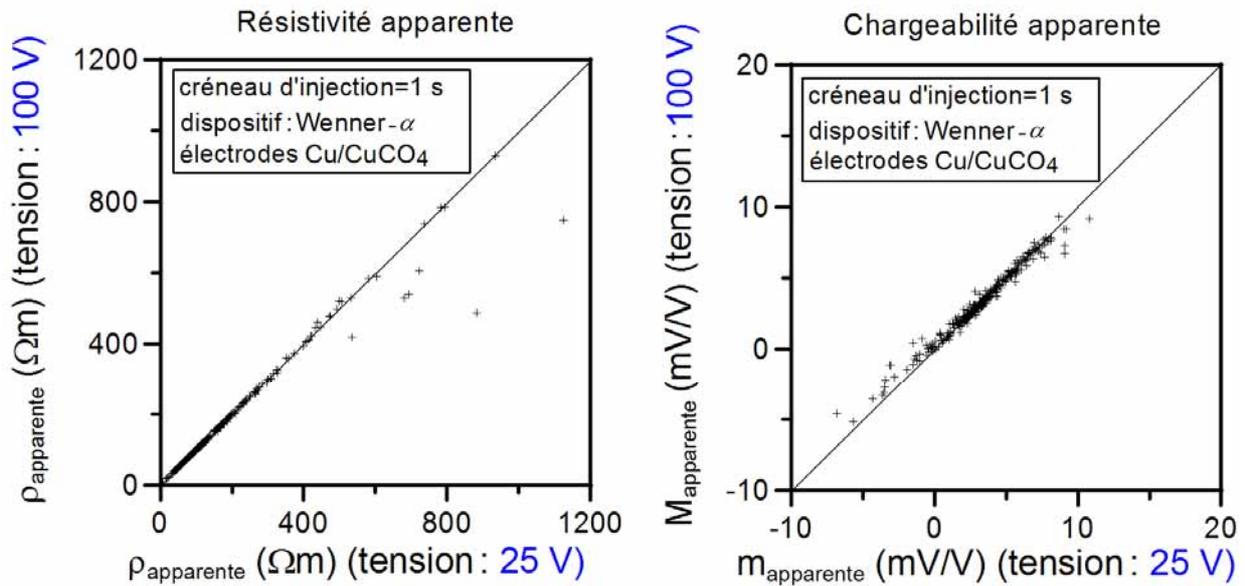
Les travaux méthodologiques se sont déroulés parfois *avant* les acquisitions géophysiques proprement dites ce qui a permis d'orienter ultérieurement nos travaux, parfois *après* les prospections géophysiques afin de vérifier les résultats obtenus. Lorsque des milieux complexes comme les argilites sont mis en jeu, il est important de passer par ce type de mesures pour mieux comprendre l'influence des différents paramètres d'acquisition sur la réponse obtenue. Une compréhension bien établie de la réponse de milieu en fonction de différentes valeurs d'un paramètre d'acquisition peut clarifier ultérieurement les interprétations. Ainsi, ces travaux de nature méthodologique sont importants à nos yeux car ils vont permettre d'assurer la fiabilité de nos mesures et ainsi asseoir solidement nos futures interprétations.

2.5.2a. Etude de l'impact de la tension de sortie : 12 V, 25 V, 50 V, 100 V

Si la tension de sortie n'est pas correctement choisie, le signal émis peut soit saturer ou au contraire ne pas être assez fort en amplitude. En outre, le fait de mal choisir l'intensité d'injection, peut induire des situations où la linéarité des phénomènes électriques n'est plus assurée : la loi d'Ohm n'est plus respectée. Sur le terrain, une manière simple de contrôler l'impact de la tension de sortie, consiste à observer les courbes de décroissances visualisées sur l'écran du résistivimètre (si celui-ci le permet bien évidemment). L'étude de l'intensité d'injection, contrôlée par la tension de sortie du résistivimètre (ici du Syscal Pro) a été réalisée pour quatre valeurs : 12 V, 25 V, 50 V et 100 V.

La **Figure II.30** compare les résistivités et chargeabilités apparentes obtenues pour les valeurs de 25 V et 100 V sur le profil au radier de la galerie Est-96 et celles obtenues pour 12 V et 50 V sur le profil au radier de la galerie Nord-08 pour l'ensemble d'une séquence en dispositif Wenner- α et en utilisant les électrodes impolarisables de sulfate de cuivre. On remarque que pour toutes les tensions d'injection utilisées, les réponses obtenues sont proches.

Galerie Est-96 (juin 2008)



Galerie Nord-08 (juin 2009)

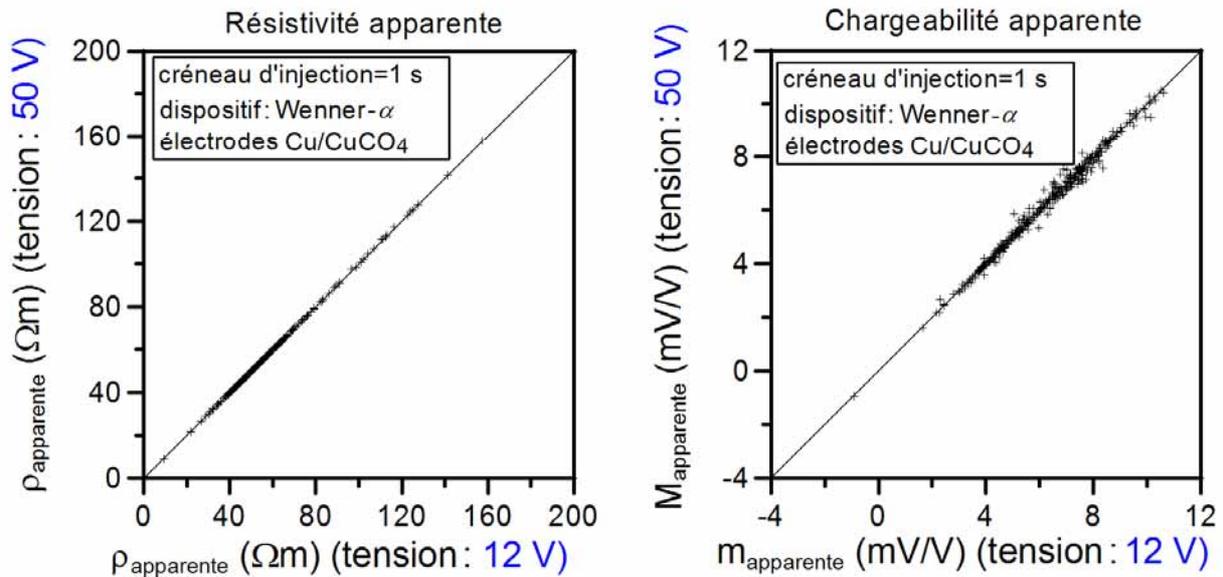


Figure II.30. Comparaison des résistivités et chargeabilités apparentes acquises pour les différentes intensités de tension de sortie (12 V, 25 V, 50 V, 100 V) sur les profils au radier à la galerie Est-96 et à la galerie Nord-08 à partir des électrodes impolarisables (Cu/CuSO₄) avec le dispositif Wenner.

Ces résultats confirment que les anomalies obtenues sur les sections de chargeabilités inversées, ultérieurement présentées, sont indépendantes de l'intensité d'injection (**Figure II.30**) (correspondant à la tension de sortie de 100 V). Même si la valeur de 100 V de tension de sortie semble satisfaisante dans notre cas, la valeur de 50 V a été privilégiée pour les acquisitions ultérieures. Cette considération a été particulièrement appliquée à la galerie Nord-

08 afin d'éviter des problèmes de saturation de signal dans des milieux plus conducteurs (par exemple, une galerie moins endommagée, milieu moins résistant comme nous le verrons).

2.5.2b. Etude de l'impact du temps d'injection : 1 s et 2 s

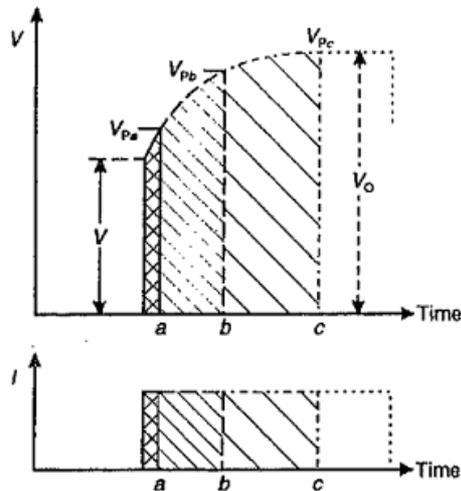


Figure II.31. Augmentation du potentiel résiduel (de V_{pa} à V_{pc}) avec l'augmentation du temps d'injection (de a à c) (Reynolds, 1997).

L'intérêt de faire varier la durée du créneau d'injection, peut être mieux comprise si la **Figure II.31** de gauche est étudiée. Sur cette figure, le paramètre V_0 définit la tension maximum mesurée lors de l'injection pour une prospection PP. Le paramètre V représente la tension liée à l'injection, et V_{pa} , V_{pb} , V_{pc} signifient les tensions résiduelles obtenues une fois le courant coupé pour différentes durées. Ces tensions résiduelles sont évidemment liées à la polarisation du milieu.

On remarque ainsi que l'amplitude du signal de polarisation, sera d'autant plus importante que la durée d'injection est grande.

C'est pour cette raison qu'afin de mieux souligner les phénomènes de polarisation du sous-sol étudié, outre les acquisitions d'une durée de 1 s, un créneau d'une durée de 2 s a été aussi testé. La **Figure II.32** représente les résistivités et chargeabilités apparentes obtenues sur le profil au radier de la galerie Est-96 avec les dispositifs Wenner- α et Wenner-Schlumberger pour des créneaux d'injection de 1 et 2 s. Pour les deux types de dispositifs, la réponse est très proche pour les deux durées d'injection. Du coup, les acquisitions suivantes ont été effectuées avec un créneau de 1 s.

Cette étude n'a pas été approfondie par des tests avec des créneaux d'injection plus longs i.e., 4 ou 8 s. En effet, pour un profil au radier de 9,40 m long avec 48 électrodes espacées de 20 cm (p.ex. 360 quadripôles), le temps d'acquisition pour une durée d'injection de 2 s est déjà de l'ordre de 2 h (avec le Syscal-Pro utilisé). Par conséquent, malgré l'intérêt qu'auraient pu apporter des créneaux 4 et 8 s, et afin d'optimiser le temps d'acquisition et de respecter l'objectif de « développement de stratégies d'acquisitions pratiques et rapides » sur le terrain, l'utilisation de 4 et 8 s a été abandonnée. Toutefois, concernant les acquisitions localisées (longueur de profils de l'ordre de 1 ou 2 m) sur les hétérogénéités (**voir section 2.10**), un créneau d'injection de 4 s a été utilisé.

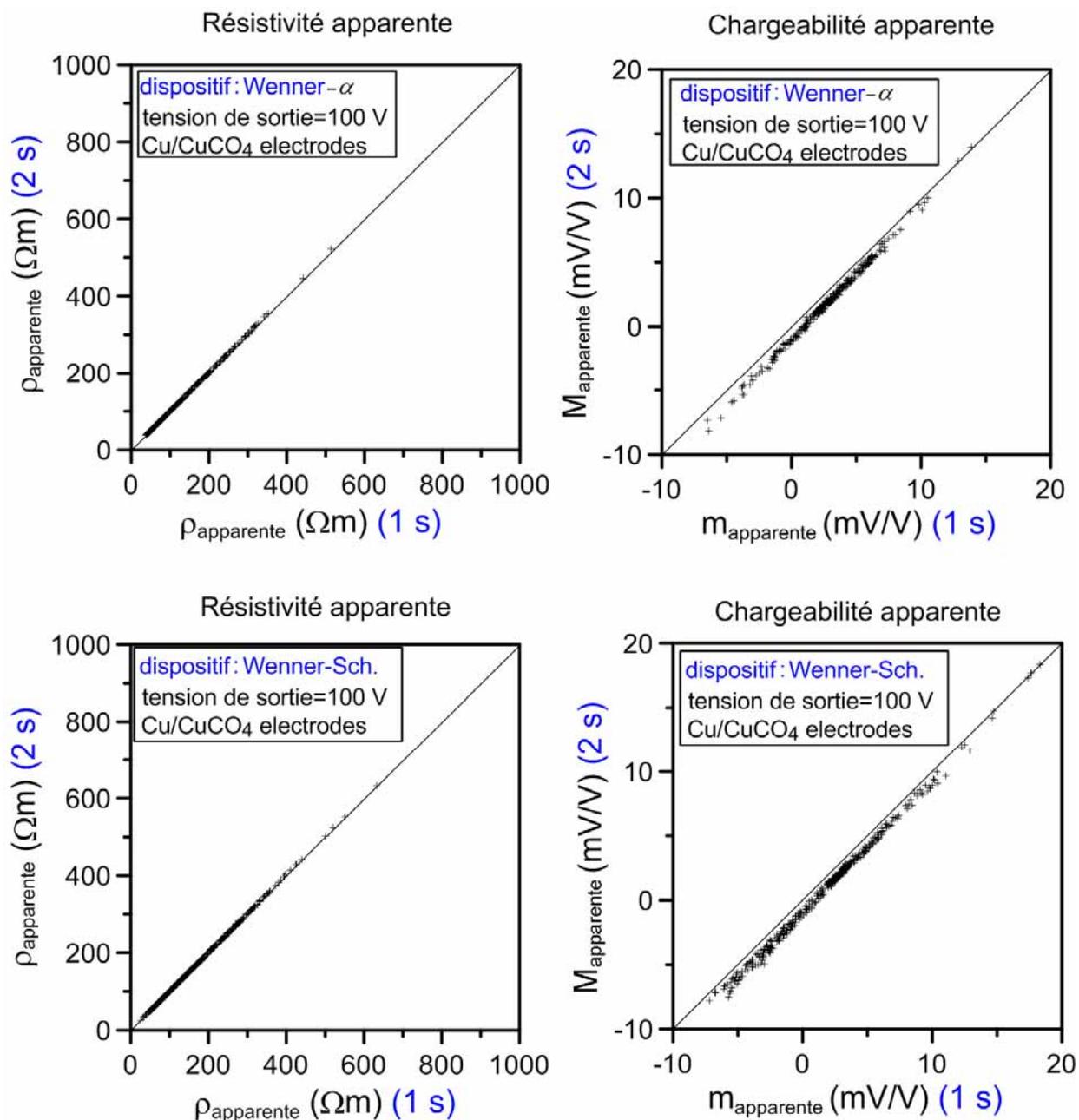


Figure II.32. Comparaison des résistivités et chargeabilités apparentes acquises pour des créneaux d'injection de 1 et 2 s sur le profil au radier à la galerie Est-96 avec des électrodes impolarisables (Cu/CuSO₄) pour les dispositifs Wenner- α et Wenner-Schlumberger.

2.5.2c. Étude de la réponse temporelle entre les électrodes Cu/CuSO₄ impolarisables et les électrodes en acier

Conventionnellement, les prospections de PP utilisent des électrodes impolarisables. Ces types d'électrodes sont toujours recommandés puisqu'on s'intéresse seulement à la polarisation du milieu et non à celles des électrodes. Le caractère polarisable de ces dernières apporte du bruit parasite à la réponse mesurée.

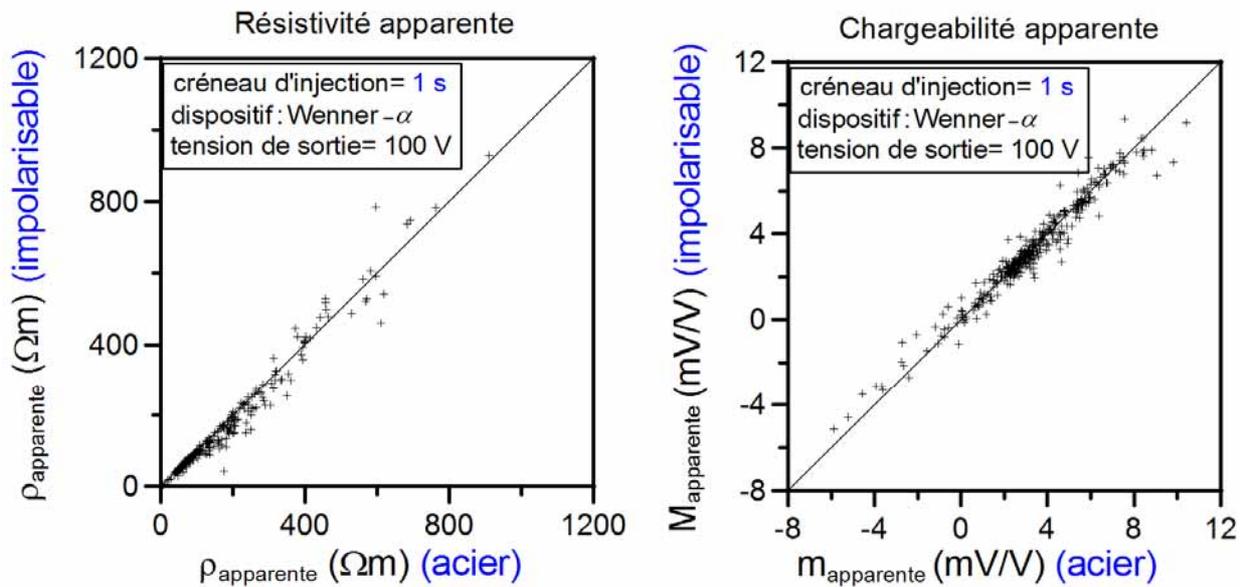
Néanmoins, dans la littérature, il existe des prospections de PP menées avec des électrodes en inox donc polarisables justement afin de vérifier si leur utilisation est pénalisante. En effet, les électrodes impolarisables fonctionnent bien et offrent un niveau de bruit relativement faible mais si la réponse des électrodes en acier s'avérait comparable, elles sont, d'un point de vue pratique, beaucoup plus faciles à installer. Ainsi, [Dahlin et al. \(2002\)](#) ont comparé la réponse PP dans le domaine temporel en utilisant deux types d'électrodes : les électrodes en inox et les électrodes impolarisables de type Pb/PbCl sur deux sites test en Suède. Les auteurs ont conclu que pour des faibles résistances de contact ($\leq 4 \text{ k}\Omega$), les électrodes en inox peuvent être aussi utilisées lors des prospections PP. Néanmoins, il a été souligné que le résultat de ces deux tests limités ne doit pas être généralisé puisque les conditions de terrain étaient favorables tant au niveau des résistances de contact qu'au niveau du bruit. Ce résultat devrait être confirmé sur d'autres sites avec des résistances de contact et des conductivités différentes qui sont des facteurs déterminants du bruit ambiant.

Afin de confirmer (ou d'infirmer) les travaux de [Dahlin et al. \(2002\)](#), la réponse PP de deux types d'électrodes (électrodes en acier et électrodes impolarisables Cu/CuSO₄) a été testée dans le domaine temporel sur le site de Tournemire. Les dimensions de la surface de contact de deux types d'électrodes sont 6 mm de diamètre avec une longueur de 25 mm pour les électrodes impolarisables, et 3 mm de diamètre avec une longueur de 55 mm pour les électrodes en acier. Ces tests ont été réalisés sur le même profil au radier de 9,40 m de long (grâce à des microforages) dans les galeries Est-96 et Nord-08. Ces mesures ont été réalisées à deux périodes de l'année 2009 : février (période sèche) et juin (période humide). Ces deux périodes d'acquisition permettent ainsi de juger l'influence de différentes conditions de terrain en termes de résistances de contact. Lors de ces acquisitions, les résistances de contacts en février étaient au maximum de 10 k Ω et en juin de 3 k Ω .

La **Figure II.33** présente, les réponses temporelles obtenues suivant deux créneaux d'injection (1 et 2 s) et pour deux intensités d'injection (50 V et 100 V). *Le résultat de cette campagne PP temporelle montre que les réponses des deux types d'électrodes sont assez proches indépendamment du créneau d'injection (1 s, 2 s), de l'intensité d'injection (50 V, 100 V) dans la gamme des résistances de contact observée à l'échelle de notre travail.*

Ce résultat nous a autorisés à mener certaines prospections avec des électrodes en acier afin de réduire le temps d'installation du système d'acquisition.

Galerie Est-96 (Février 2009)



Galerie Nord-08 (Juin 2009)

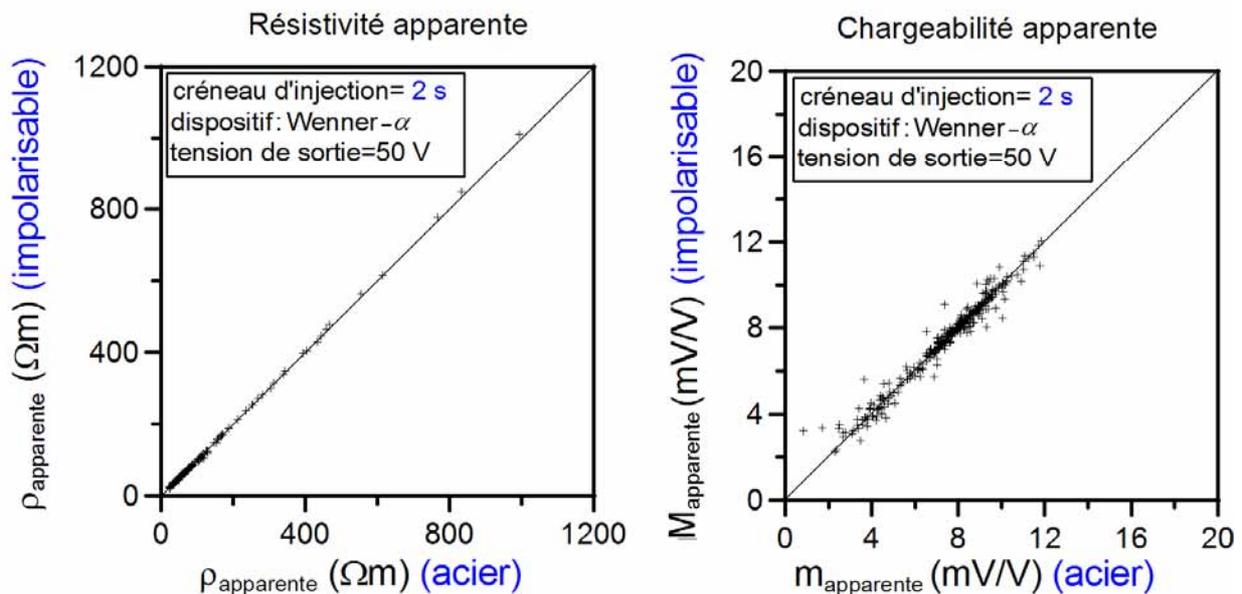


Figure II.33. Comparaison des résistivités et chargeabilités apparentes acquises à partir des différents types d'électrodes (électrodes impolarisables Cu/CuSO_4 et électrodes en acier) pour 1 et 2 s créneaux d'injection sur les profils au radier dans la galerie Est-96 et dans la galerie Nord-08 avec le dispositif Wenner- α .

2.5.2d. Étude de la réponse spectrale entre les électrodes Cu/CuSO_4 impolarisables et les électrodes en acier

La littérature montre que l'influence de la nature des électrodes (électrodes impolarisables et électrodes en acier) a également été étudiée dans le domaine fréquentiel (Schleifer & Junge, 2004). Dans notre cas, dans la station expérimentale de Tournemire, cet

aspect a été investigué lors de la campagne de mesures géophysiques de juin 2009 (période relativement plus favorable en termes de résistances de contact, $\leq 3 \text{ k}\Omega$) à partir de certaines parties des profils au radier dans la galerie Nord-08. Nous rappelons ici que le radier de la galerie est non-bétonné (sauf les sept premiers mètres par rapport à l'entrée de la galerie).

Cette étude méthodologique a utilisé les mêmes types d'électrodes que l'étude précédente conduite dans le domaine temporel : les électrodes impolarisables Cu/CuSO₄ et les électrodes en acier. Nous avons réalisé notamment des mesures spectrales exactement aux mêmes positions (toujours grâce aux microforages) sur un profil au radier. Au total, 15 mesures prévues par types d'électrodes ont été faites. La position des mesures sur ces profils ont été planifiées en fonction des résultats obtenus lors des mesures PP temporelles sur cette même zone (**voir section 2.7.1**). Plus précisément, les mesures ont été choisies de façon à se positionner sur une zone d'anomalie et sur une zone relativement plus saine (loin des nodules calcaires). Le dispositif dite Wenner-Schlumberger a été utilisé pour $a=20 \text{ cm}$, $n=1, 2$.

Les mesures ont été réalisées à partir du résistivimètre SECR-1 (adapté pour la mesure de la résistivité complexe et développé au sein de l'UMR Sisyphe) pour une gamme de fréquence allant de 0,2 Hz à 7,8 kHz. Afin de ne pas propager l'erreur de mesure lors des acquisitions, les électrodes n'ont pas été déplacées et ceci pour les deux types d'électrodes. Suite à l'installation des électrodes, l'acquisition PPS a été menée sur différentes parties du radier (chaque mesure à partir d'un quadripôle de mesure propre). Ensuite l'autre type d'électrode a été installé et l'acquisition a été de nouveau démarrée (chaque mesure à partir d'un quadripôle de mesure propre). Les résultats obtenus, pour une position de mesure donnée, sont présentés sur les **Figures II.35 à II.38** sous forme des spectres de phase conventionnelle (phase négative) en associant l'amplitude de la tension acquise (V) et la résistance de contact ($\text{k}\Omega$). Il existe deux raisons pour avoir choisi les trois grandeurs (*phase, tension et résistance de contact*) pour la comparaison.

En premier lieu, nous avons utilisé les spectres d'amplitude (pas présentés mais discutés lors des interprétations) et de phase car ces grandeurs sont connus pour être des indicateurs pertinents de la qualité (bruité ou pas) de la mesure et des conditions expérimentales (présence d'un couplage EM et/ou d'une influence des électrodes).

Cette pertinence (notamment sur la mise en évidence de l'influence des électrodes) a été démontrée à partir d'un spectre de phase par [Vanhala & Soininen \(1995\)](#) qui ont étudié la réponse spectrale de trois différents types d'électrodes : impolarisable Cu/CuSO₄, en platine et

impolarisable Ag/AgCl plongées dans un milieu non polarisable (ici de l'eau du robinet) (**Figure II.34**). Cette étude a été conduite dans la gamme de fréquences 10^{-2} Hz et 10^4 Hz.

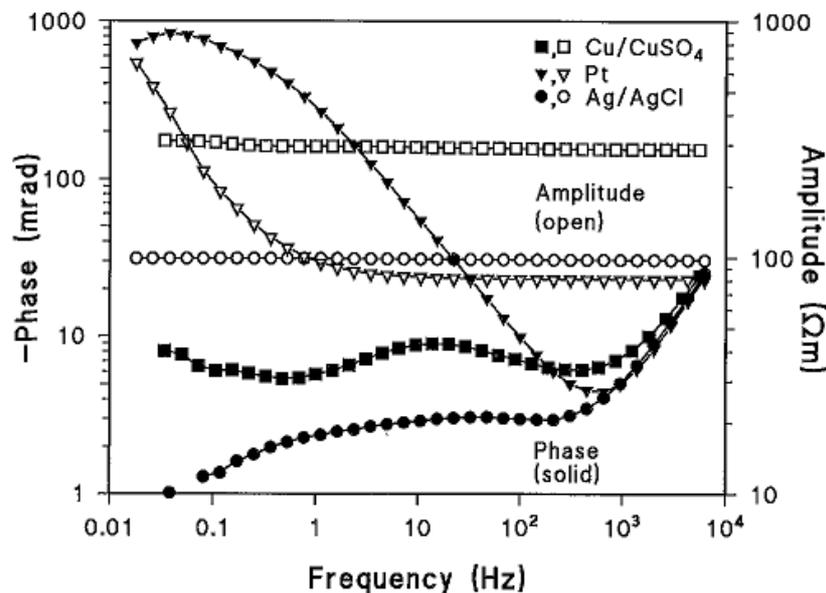


Figure II.34. Spectre de phase et d'amplitude d'un échantillon saturé en eau du robinet mesuré avec un dispositif composé de deux électrodes et à partir des électrodes de Cu/CuSO₄, Ag/AgCl et les électrodes en platine. Densité du courant : 0.3×10^{-2} A/m² (Vanhala & Soininen, 1995).

La **Figure II.34** illustre bien l'impact du type d'électrodes (et leur différence de capacité de polarisation) sur le spectre de phase obtenu sur le même échantillon. Les résultats montrent que les électrodes Ag/AgCl sont presque impolarisables alors que les électrodes en platine offre une grande capacité de polarisation.

En second lieu, le choix de visualiser la tension acquise et les résistances de contact permettra de suivre le bon fonctionnement de l'appareil de mesure. Nous rappelons que la résistance de contact mesurée juste avant l'acquisition, représente ici la somme des résistances de contact des électrodes d'injection.

Une réponse différente pour deux types d'électrodes sera liée non seulement à la réponse propre des électrodes mais aussi à un couplage différent « appareil-électrode ». Pour certaines conditions de mesure, les limites de l'appareil influencent donc à des degrés divers la réponse obtenue : ces limites et les problèmes de couplage « appareil-électrode » seront alors détectées sur les spectres de la tension acquise et des résistances de contact.

Pour visuellement alléger la densité des graphiques, nous ne présentons que les spectres de l'amplitude de la tension et de la résistance de contact correspondant aux spectres de phase bruités (ou à des situations intéressantes décrites plus loin).

Il est important de souligner ici que les spectres de phase sur les **Figures II.35 à II.38** sont issus d'une mesure brute à une position donnée et non d'une moyenne. L'acquisition à partir des électrodes impolarisables a toujours été effectuée avec une tension de sortie de 25 V. Concernant les électrodes en acier, la tension de sortie utilisée fut de 25 V ou de 17 V (lorsque la tension de 25 V saturait le signal acquis ou offrait une réponse instable). Ces nouveaux ordres de grandeur des tensions de sortie seront privilégiés avec le nouveau résistivimètre prototype (SECR-1). Nous présentons ici la moins bruitée des deux mesures afin d'établir une comparaison uniquement sur la base de la nature des électrodes mises en jeu. La position (notée X_c) de la mesure correspond au centre du quadripôle de mesure.

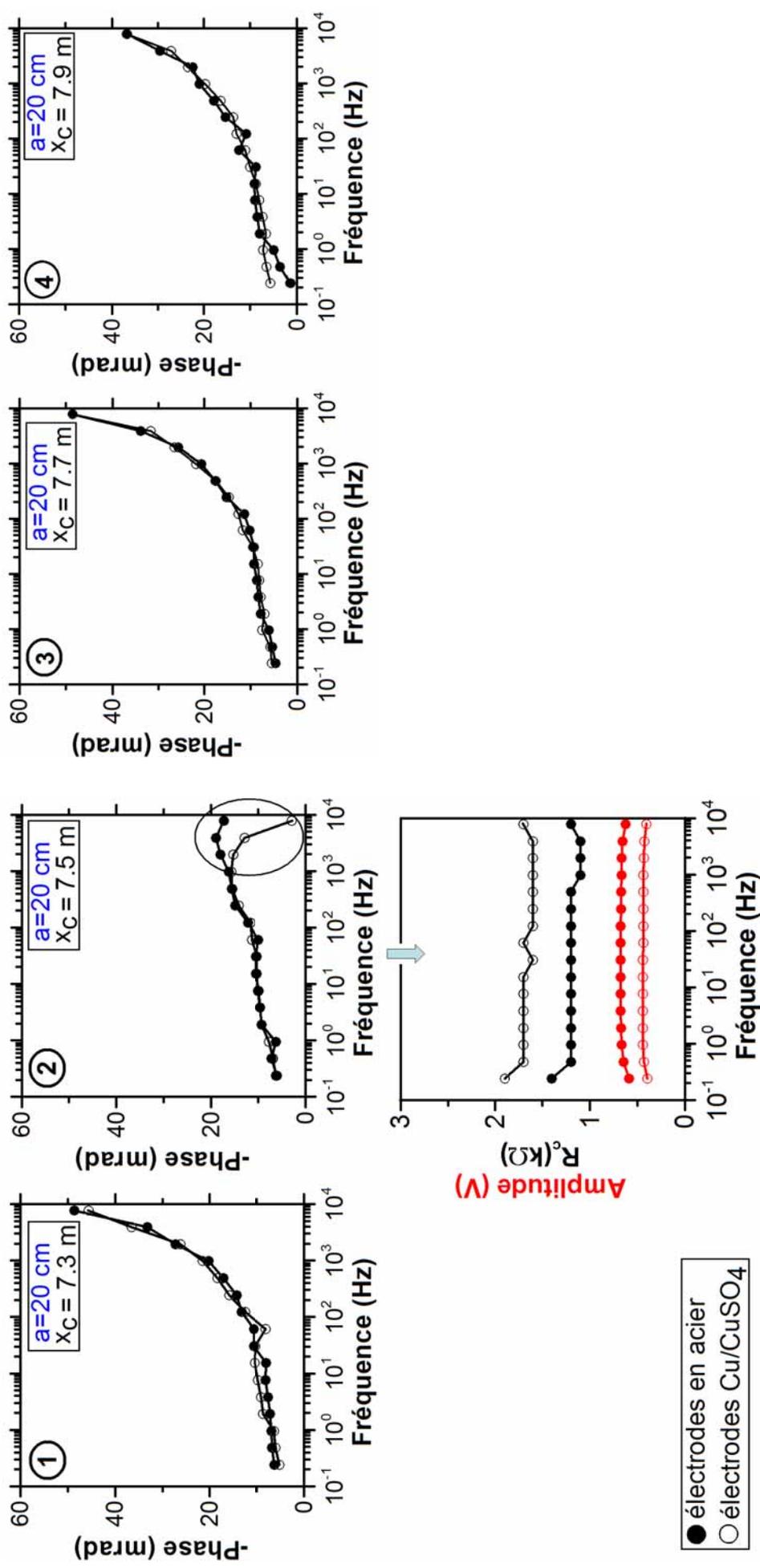


Figure II.35. Comparaison des spectres de phase des électrodes impolarisables et en acier à $X_c = 7,3$ m, $7,5$ m, $7,7$ m, $7,9$ m sur les profils longitudinaux à la galerie Nord ($a = 20$ cm). On donne également les spectres de tension mesurée et de résistance de contact correspondant au spectre de phase bruité (en $X_c = 7,5$ m).

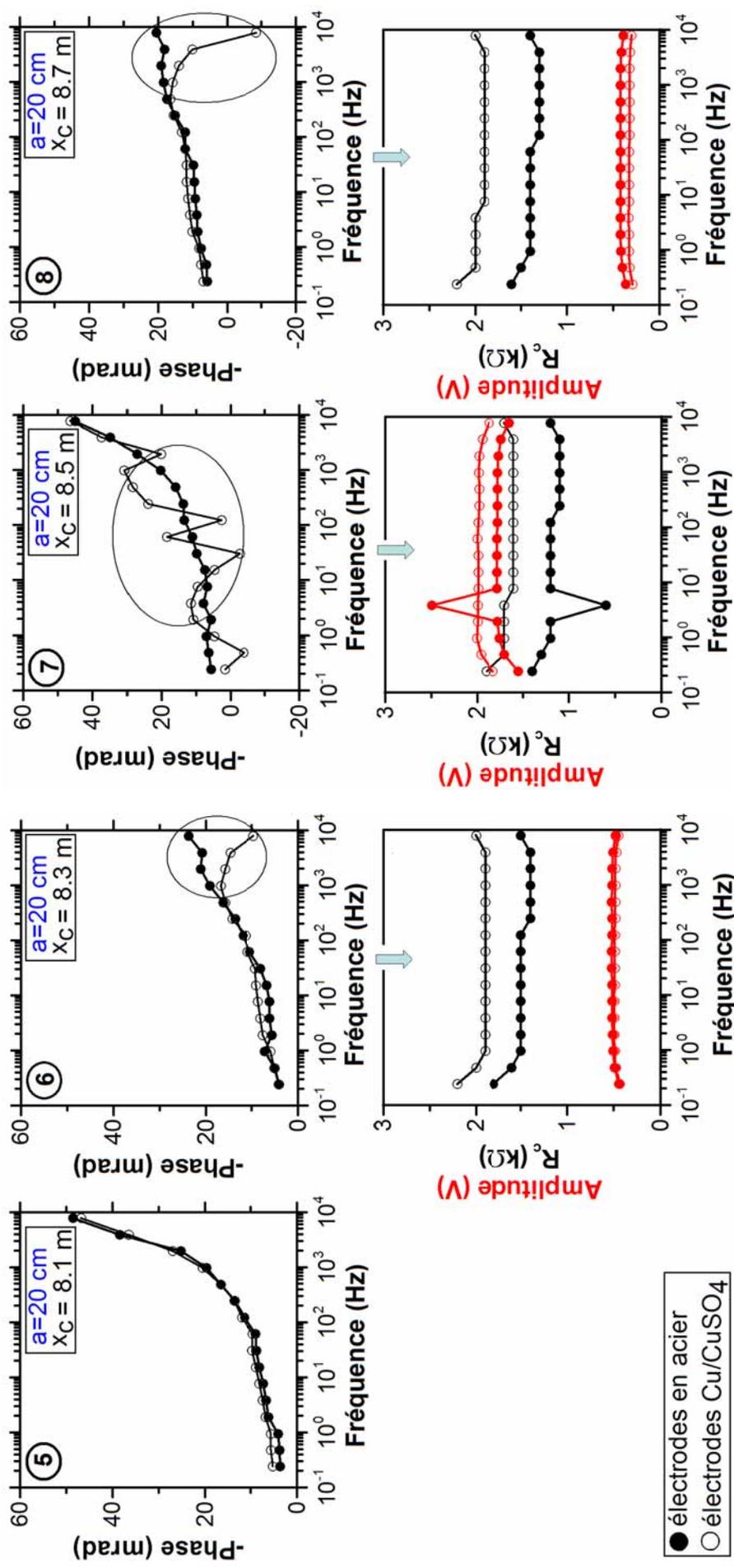


Figure II.36. Comparaison des spectres de phase des électrodes impolarisables et en acier à $X_c = 8,1$ m, $8,3$ m, $8,5$ m, $8,7$ m sur les profils longitudinaux à la galerie Nord ($a = 20$ cm). On donne également les spectres de tension mesurée et de résistance de contact correspondant aux spectres de phase bruités.

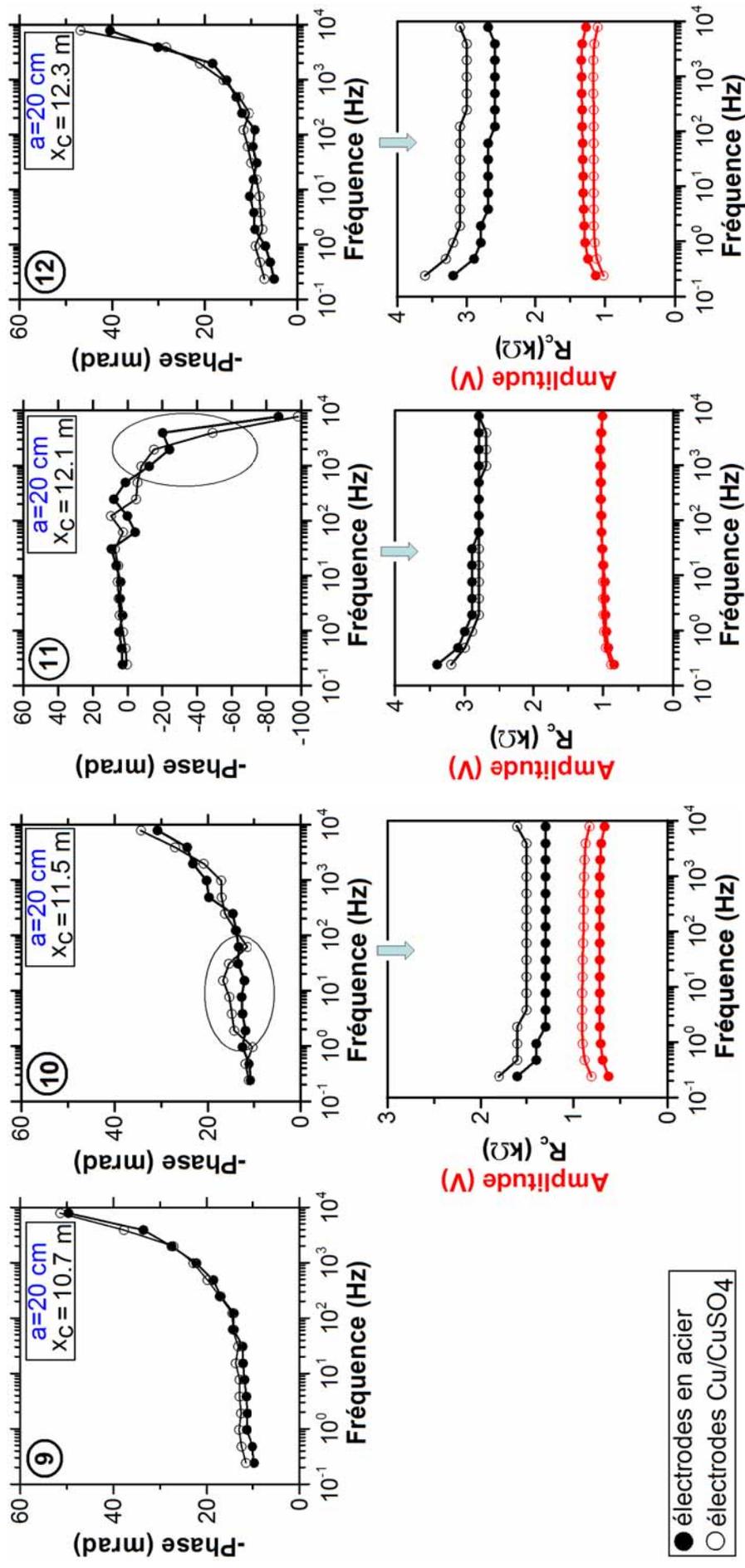


Figure II.37. Comparaison des spectres de phase des électrodes impolarisables et en acier à $X_c = 10,7$ m, $11,5$ m, $12,1$ m, $12,3$ m sur les profils longitudinaux à la galerie Nord ($a = 20$ cm). On donne également les spectres de tension mesurée et de résistance de contact correspondant aux spectres de phase bruités ou à des situations intéressantes discutées dans le texte.

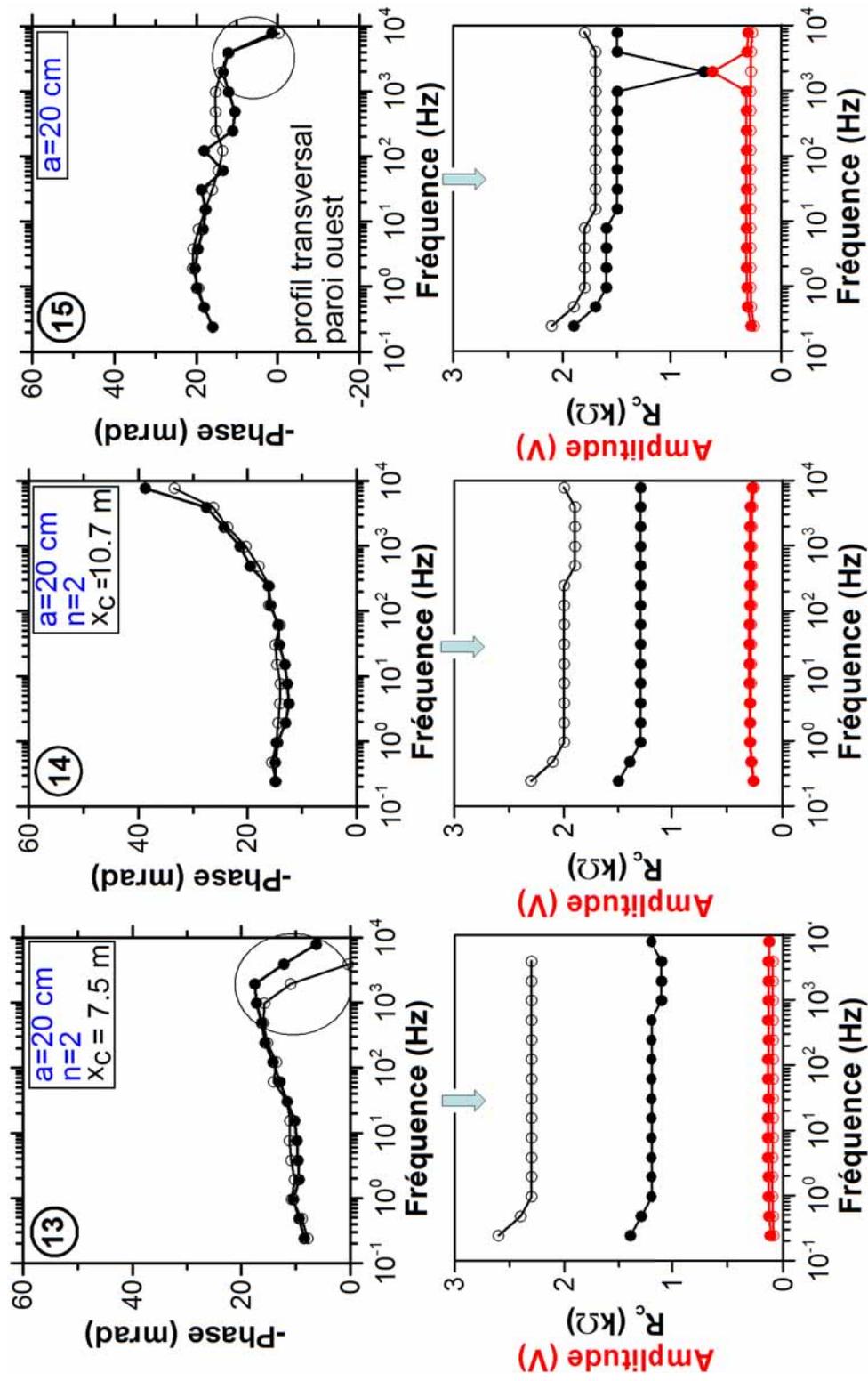


Figure II.38. Comparaison des spectres de phase des électrodes impolarisables et en acier à $X_c = 7,5 \text{ m}$, $10,7 \text{ m}$ sur les profils longitudinaux et une mesure en paroi Ouest sur le profil transversal à la galerie Nord ($a = 20 \text{ cm}$, $n = 2$). On donne également les spectres de tension mesurée et de résistance de contact correspondant aux spectres de phase bruités.

L'apport de cette étude a mis en évidence les points suivants :

1. Les résistances de contact acquises sont toujours de l'ordre de 2 et 3 k Ω . La résistance de contact des électrodes impolarisables est toujours plus importante que celles des électrodes en acier. Toutefois, ces valeurs restent très acceptables comparativement à celles mesurées en laboratoire.
2. **La réponse de deux électrodes est identique** pour toute la gamme de fréquence quand le milieu présente des résistivités apparentes élevées de l'ordre de 80 à 180 Ω .m en moyenne (*graphiques N° 1, 3, 4, 5, 9, 12*). Pour toutes ces positions de mesure, l'amplitude de la tension acquise est égale à 1 V (*cf. graphique N°12*).
3. **La réponse de deux électrodes n'est pas identique** à hautes fréquences (≥ 1 kHz) quand le milieu présente des résistivités apparentes relativement plus basses entre 25 et 60 Ω .m en moyenne (*graphiques N°2, 6, 8, 13, 15*). Cette différence est observée plutôt pour les électrodes impolarisables par des *chutes* de phases. Une étude de sensibilité avec le logiciel de modélisation CR1Dmod ([Ingeman-Nielson & Baumgartner, 2006](#)), un outil numérique que nous présentons plus loin, nous a montré que ces chutes de phase ne peuvent pas être liées à un simple effet de couplage EM (**voir annexe A3**).
4. Quand le signal reçu est proche de la saturation (2 V), le spectre de phase obtenu à partir des électrodes impolarisables est instable par rapport à celui des électrodes en acier (*graphique N°7*).
5. Le graphique N° 11 montre un cas intéressant : **la réponse de deux types d'électrodes est identique mais bruitée** (chutes de phase à partir de 100 Hz). Le contexte de ce graphe était plutôt favorable : la tension reçue est égale à 1 V et la résistivité apparente moyenne du milieu est plutôt élevée et égale à 140 Ω .m. Nous expliquons ce niveau de bruit soit par l'hétérogénéité des résistances de contact du quadripôle de mesure, soit par un effet PP complexe associé à l'interface béton/argilites : en effet, la mesure a été acquise avec une électrode d'injection positionnée dans l'argilite et le reste des électrodes (2 électrodes de potentiel et 1 électrode d'injection) positionnée sur la partie bétonnée du radier. Ces hypothèses sont vérifiées sur le graphique N° 12 pour lequel l'ensemble du quadripôle est positionné sur le béton. Dans ce cas là, les chutes de phases ne sont plus observées.

2.5.2e. Synthèse et conclusion

Ce travail méthodologique a permis de formuler les recommandations suivantes que nous tacherons d'appliquer dans la suite de notre étude :

- Dans notre contexte, il apparaît inutile de dépasser la valeur de 50 V comme tension d'injection.
- Comparativement au créneau d'une durée de 1 s, un créneau de 2 s ne va pas apporter d'informations quantitatives supplémentaires significatives (méthode PP dans le domaine temporel).
- Quelque soit la nature des électrodes (de type Cu/CuSO₄ ou acier), on a souvent enregistré un bruit significatif à haute fréquence (≥ 1 kHz). Ce bruit HF semble être indépendant de la résistance de contact dans la gamme (2 -3 k Ω) mesurée et dépend plutôt d'un effet instrumental intervenant à certaines gammes de conductivité du milieu (plus le milieu est conducteur plus le bruit HF est important). Ainsi, quelque soit la nature des électrodes, il est préférable de travailler à des fréquences au dessous de 1 kHz pour avoir le meilleur rapport signal/bruit (méthode PP dans le domaine spectral).
- Pour la gamme de résistivités mises en jeu (25 à 180 Ω .m), pour des fréquences inférieures à 1 kHz et pour des acquisitions dans le domaine temporel (PPT), la réponse des deux types d'électrodes est identique. Dans ce contexte, l'utilisation d'électrodes de type Cu/CuSO₄ n'apporte pas de plus-value significative (méthode PP dans le domaine spectral).

2.6. Les campagnes expérimentales dans la galerie Est-96

2.6.1. La géométrie des dispositifs et les paramètres d'acquisition

La prospection dans la galerie Est-96 a été privilégiée dans un premier temps car elle offrait un contexte méthodologique plus simple que les autres ouvrages du site. En effet, elle ne présente ni de parement en maçonnerie (comme le tunnel ferroviaire) ni de parement bétonné (présent dans la galerie Est-03) pouvant limiter une injection électrique depuis la paroi. En plus, elle se trouve dans un contexte géologique relativement plus simple par rapport à la galerie Ouest (affectée par une faille secondaire et majeur). Dans la galerie Est-96, le dispositif mis en œuvre comprend deux profils perpendiculaires : un profil longitudinal au radier et un profil en arc (**Figure II.39**).

Le profil longitudinal au radier orienté Est-Ouest est parallèle à (a) l'axe principal de la galerie et (b) au dernier profil de sismique réfraction réalisé précédemment dans cette zone (Cabrera *et al.*, 2001 ; Magnin *et al.*, 2008). Il est constitué de 48 électrodes espacées de 20

cm (soit une longueur totale du profil de 9,4 m). L'électrode extrême du profil, positionnée la plus à l'Est, est à 40 cm du forage dit GEM (180) préexistant et à 21,10 m de l'entrée de la galerie. Cette électrode est commune au profil en arc disposé perpendiculairement au profil au radier (**Figures II.39-40**). On note que le profil au radier intercepte de nombreuses fractures néoformées et des fractures tectoniques remplies de calcite. Le profil en arc de 43 électrodes espacées de 20 cm comprend une partie de la paroi verticale et la largeur du radier.

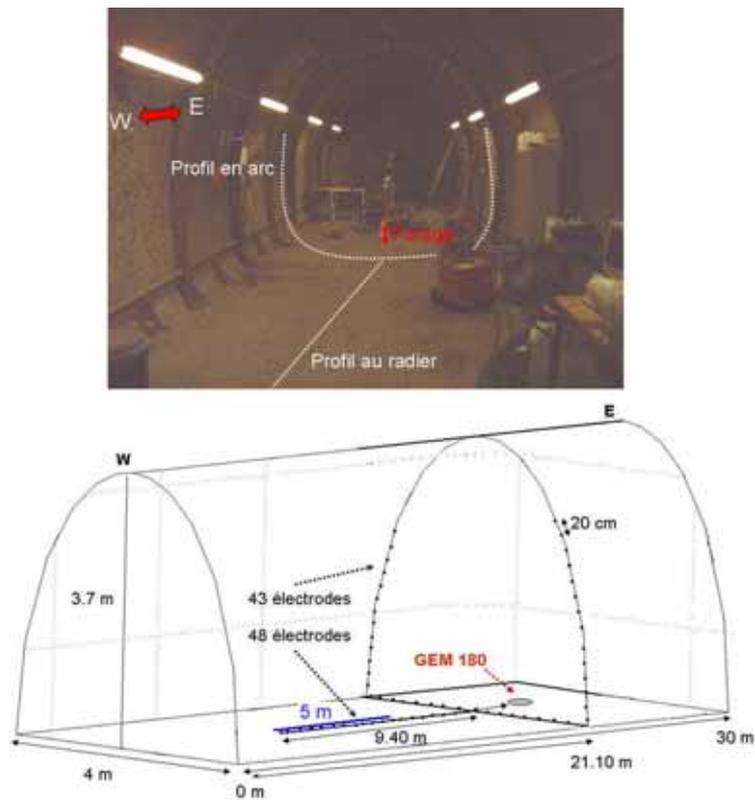


Figure II.39. Illustration du profil en arc et longitudinal au radier dans la Galerie Est-96 (en bleu : profil des mesures PPS).

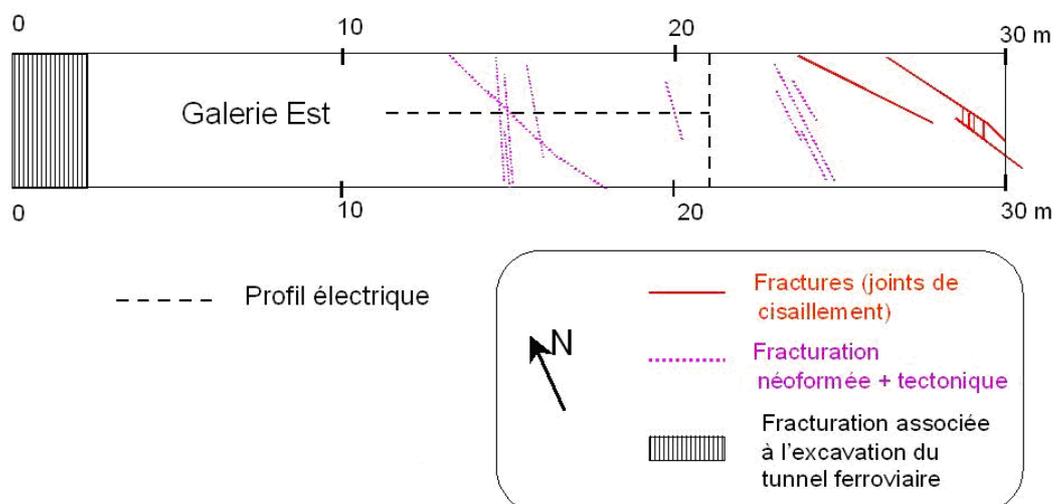


Figure II.40. Schéma structural simplifié du radier de la Galerie Est-96 (modifié de [Cabrera et al., 2001](#)) et positions des profils électriques.

❖ Paramètres d'acquisition des campagnes de mesures de Polarisation Provoquée Temporelle et de résistivité électrique

Les mesures dans le domaine temporel, ont été acquises avec différents créneaux d'injection (1 et 2 s) à l'aide de l'appareil Syscal-Pro. Avant chaque acquisition, (a) le niveau des résistances de contact (option Rs-check du Syscal Pro ; donnant des résistances de prise inférieures à $10\text{ k}\Omega$) et (b) la qualité de la décroissance de quelques ddp électriques mesurées ont été vérifiées.

Trois configurations d'électrodes (ou encore appelées dispositifs) Wenner- α , Wenner Schlumberger et dipôle-dipôle ont été mises en œuvre. Le dispositif Wenner- α est plutôt sensible aux variations verticales de résistivité (et donc recommandé pour la détection de structures horizontales) : il a également le meilleur rapport signal sur bruit (S/B) (nombre de quadripôles interrogé le plus faible, à profondeur d'investigation égale). Ce dispositif est le moins affecté par les hétérogénéités superficielles. Le dipôle-dipôle est sensible aux variations horizontales de propriétés électriques (dispositif recommandé pour les structures verticales). Ce dispositif est couramment utilisé pour les mesures de polarisation provoquée car il minimise le couplage électromagnétique entre les circuits d'injection courant (émission) et de mesure du potentiel (réception) (Loke, 2001). Il a toutefois un rapport S/B plus médiocre et nécessite un nombre élevé de quadripôle (à profondeur d'investigation égale). Le Wenner-Schlumberger est souvent considéré comme un bon compromis entre les deux dispositifs précédents : il montre une bonne sensibilité tant aux variations verticales qu'aux variations horizontales de résistivité.

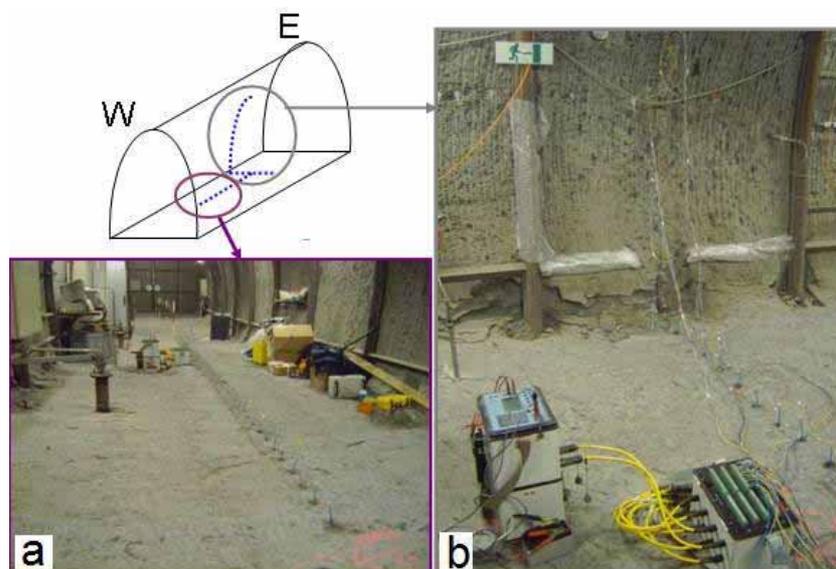


Figure II.41. (a) Vue générale du profil au radier, (b) Équipement Syscal-Pro et son bornier sur lequel sont connectés les 43 électrodes du profil en arc dans la galerie Est-96.

❖ Paramètres d'acquisition des campagnes de mesures de Polarisation Provoquée Spectrale

Disposant d'un unique canal (ou bobine) de réception, nous avons effectué la tomographie « à la main » (i.e., connexion manuelle de chaque quadripôle). Afin de diminuer la durée de l'acquisition (2 heures par mesure pour toute la gamme de fréquence), **pour le profil au radier**, nous avons limité :

1. la longueur du profil sur radier à 5 m environ au lieu de 9,4 m (premier quadripôle à 2,60 m de l'électrode la plus à l'Est du profil au radier; sens du déplacement du quadripôle de mesure : Est vers Ouest, **Figure II.39** en bleu). Le profil a correspondu à 166 quadripôles interrogés manuellement.
2. la largeur du spectre mesuré (366 mHz à 12 kHz), (toutefois, la fréquence minimum a été limitée à 45 mHz lorsque des polarisabilités fortes avaient été mesurées en PPT).

Comme pour les acquisitions PPT, la configuration Wenner- α a été privilégiée suivant cinq écartements inter-électrodes ($a=20$ cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm) et suivant trois écartements pour le Wenner Schlumberger ($a=20$ cm, $n=1, 2, 3$) (**Figure II.42**).

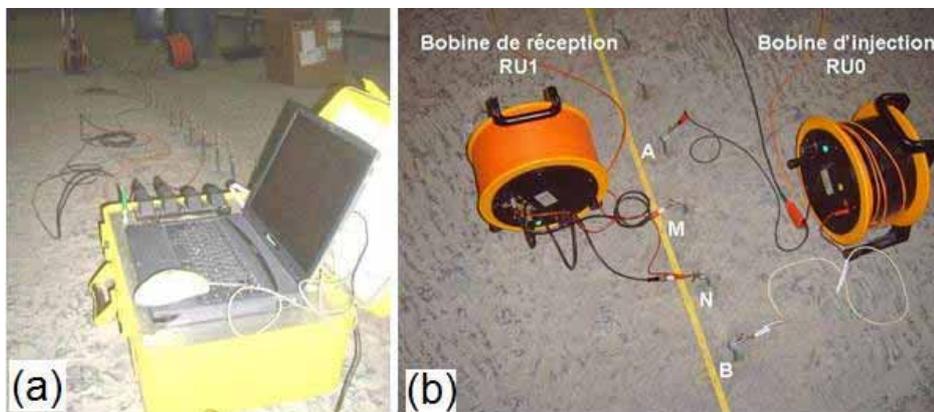


Figure II.42. (a) Vue générale de l'acquisition des données PPS au radier (b) les bobines d'injection et de réception de l'équipement SIP FUCHS II. Exemple d'acquisition (dispositif Wenner- α) avec un espacement ($AM=MN=NB$) de 20 cm (1xa) au profil longitudinal au radier. (A, B) : les électrodes d'injection ; (M, N) : les électrodes de potentiel.

Concernant le profil circulaire en arc, pour des raisons de temps, seul le dispositif Wenner- α a été utilisé pour trois écartements inter-électrodes ($a=20$ cm, 40 cm, 60 cm). La gamme de fréquences a été limitée de la même manière qu'au profil au radier (366 mHz à 12 kHz). Ce profil a correspondu à 116 quadripôles interrogés manuellement.

2.6.2. Mesures expérimentales préliminaires : calibration, effet du couplage électromagnétique, filtrage (domaine spectral)

Dans la mesure PPS, la réponse obtenue inclue l'influence du couplage électromagnétique et de la calibration de l'appareil de mesure. Ces derniers peuvent être stables et répétitives (Lesmes & Friedman, 2005). Il est important alors de tester et calibrer les appareils de mesure à partir de standards connus (p.ex. résistances pures ou bien des matériaux impolarisables) pour déterminer la fiabilité et la précision des acquisitions (Olhoeft, 1985 ; Vanhala & Soinenen, 1995 ; Lesmes & Frye, 2001). Si la calibration de l'appareil est bonne, la mesure sur des résistances pures, donne un spectre de phase (déphasage) plat (i.e., phase égale à zéro) et un spectre d'amplitude plat (ayant la valeur de la résistance utilisée). Si c'est le cas, le déphasage mesuré ultérieurement sur un échantillon ou sur le terrain, sera bien lié aux propriétés intrinsèques de matériau (i.e., pas de biais expérimentaux). Toutefois, dans la pratique, malgré une bonne calibration de l'appareil, l'opérateur n'est pas à l'abri d'un couplage électromagnétique puisque celui-ci ne dépend pas seulement de l'appareil mais aussi de l'environnement étudié (sous-sol, câbles et éléments métalliques et électriques autour du dispositif). Lors des mesures dans la galerie Est-96, des résistances pures de 30 Ω , 221 Ω , 1 k Ω , 5 k Ω ont été utilisées afin d'étudier expérimentalement la calibration de l'appareil et le couplage électromagnétique.

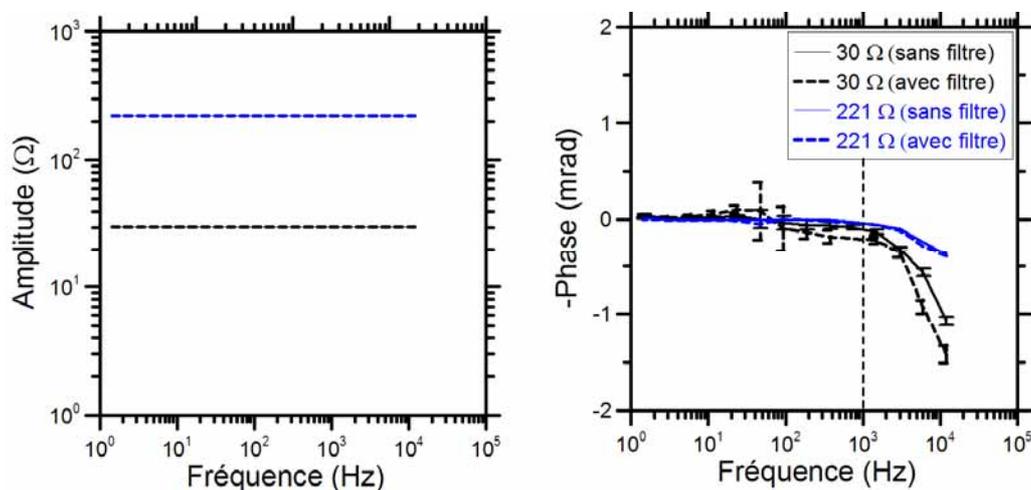


Figure II.43. Spectre d'amplitude et de phase des résistances pures de 30 Ω et 221 Ω avec et sans utilisation du filtre pour 50 Hz.

D'emblée, il est important ici de souligner ici que la sensibilité de notre appareil (ici SIP FUCHS II) est de l'ordre de +/- 1 mrad pour des fréquences supérieurs de 6 kHz. Aux basses fréquences, l'erreur de mesure est de l'ordre de +/- 0,5 mrad (Weller *et al.*, 1996; Binley *et al.*, 2005).

Les spectres d'amplitude et de phase mesurés pour les résistances de 30 Ω et 221 Ω sont présentés sur la **Figure II.43**. Cette figure montre que les spectres de phase sont bien plats jusqu'à la fréquence de 1 kHz et la calibration de l'appareil fut alors considérée comme satisfaisante jusqu'à cette fréquence. A partir de 1 kHz, on a observé une réponse caractérisée par des chutes de phase lorsque des résistances plus faibles furent utilisées. Ces chutes sont au maximum de 1,5 mrad en valeur absolue à 12 kHz et correspondent sensiblement à la gamme de sensibilité de l'appareil. Les études méthodologiques ultérieurement discutés sur le comportement des appareils de mesure utilisée (**section 3.1.2**) ont montré qu'un effet instrumental peut intervenir dans le cas de la mesure de basses résistivités à partir de 1 kHz. En outre, le travail sur la modélisation 1D de l'effet du couplage présenté en **annexe A3** justifie similairement à cette étude expérimentale que l'effet du couplage EM est négligeable sur le terrain.

En outre, les résultats des tests expérimentaux affichés sur la **Figure II.43** mettent en évidence que les mesures filtrées du 50 Hz n'ont pas montré de différences significatives avec celles acquises sans le même filtre. Par conséquent, l'idée d'utiliser le filtre 50 Hz a été rapidement abandonnée. Les résultats de tous ces tests ont permis ainsi de dégager les deux points suivants :

1. la réponse inductive sur le site n'est pas significative.
2. l'utilisation d'un filtre 50 Hz sur ce site (malgré la présence d'appareillages électriques au alentour) est inutile.

En outre, dans la pratique, afin de contrôler notre calibration lors de nos campagnes de mesures en galerie, des mesures sur des résistances pures (généralement 221 Ω et 1 k Ω), ont été systématiquement effectuées chaque jour avant l'acquisition proprement dite sur la roche.

2.6.3. Résultats des prospections PPT et résistivité électrique sur le profil au radier

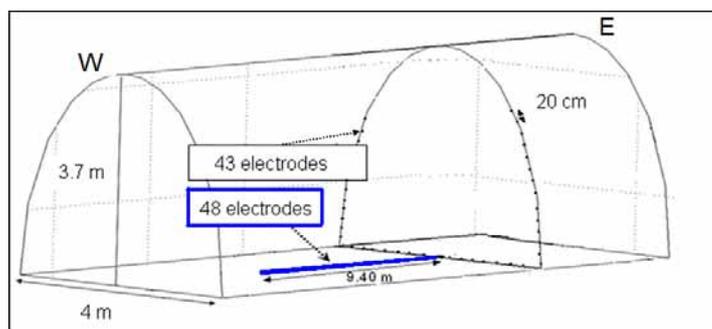




Figure II.44. Il s'agit du forage PFG1. La profondeur est de 75 cm. Les points violets correspondent à la localisation des électrodes. Les petits points concernent la localisation des capteurs pour les profils sismiques du LCPC.

Récemment, en 2010, à $x=1$ m sur le profil longitudinal au radier dans la galerie Est-96, un carottage a été réalisé (forage PFG1) afin d'étudier la profondeur des fractures néoformées visibles en surface (**Figure II.44**). Le forage est aussi indiqué sur la mosaïque de radier de la galerie Est-96 présentée dans l'**annexe A2**. Cette étude sur carottage a mis en évidence que les fractures néoformées sont bien des structures sub-verticales évoluant en profondeur et sans remplissage solide (fractures ouvertes). Dans ce secteur, selon le forage PFG1, la profondeur de la fracture néoformée traversant est 75 cm. Ce résultat confirme l'extension verticale de l'EDZ caractérisée par les sections de résistivités inversées (**Figure II.45**).

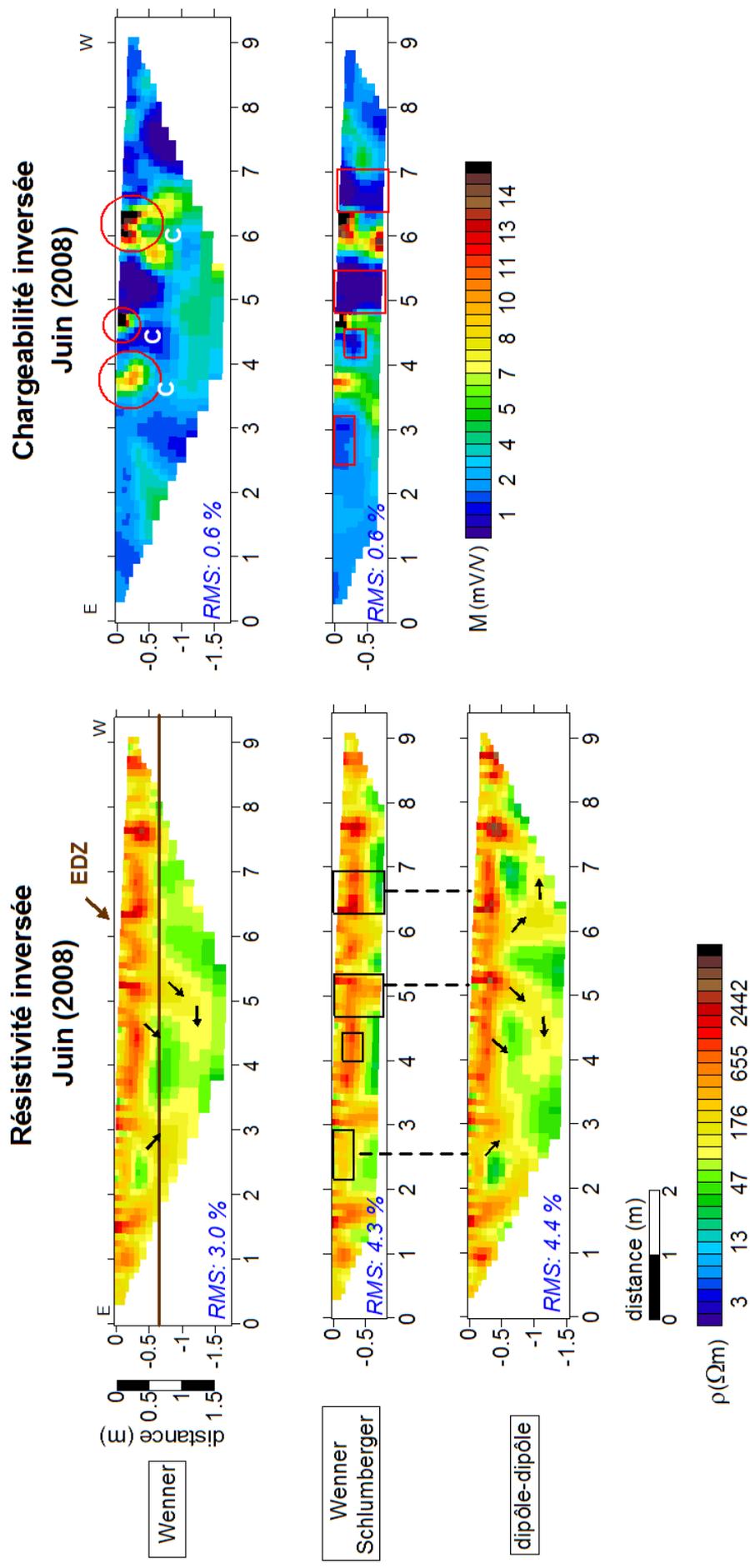


Figure II.45. Sections des résistivités et des chargeabilités inversées pour les dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle sur le profil longitudinal au radier dans la galerie Est-96 en Juin 2008 (le dispositif dipôle-dipôle est acquis seulement en mode de résistivité, C : fracture remplie de calcite, les flèches indiquent un chemin probable du processus de désaturation, créneau d'injection : 1 s, nombre d'itérations utilisée pour l'inversion : 4).

Concernant les sections de résistivités inversées (Figure II.45) :

La profondeur d'investigation sur le profil au radier est au maximum de 1,7 m pour le dispositif Wenner- α . Les valeurs de résistivités inversées varient entre [24 et 2700 Ω .m]. Pour le dispositif dipôle-dipôle, cette gamme atteint [4800 Ω .m] à cause de la présence des hétérogénéités locales en surface. Les résistivités inversées avec le logiciel Res2DInv sur le profil au radier présentent une erreur maximum de 4,4 %. Lors de l'inversion, la topographie a été prise en compte.

Nous distinguons trois états physiques de l'argilite sur le profil au radier. (i) La première zone se présente par une zone continue de fortes résistivités supérieures à [400 Ω .m] (en rouge) s'étalant jusqu'à 50-80 cm en profondeur à partir de la surface. (ii) Il existe un deuxième milieu (en jaune) ayant des valeurs de résistivité intermédiaires qui varient entre [80 et 200 Ω .m]. Ce milieu intermédiaire n'est pas complètement continu à cause de l'intrusion de zones plus conductrices (en vert). (iii) Ces intrusions représentent la troisième couche de résistivités entre [15 Ω .m- 60 Ω .m] (en vert).

La zone superficielle de fortes résistivités en surface (en rouge) caractérise l'EDZ du radier qui s'étend jusqu'à 50 cm-80 cm de profondeur. La zone de résistivité intermédiaire (en jaune) réagit comme une zone de transition et pourrait représenter un état d'endommagement et/ou un état désaturé de la roche relativement plus modéré. Finalement les faibles valeurs de résistivité (en vert) sont associées à la roche saine. L'ensemble des sections de résistivité a été comparé à la fissuration visible en surface du radier (i.e., position des fractures néoformées et tectonique sur le profil). La comparaison n'a pas permis d'établir de lien direct entre anomalies ou zones particulières des sections de résistivités interprétées et position des fissures traversant le profil.

Concernant les sections de chargeabilités inversées (Figure II.45) :

Les sections de chargeabilité inversées sur le radier présentent une erreur RMS calculée très faible de l'ordre de 0,6 %. Contrairement aux résistivités inversées, nous ne distinguons pas de zones d'anomalie de chargeabilité continue au radier dans la galerie Est-96. Ce résultat montre que la résistivité et la chargeabilité ne sont pas sensibles aux mêmes contrastes de propriétés ou phénomènes physiques : ces deux grandeurs vont donc apporter des informations probablement complémentaires.

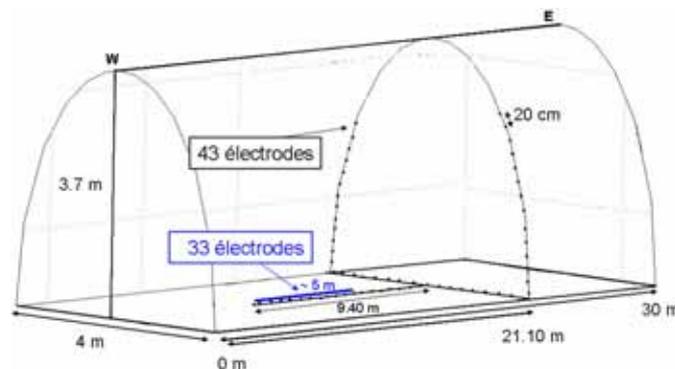
L'ensemble de la roche présente des faibles valeurs de chargeabilité inférieures à [3 mV/V]. On observe des valeurs encore plus faibles (< 2 mV/V) à $x=5$ m et 6,5 m. Ces zones se présentent en bleu foncé sur les sections de chargeabilité inversée (entourées par des rectangles en rouge sur la **Figure II.45**). Un point remarquable ici est la bonne corrélation

spatiale entre ces zones de très faibles chargeabilités (< 2 mV/V) et les zones de très fortes résistivités ($> 1000 \Omega.m$ en rouge dans la section de résistivité inversée). Toutefois, cette corrélation n'est pas systématique : les zones de fortes résistivités inversées en $x=1,5$ m et en $x=7,6$ m ne sont pas reliées à des zones significatives de très faibles chargeabilités inversées.

D'une manière générale, on a du mal à suivre la continuité des zones de faibles chargeabilités à cause de l'intrusion d'anomalies sub-verticales de fortes chargeabilités dans cette zone. Quelles sont ces intrusions ? Il existe trois zones d'anomalies de forte chargeabilité (7-28 mV/V) sur le profil au radier à $x=3,8$ m, 4,6 m, 6,3 m. Selon les observations, ces zones sont systématiquement associées à des fractures tectoniques remplies de calcite visibles en surface du radier (**voir annexe A2**). Elles ne sont toutefois pas liées aux fractures néoformées nombreuses sur ce radier. *La chargeabilité et donc la PP seraient capables de discriminer les fissures d'origine mécanique remplies d'air de celles d'origine tectonique associées à un remplissage continu de calcite.* (Nous étudierons ultérieurement la réponse PP des fractures néoformées à la **section 2.10.2b**).

L'origine physique de ces fortes anomalies de chargeabilités associées aux fractures tectoniques remplies de calcite sera discutée plus loin après la vérification de leur existence par la méthode PPS.

2.6.4. Résultats des prospections PPS sur le profil au radier



Après avoir présenté les résultats acquis par la méthode PP dans le domaine temporel, on étudie maintenant les résultats de la méthode PP dans le domaine spectral obtenus sur les mêmes profils. Dans cette section, on présente tout d'abord la variation fréquentielle de divers paramètres physiques ($|\rho|$, φ , σ'') en fonction des différents écartements inter-électrodes. Ce jeu de donnée ainsi obtenu permettra de procéder à un processus d'inversion et de présenter dans la suite, les représentations de la résistivité et de la phase inversées en fonction des différentes fréquences et dispositifs électriques (Wenner- α , Wenner-Schlumberger).

Finalement, on présente une synthèse comparative des résultats des méthodes PPT et PPS au radier.

❖ **Spectres de l'amplitude de résistivité complexe $|\rho^*|$, de la phase φ et de la conductivité imaginaire σ'' (PPS)**

Les spectres ci-dessous sur les **Figures II.46 à II.50** représentent les mesures spectrales acquises avec le SIP FUCHS II pour une gamme de fréquences allant de 46 mHz (ou 366 mHz) à 12 kHz pour chaque position spatiale sur le profil. Ces positions sont repérées à partir du début (2,6 m sur le profil PPT au radier) jusqu'à la fin de profil avec un pas d'échantillonnage de 20 cm pour cinq écartements inter-électrodes ($a=20$ cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm) avec le dispositif Wenner- α . Les réponses spectrales ont été regroupées selon leurs ressemblances et chaque groupe est associé à un symbole spécifique. La position en x donnée dans la légende correspond au centre du quadripôle de mesure.

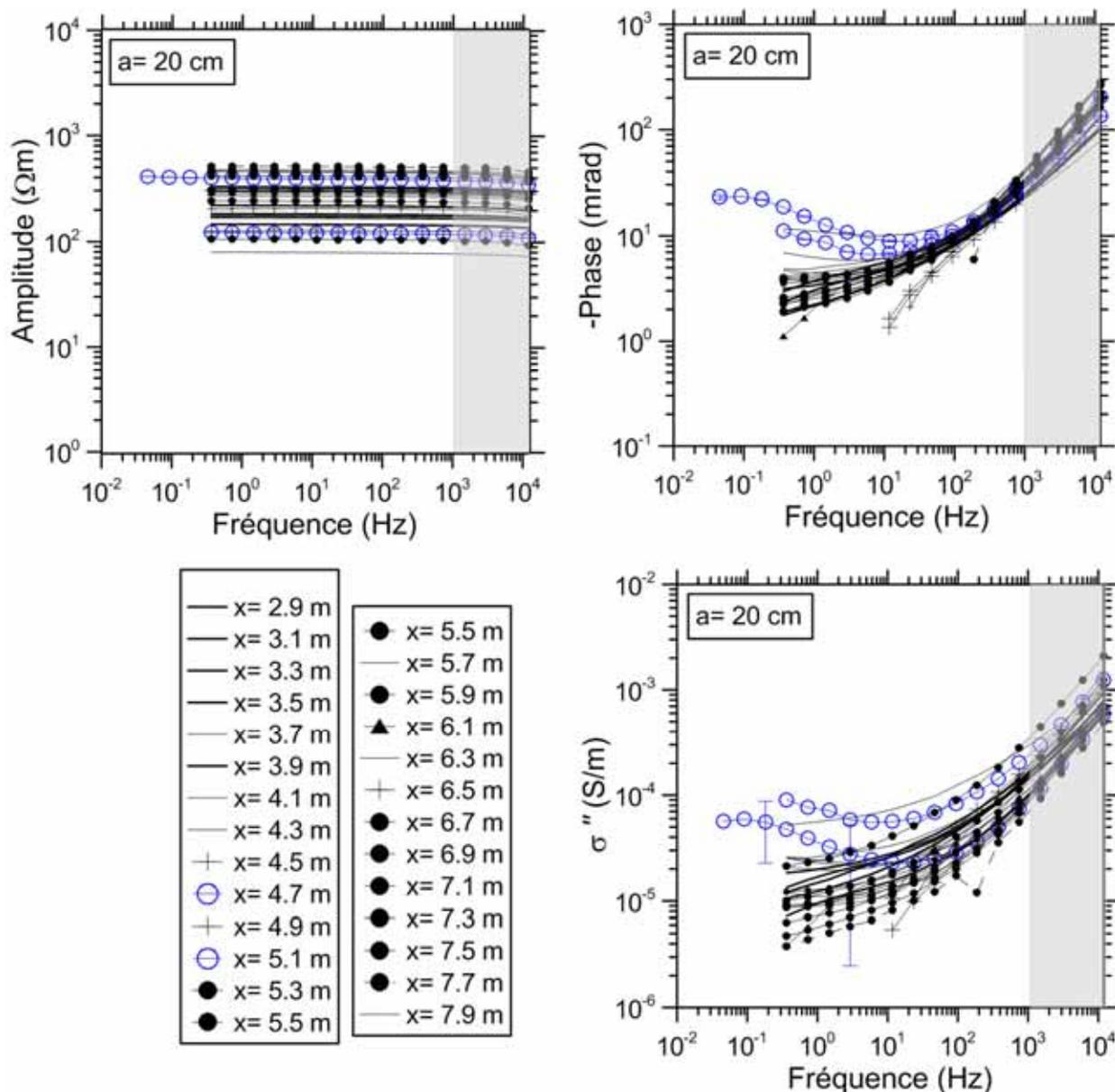


Figure II.46. Spectres de l'amplitude de la résistivité complexe, de la phase et de la partie imaginaire de la conductivité apparente pour l'ensemble des mesures spectrales réalisées sur le profil PPS au radier dans la galerie Est-96 pour l'espacement inter-électrode égal à 20 cm (dispositif : Wenner- α). La zone en gris indique les fréquences susceptibles de présenter un effet instrumental parasite lié aux basses résistivités du milieu.

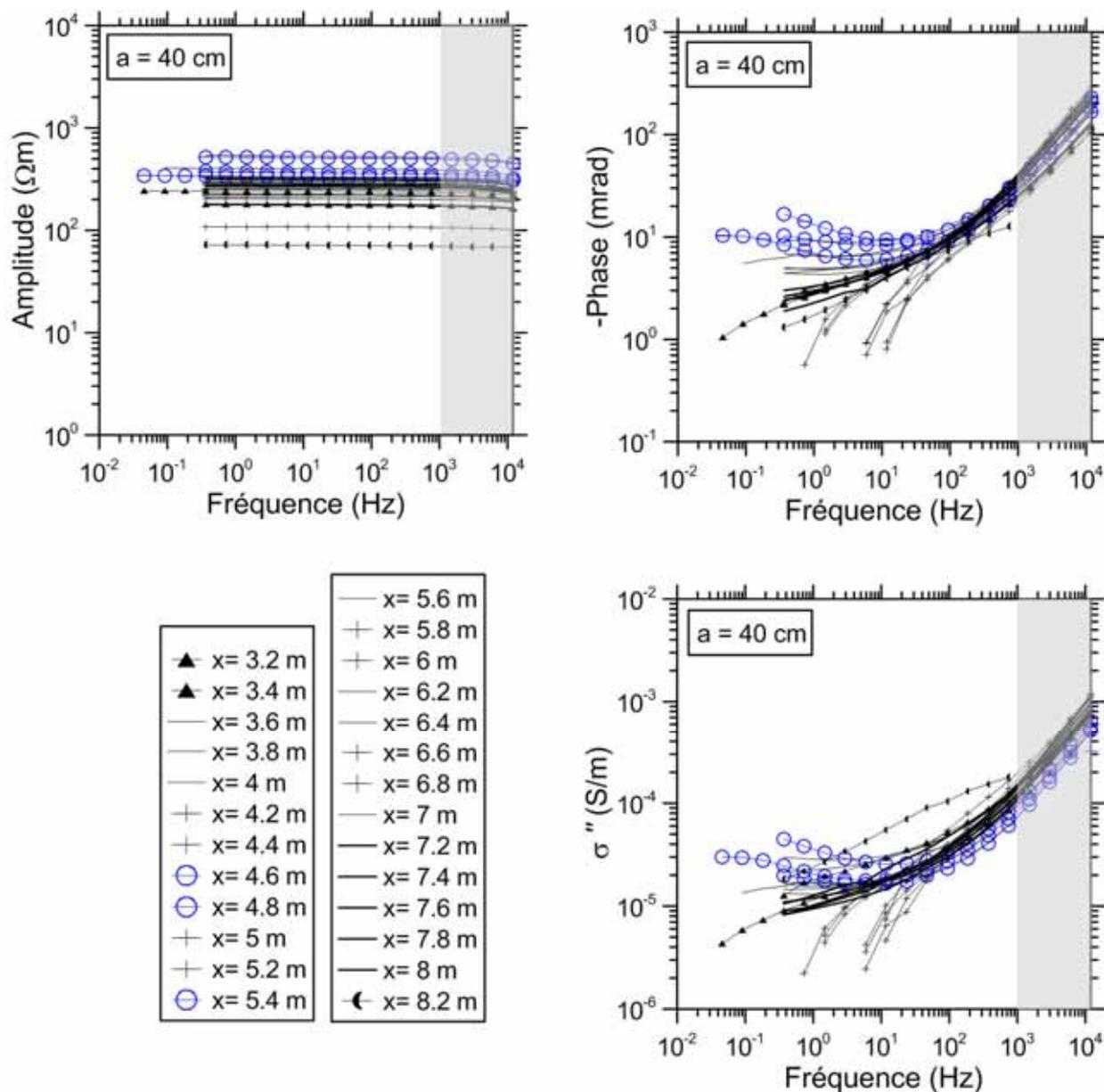


Figure II.47. Spectres de l'amplitude de la résistivité complexe, de la phase et de la partie imaginaire de la conductivité apparente pour l'ensemble des mesures spectrales réalisées sur le profil PPS au radier dans la galerie Est-96 pour l'espacement inter-électrode égal à 40 cm (dispositif : Wenner- α). La zone en gris indique les fréquences susceptibles de présenter un effet instrumental parasite lié aux basses résistivités du milieu.

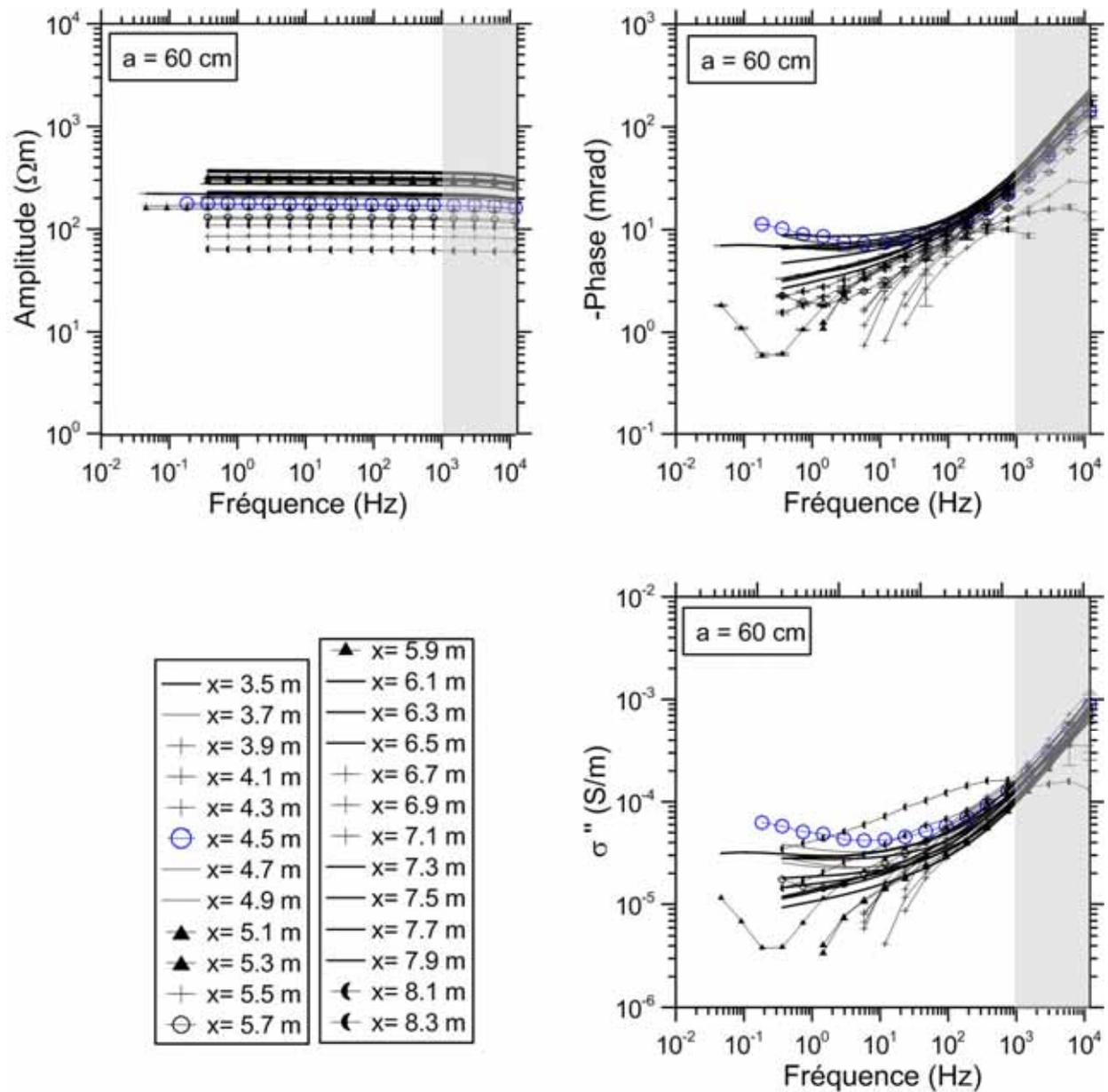


Figure II.48. Spectres de l'amplitude de la résistivité complexe, de la phase et de la partie imaginaire de la conductivité apparente pour l'ensemble des mesures spectrales réalisées sur le profil PPS au radier dans la galerie Est-96 pour l'espacement inter-électrode égal à 60 cm (dispositif : Wenner- α). La zone en gris indique les fréquences susceptibles de présenter un effet instrumental parasite lié aux basses résistivités du milieu.

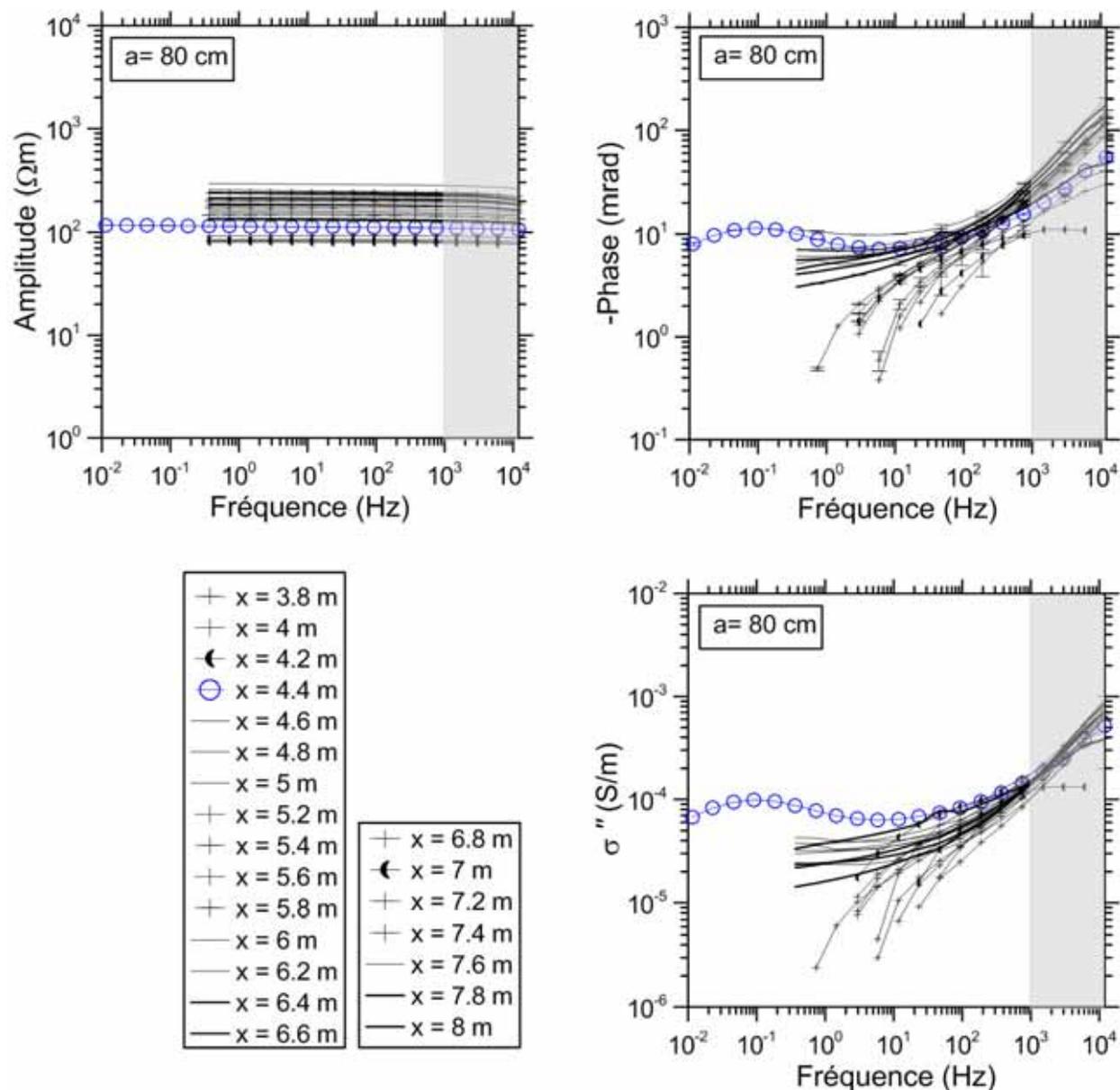


Figure II.49. Spectres de l'amplitude de la résistivité complexe, de la phase et de la partie imaginaire de la conductivité apparente pour l'ensemble des mesures spectrales réalisées sur le profil PPS au radier dans la galerie Est-96 pour l'espacement inter-électrode égal à 80 cm (dispositif : Wenner- α). La zone en gris indique les fréquences susceptibles de présenter un effet instrumental parasite lié aux basses résistivités du milieu.

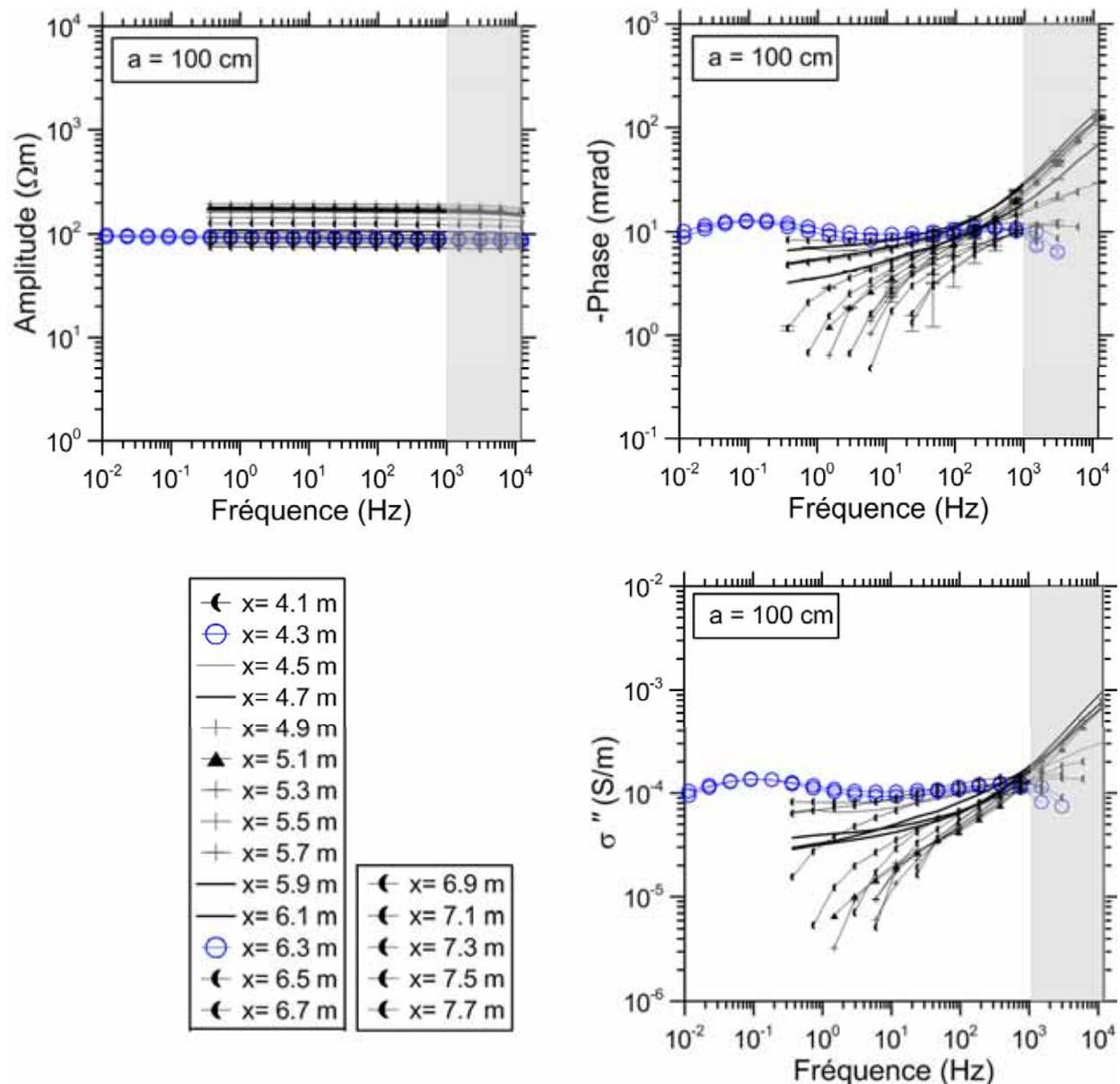


Figure II.50. Spectres de l'amplitude de la résistivité complexe, de la phase et de la partie imaginaire de la conductivité apparente pour l'ensemble des mesures spectrales réalisées sur le profil PPS au radier dans la galerie Est-96 pour l'espacement inter-électrode égal à 100 cm (dispositif : Wenner- α). La zone en gris indique les fréquences susceptibles de présenter un effet instrumental parasite lié aux basses résistivités du milieu.

Concernant les spectres d'amplitude :

Les Figures II.46 à II.50 montrent une différence importante entre les amplitudes acquises pour les écartements de ($a = 20$ cm, 40 cm, 60 cm) et celles obtenues pour les écartements de ($a = 80$ cm, 100 cm). Les amplitudes varient entre [100 et 600 $\Omega \cdot \text{m}$] pour des écartements plus petits ($a = 20$ cm, 40 cm, 60) et entre [70 et 300 $\Omega \cdot \text{m}$] pour le reste ($a = 80$ cm, 100 cm). Les courbes en bleu associées à des phénomènes probables de polarisation du

milieu aux basses fréquences, montrent des résistivités apparentes de l'ordre de [400-550 $\Omega \cdot m$] pour des petits écartements inter-électrodes ($a = 20 \text{ cm}$, 40 cm) et de [100 $\Omega \cdot m$] pour les grandes écartements ($a = 60 \text{ cm}$, 80 cm , 100 cm).

Concernant les spectres de la phase apparente :

Nous observons des pics de phases pour des fréquences inférieures à 1 Hz (les courbes en bleu) sur les spectres des différents écartements inter-électrodes : Ces pics qui correspondent à des phénomènes probables de polarisation du milieu, possèdent des valeurs de l'ordre de 10 ou 20 mrad au niveau des *fractures tectoniques remplies de calcite*.

Concernant les spectres de conductivité imaginaire apparente :

Les spectres de conductivité imaginaire confirment la polarisation aux basses fréquences observées sur les spectres de phase.

❖ Sections de résistivité complexe et de phase inversée pour différentes fréquences

L'inversion des données de résistivité et de phase ont été effectuées fréquence par fréquence avec le logiciel Res2DInv. Les fichiers à inverser ont été préparés en rassemblant tous les données spectrales disponibles sur le profil PPS au radier pour tous les écartements inter-électrodes et positions spatiales dans un même fichier pour une fréquence choisie. Les fréquences utilisées lors de ce travail furent les suivantes $f = 23 \text{ Hz}$, 46 Hz , 93 Hz , 187 Hz , 375 Hz , 750 Hz . Ces dernières correspondent à une acquisition réalisée avec le dispositif Wenner- α . Considérant l'inversion des données acquises avec le dispositif Wenner-Schlumberger, on présente les sections inversées pour les fréquences $f = 11 \text{ Hz}$, 23 Hz , 46 Hz , 93 Hz , 187 Hz , 375 Hz , 750 Hz . Le choix des bornes de la gamme de fréquence pour l'inversion a été faite en fonction de deux considérations. Les fréquences minimales ont été choisie suffisamment hautes afin de ne pas présenter les mêmes comportements électriques qu'une acquisition de type méthode de résistivité électrique (DC). Concernant la fréquence maximale, nous avons évité de traiter les données supérieures à 1 kHz pour éviter d'intégrer des effets instrumentaux. Par conséquent, la fréquence maximale de 750 Hz a été choisie. L'échantillonnage en fréquences respecte celui de l'appareil de mesure (i.e., SIP FUCHS II).

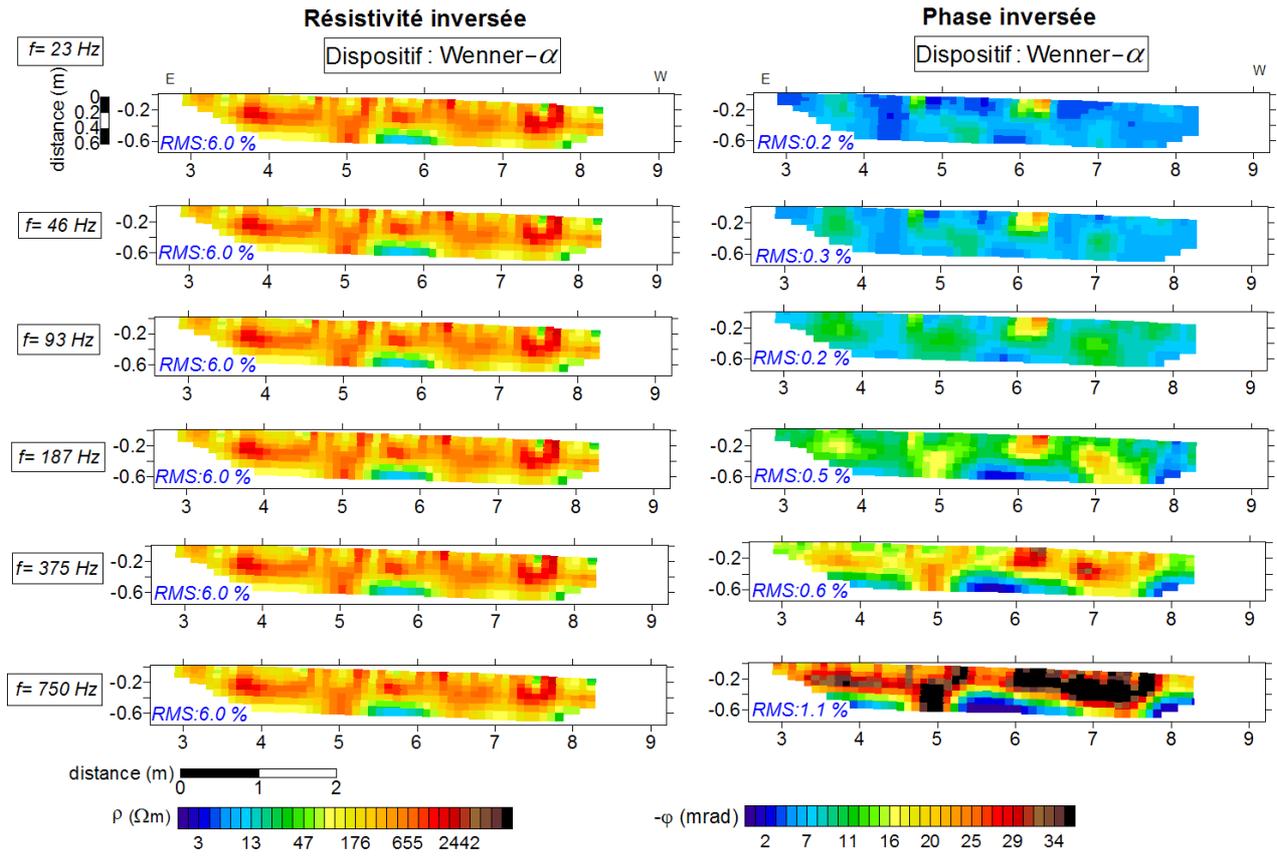


Figure II.51. Sections de résistivité complexe et de la phase inversée sur le profil longitudinal au radier dans la galerie Est-96 pour 23 Hz, 46 Hz, 93 Hz, 187 Hz, 375 Hz, 750 Hz (dispositif : Wenner- α), nombre d'itération : 4).

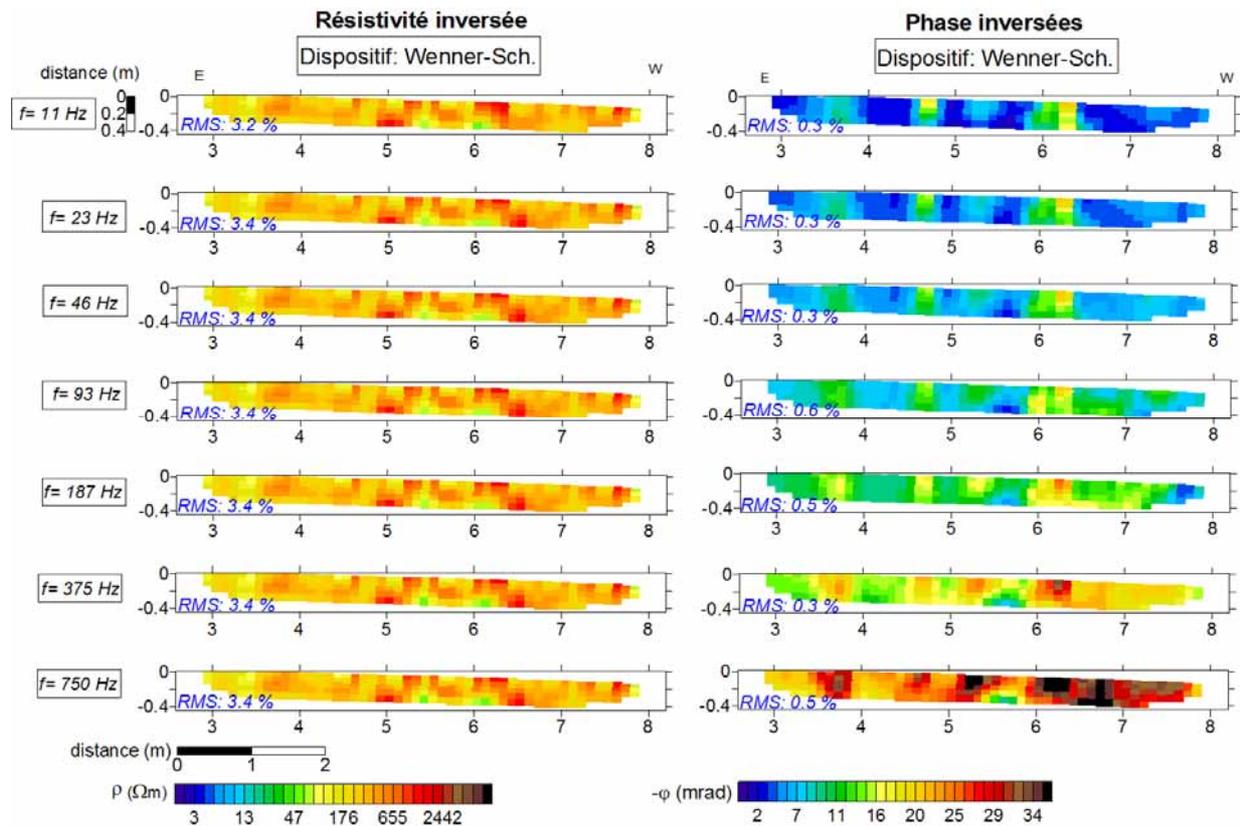


Figure II.52. Sections de résistivité et de phase inversée sur le profil longitudinal au radier à la galerie Est-96 pour 11 Hz, 23 Hz, 46 Hz, 93 Hz, 187 Hz, 375 Hz, 750 Hz (dispositif : Wenner-Schlumberger, nombre d'itération : 4).

Concernant les sections de résistivité complexe inversée, pour les deux dispositifs et toutes les fréquences, nous n'observons pas de dispersion fréquentielle de la résistivité. La réponse du milieu est assez identique pour toute la gamme de fréquences d'étude (de 11 Hz à 750 Hz) (Figures II.51-52). Les sections de résistivité complexe inversée sont cohérentes avec les spectres d'amplitude de la résistivité complexe apparente (Figures II.46 à II.50) : c'est assez logique d'obtenir des sections inversées de résistivité identiques pour toutes les fréquences à partir de spectres de $|\rho^*|$ apparent plats (qui attestent aux basses fréquences l'existence d'un milieu globalement peu polarisable).

En surface, on observe une couche de résistivité élevée ($\geq 300 \Omega.m$) quasi-continue correspondant à l'EDZ d'origine mécanique. L'extension de cette couche recouvre la profondeur d'investigation (44 cm pour le dispositif Wenner-Schlumberger, 75 cm pour le dispositif Wenner- α).

Concernant les sections de phases inversée, nous pouvons schématiquement distinguer des caractéristiques différentes suivant la partie du spectre étudiée (Figures II.51-52). Pour $f \leq 23$ Hz, ces sections représentent des valeurs de phase localement élevées en

surface (≥ 9 mrad) (**Figures II.51-52** à $x=3,8$ m, 4,6 m, 6,3 m). Ces anomalies correspondent encore aux zones de fractures tectoniques remplies de calcite. Ce constat est particulièrement bien mis en évidence avec les sections du dispositif Wenner-Schlumberger (dispositif sensible aux structures horizontales et verticales) (**Figure II.52**).

Pour $f \geq 187$ Hz, en surface, on observe une couche quasi-continue présentant des valeurs de phases plus élevées (≥ 16 mrad). Elles atteignent même la valeur de [55 mrad] pour $f = 750$ Hz et le dispositif Wenner- α (NB : il convient de noter que l'échelle de couleur sur la **Figure II.52** a été limitée à la valeur maximum de 35 mrad pour mettre en exergue les anomalies de faibles valeurs). La couche de valeurs élevées de phase en surface correspond assez bien à la couche de valeurs élevées de l'amplitude de résistivité associée à l'EDZ défini précédemment. Autrement dit, on note une corrélation significative entre les sections de phase inversée aux moyennes fréquences et les sections de l'amplitude de résistivité inversée.

2.6.5. Synthèse et discussion des résultats du profil au radier

Nous proposons sur la **Figure II.53** une comparaison entre les résultats des prospections PP dans les domaines temporel et fréquentiel obtenus sur le profil au radier de la galerie Est-96. Les sections de résistivités inversées obtenus par les méthodes PPT et PPS sont cohérents entre-eux : l'EDZ existante sous le radier de la galerie Est-96 se présente comme une couche quasi-continue de valeurs élevées de résistivités ($\geq 300 \Omega \cdot m$).

Les sections de phase inversée (aux moyennes fréquences i.e. ≥ 187 Hz ; méthode PPS), celles de résistivité inversée (PPS) et celles de résistivité inversée (PPT) sont également cohérentes entre-eux. La phase à moyenne fréquence et la résistivité semblent donc sensibles aux mêmes phénomènes ayant induit l'EDZ (fissuration et microfissuration du point de vue mécanique et désaturation du point de vue hydrique). Ce résultat obtenu *in situ* confirme donc ceux obtenus au laboratoire ([Cosenza et al., 2007](#) ; [Jougnot et al., 2010](#)) : la phase (mesurée à moyenne et/ou haute fréquence) augmente avec la désaturation et avec la déstructuration mécanique de l'argilite.

Les sections de chargeabilité inversées (méthode PPT) sont bien corrélés avec celles de la phase inversée aux basses fréquences (i.e. ≤ 23 Hz ; méthode PPS) : ils indiquent dans les deux cas la présence d'anomalies significatives localisées au droit de fractures tectoniques remplies de calcite. Ce résultat robuste puisqu'il s'appuie sur l'acquisition de données quasi-indépendantes (PPT et PPS) mérite ici d'être discuté.

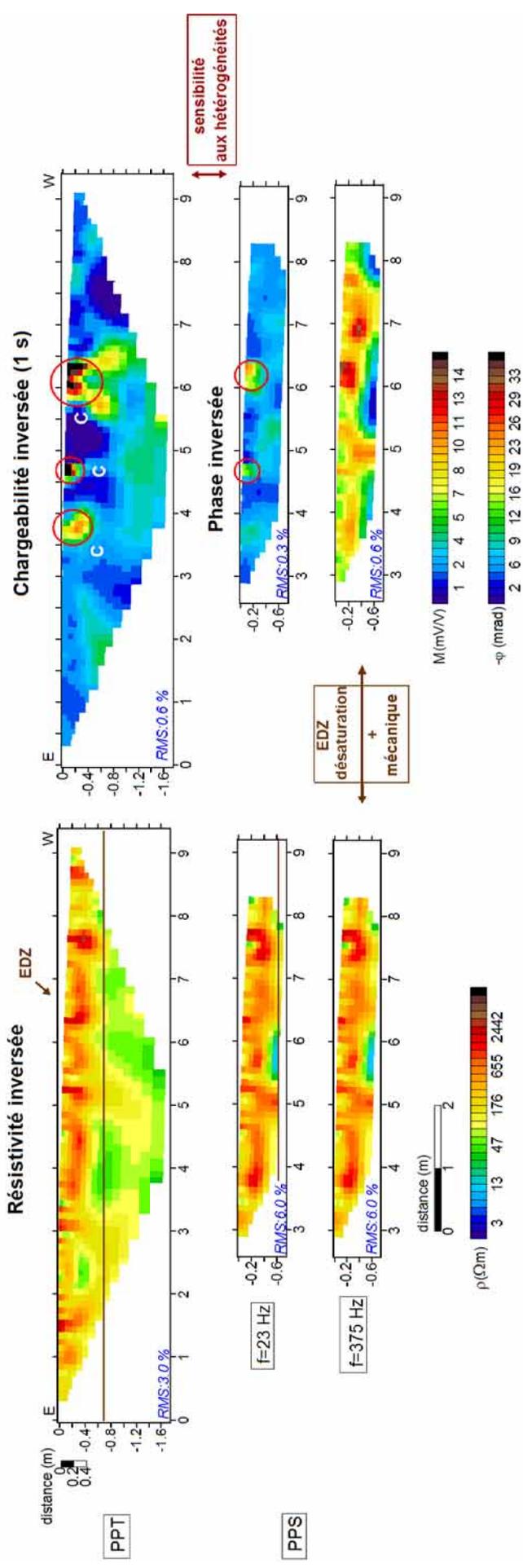


Figure II.53. Comparaison des représentations de résistivité, chargeabilité et phase inversée sur le profil au radier de la galerie Est-96 (NB : les coordonnées en X des représentations inversées sont bien évidemment ramenées à la même origine).

Quelle est l'origine physique des anomalies de chargeabilité associées aux fractures tectoniques remplies de calcite ? Pour répondre à cette question, on peut raisonnablement mettre en avant deux effets :

- Un effet de polarisation d'interface de type Maxwell-Wagner,
- Un effet géométrique associé à une minéralisation particulière du remplissage des fractures tectoniques.

Le premier effet, i.e., l'effet Maxwell-Wagner, serait directement lié au fort contraste électrique existant entre le remplissage *continu* de la fracture par de la calcite (matériau résistant électriquement) et la matrice argileuse plutôt conductrice. Ce remplissage continu par un matériau isolant assurerait aux fractures tectoniques des propriétés diélectriques élevées en constituant des barrières électriques efficaces pour l'accumulation de charges électriques. (A *contrario*, le caractère très discontinu du remplissage de l'air des fractures néoformées, à cause des nombreux contacts entre les lèvres de la fracture, ne permettrait pas à ces dernières de leur conférer des propriétés de polarisation particulières dans la gamme de fréquence d'étude). La géométrie particulière de ce système (fractures verticales isolantes vis-à-vis de quadripôles disposés horizontalement sur la surface du radier) pourrait qualitativement expliquer les anomalies mesurées. En effet, [Sen \(1981\)](#) a montré théoriquement que des corps allongés isolants disposés dans une matrice conductrice et soumis à des champs électriques variables perpendiculaires (à la direction principale du corps isolant) induisaient une forte polarisation du milieu.

Le deuxième effet (effet géométrique associé à la présence de minéraux métalliques particulière du remplissage des fractures) s'introduit ici assez naturellement dans notre contexte car des chargeabilités *apparentes négatives* ont été mesurées sur des quadripôles disposés au droit des fractures tectoniques (**Figure II.54**). En effet, [Brandes \(2005\)](#) (voir aussi [Bertin, 1968](#) ; [Dieter et al. 1969](#), [Coggon, 1971](#) ; [Sumner, 1976](#)) a constaté qu'une chargeabilité apparente négative est souvent liée la présence des structures 2D ou 3D polarisables de type dyke. C'est un effet géométrique lié aux positions relatives des électrodes de mesure disposées horizontalement vis-à-vis de la direction verticale du dyke ([Telford et al., 1976](#)). Mais pourquoi pourrait-on assimiler les fractures tectoniques du site à des dykes polarisables ? Pour répondre à cette question, il apparaît nécessaire d'investiguer la nature minéralogique du remplissage des fractures qui pourrait faire apparaître une minéralisation favorable à une polarisation élevée du système (fracture seule ou fracture-encaissant argilite).

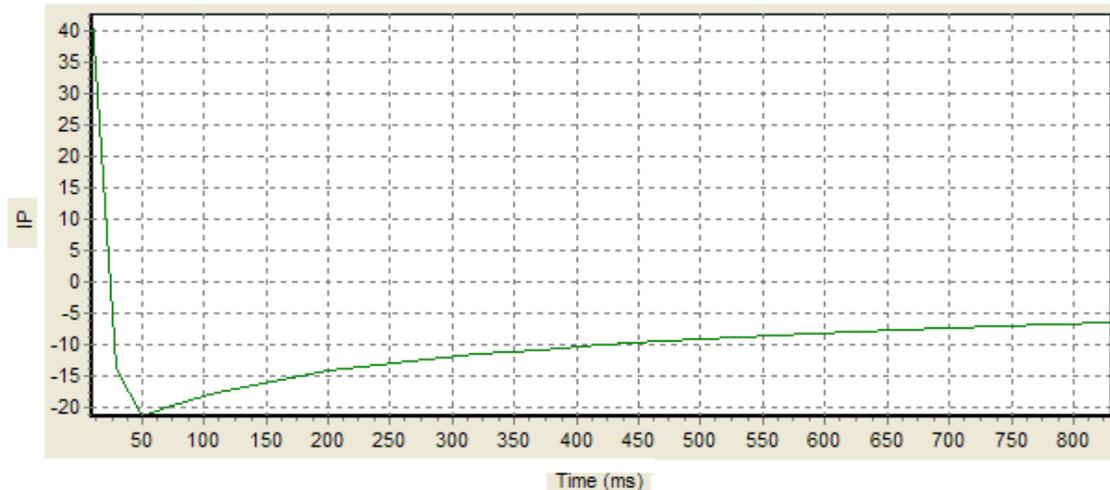


Figure II.54. Courbe de décroissance de chargeabilité partielle en fonction de temps au niveau d'une fracture tectonique remplie de calcite (nous remarquons la chargeabilité partielle négative mesurée).

Pour cela, un prélèvement du remplissage d'une fracture tectonique a été effectué. Ce prélèvement a fait apparaître trois constituants : (1) la matrice carbonatée, (2) des filonnets cristallisés et (3) un plaquage saccharoïde. Le **Tableau II.6** donne les teneurs indicatives en minéraux majeurs et mineurs obtenues par analyse des diffractions des rayons X (DRX) dans trois prélèvements associés à ces trois constituants.

Tableau II.7. Teneurs minéralogiques indicatives (en % massique) pour trois habitus de l'échantillon prélevé au niveau du remplissage d'une fracture remplie de calcite sur le profil électrique au radier de la galerie Est-96 (analyses DRX réalisées par C. Fontaine, HydrASA–Poitiers, à l'aide d'un dispositif Dremel équipé d'une micro-pointe diamantée).

	Matrice carbonatée	Filonnet cristallisé	Plaquage saccharoïde
Calcite	40	73	57
Quartz	24	10	10
Feldspath K	--	---	---
Pyrite	16	11	29
Mica	13	3	2
Kaolinite	7	trace	trace
Interstratifié I/S	---	---	trace
Chlorite	---	3	2
Gypse	trace	non détecté	non détecté

L'observation à l'œil nu des prélèvements a montré une matrice carbonatée en général massive, grise, se cassant de manière irrégulière et présentant une surface squameuse. Il s'agissait pour l'essentiel d'un mélange de calcite (phase dominante), de quartz et de pyrite, associés à de petites quantités de phyllosilicates (illite/mica et kaolinite). Cette matrice pouvait

être recoupée par de petits filonnets d'épaisseur millimétrique formés de cristaux (taille d'environ 1 à 2 mm) transparents et translucides, dont certains s'irisaient sous éclairage. Inclus dans ces filonnets, on a distingué parfois de petits cristaux (taille de 0,1 à 1 mm), jaunes à mordorés, à l'éclat métallique (sulfure : de la pyrite probablement dont certains cristaux étaient peut être oxydés). Enfin, des fragments allongés ont montré des plaquages de matière blanche (épontes de microfissures ?), opaque et finement saccharoïde, dans lesquels aucun minéral à éclat métallique n'est visible sous binoculaire.

Ainsi, l'analyse DRX et visuelle des prélèvements d'un remplissage a confirmé la présence en quantité significative de minéraux de pyrite ($\geq 10\%$). Cette présence significative de pyrite dans les fractures tectoniques subverticales apparaît donc comme un candidat naturel pour expliquer les anomalies mises en évidence tant en PPT qu'en PPS. En effet comme nous l'avons vu dans la **section 1.4.1** et comme l'attestent également les récents travaux dans le domaine spectral (**Figure II.54**), une faible teneur en pyrite d'une roche minéralisée est bien détectée par la méthode PP.

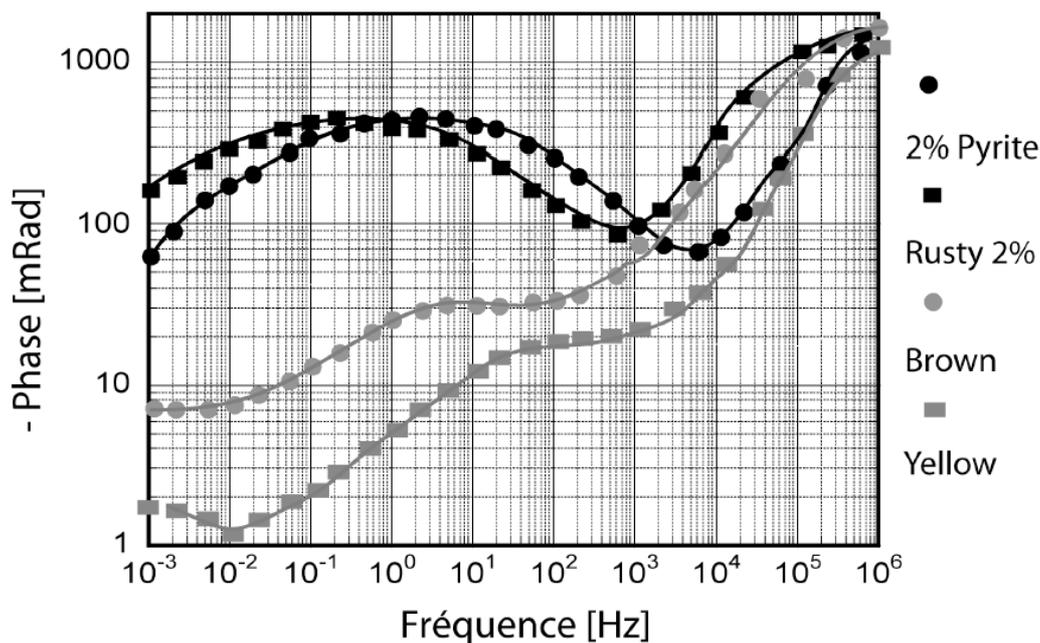
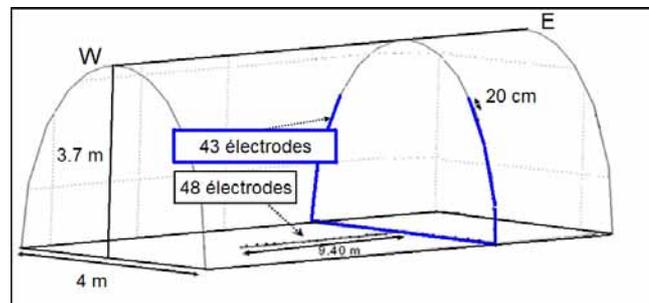


Figure II.55. Mesures de la phase pour quatre échantillons provenant d'un déblai minier (d'après Campbell *et al.*, 2000). Les échantillons 'Brown' et 'Yellow' ne contiennent pas de pyrite. L'échantillon 'Rusty' contient des oxydes de fer.

2.6.6. Résultats des prospections PPT et résistivité électrique sur le profil en arc



❖ Pseudosections de résistivité et chargeabilité apparente

La pseudosection de résistivité et de chargeabilité a été tracée uniquement pour le dispositif Wenner- α . Les résistivités apparentes ont été corrigées par les coefficients géométriques (k) calculés à partir du logiciel de modélisation en éléments finis « Comsol Multiphysics » (**annexe A4**). L'interpolation des valeurs de résistivité et chargeabilité apparente a été réalisée à partir du logiciel Surfer à l'aide de l'interpolateur de type « triangulation with linear interpolation ».

Cet interpolateur est particulièrement adapté pour représenter les valeurs de résistivité ou de chargeabilité (valeurs non-additives). Il est un interpolateur rapide. Un autre avantage de triangulation est qu'avec assez de données, la triangulation peut conserver les lignes de coupure définies (discontinuités). Par exemple, si une faille est délimitée par assez de points aux deux côtés de la faille, la grille produite par la triangulation montrera la discontinuité. (<http://www.seismo.unr.edu/ftp/pub/louie/class/333/contour/surfer.html>).

La pseudosection présentée sur la **Figure II.56**, indique une variation des résistivités apparentes dans la gamme de [30-300 $\Omega \cdot m$] pour le dispositif Wenner. La pseudosection met en évidence une zone de résistivité élevée en surface au radier du profil en arc. Cette zone correspond fort probablement à l'EDZ. Les chargeabilités apparentes sont faibles en surface de l'ordre de [3 mV/V]. Ces valeurs de chargeabilité augmentent avec la profondeur. Toutefois, on se gardera bien ici de commenter avec précision les valeurs pour des pseudo-profondeurs plus élevées puisque ce sont ici des grandeurs *apparentes* qui sont présentées. Une inversion de ces données est nécessaire pour étudier avec pertinence l'évolution de la résistivité et de la chargeabilité avec la profondeur.

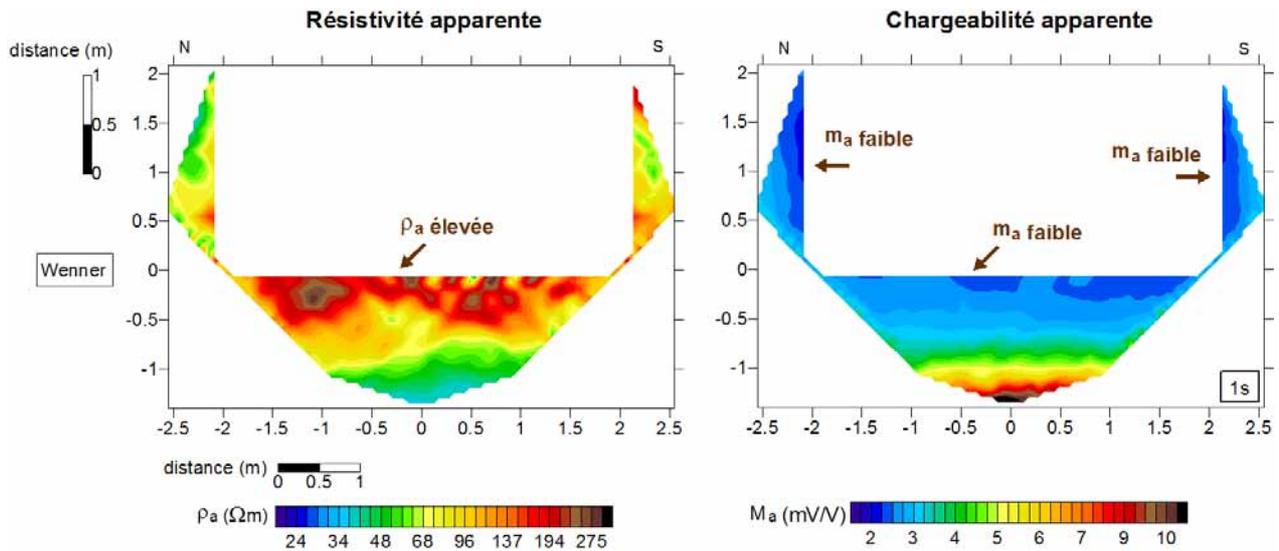


Figure II.56. Pseudosection de résistivité et chargeabilité sur le profil en arc dans la galerie Est-96 en juin 2008 avec le dispositif Wenner- α (créneau d'injection : 1 s). L'interpolation est réalisée à partir du Surfer 8.0 par l'interpolateur de type « triangulation with linear interpolation ».

❖ Inversion du profil en arc (Res2DInv)

L'inversion des résistivités et chargeabilités apparentes acquises sur le profil en arc a été réalisée à partir de deux logiciels. Nous présentons tout d'abord, la stratégie de l'inversion appliquée à partir du logiciel Res2DInv (voir **section 2.5.1**). Nous rappelons qu'avec ce logiciel, il n'est pas possible d'inverser l'ensemble du jeu de données en une seule fois puisque le logiciel est conçu pour des inversions en 2D avec une légère topographie (et non pour des géométries complexes de la surface du sol comme c'est ici le cas dans une galerie souterraine). Par conséquent, les données ont été séparées en trois groupes : les données de la paroi Nord, celles de la paroi Sud, et celles du radier. Lors de ce tri, les acquisitions faites en utilisant les électrodes localisées à l'intersection du radier et des parois verticales n'ont pas été prises en compte afin de ne pas introduire de probables artefacts associées à la particularité de cette position. Ce tri a été répété pour chaque dispositif. A la fin, trois fichiers de données par dispositif à inverser ont été obtenus (**Figure II.57**).

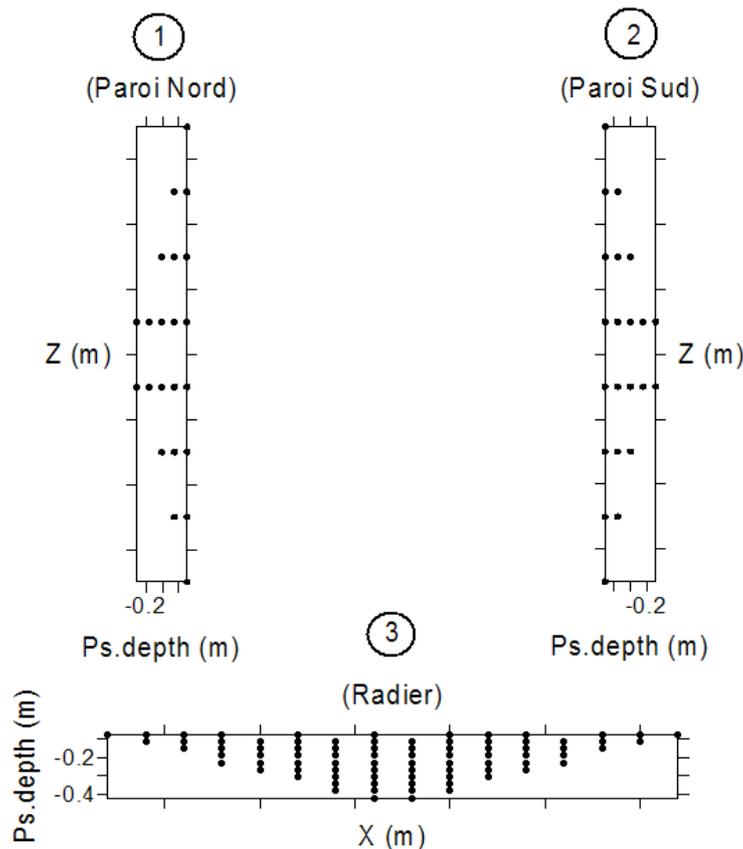


Figure II.57. Représentation des trois jeux de données préparés pour l'inversion avec Res2DInv. Cet exemple représente la distribution des données issue du dispositif Wenner-Schlumberger acquis en juin 2008 sur le profil en arc de la galerie Est-96 (les points noirs indiquent chaque point de mesure positionné dans l'espace selon la convention Barker (1989). Nous possédons ici 22 données par paroi verticale et 100 pour le radier).

Toutefois, ce tri par segment de la paroi a apporté pour certains dispositifs un nombre insuffisant de données pour l'inversion. En effet, le logiciel Res2DInv n'autorise l'inversion à condition que le nombre de données disponible soit minimum de vingt (p.ex. pour le dispositif Wenner- α). Ainsi, notre démarche s'est divisée en deux temps. Dans un premier temps, nous avons inversé les pseudosections possédant un nombre suffisant de données. Puis dans un deuxième temps, des fichiers d'inversion au format « general array » ont été préparés. Ces derniers permettent de rassembler les données de différents dispositifs dans un seul fichier et de les inverser ensemble.

Ainsi, pour le dispositif Wenner- α (W_a) les trois fichiers : (1) paroi Nord, (2) paroi Sud, (3) radier, ont été rassemblés avec ceux correspondant du dispositif Wenner-Schlumberger (W_s) dans trois fichiers séparés. Finalement nous avons obtenu (1) paroi Nord W_a+W_s , (2) paroi Sud W_a+W_s , (3) radier W_a+W_s . Cette technique permet d'améliorer l'échantillonnage dans l'espace et aussi donc la résolution (**Tableau II.8**).

Tableau II.8. Récapitulatif du nombre de données correspondant à différentes parties du profil en arc à la galerie Est-96 en fonction du dispositif utilisé.

dispositif	paroi Nord	radier	paroi Sud
Wenner- α +Wenner Sch.	37	145	37
Wenner- α	15	45	15
Wenner-Sch.	22	100	22
Dipôle-dipôle	20	69	20

Les **Figures II.58-59** suivantes représentent les résistivités et chargeabilités inversées pour tous les dispositifs pour les différentes parties du profil en arc. Lors de l'inversion, la topographie a été prise en compte. Nous présentons sur **la Figure II.58** les limites de l'EDZ et de la roche saine. Nous utilisons deux échelles de couleur en résistivité pour l'interprétation des parois verticales et du radier puisque l'endommagement de ces deux parties ne semble pas du même ordre de grandeur.

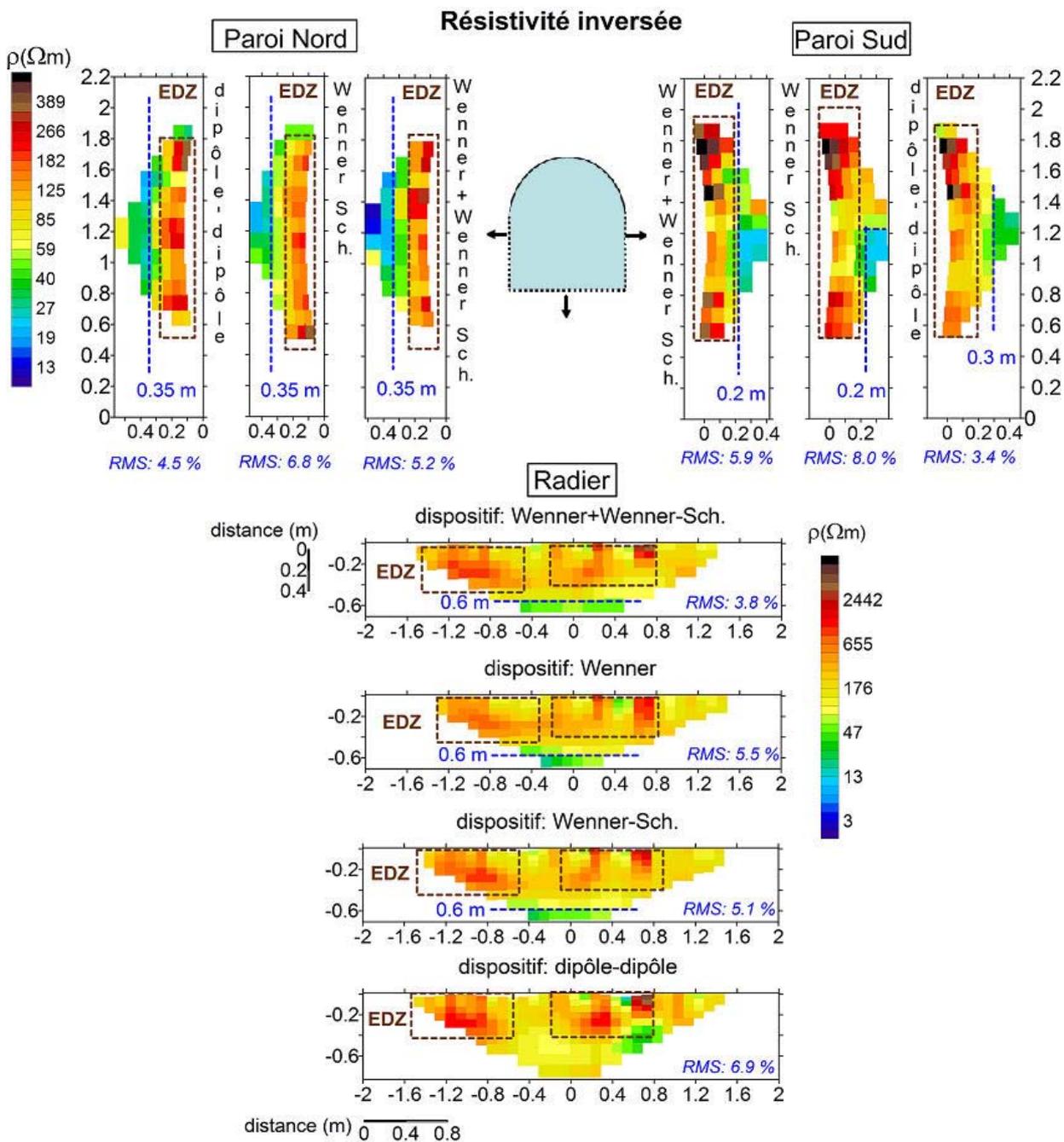


Figure II.58. Sections de résistivité inversée avec Res2DInv sur le profil en arc de la galerie Est-96 avec les dispositifs Wenner- α +Wenner Schlumberger, Wenner Schlumberger, dipôle-dipôle pour trois différentes parties du profil : paroi Nord, paroi Sud, radier (juin 2008). Les lignes en marron indiquent les limites remarquables de l'EDZ, les lignes en bleu indiquent les limites probables de la zone saine. On donne sur les sections les erreurs RMS obtenues (nombre d'itérations : 2). * Les parois verticales comprennent 11 électrodes et le radier comprend 19 électrodes sans la prise en compte des électrodes à l'intersection « paroi verticale-radier ».

Concernant les sections de résistivités inversées (Figure II.58) :

Paroi Nord :

Les résistivités inversées varient entre [12 et 387 $\Omega \cdot m$]. Les valeurs les plus élevées (> 100 $\Omega \cdot m$) apparaissent à la proche surface des parois à l'interface air-roche. L'épaisseur de cette zone de résistivités élevées atteint 0,25 m pour la paroi Nord. Nous notons une zone de transition fine (0,1 m d'épaisseur environ) en profondeur avant d'atteindre la roche saine (qui débute à 0,35 m à partir de la surface). Tous les types de dispositifs confirment la profondeur de la roche saine. Cette zone saine est caractérisée par des résistivités inversées inférieure à [20-30 $\Omega \cdot m$].

Paroi Sud :

Les résistivités inversées varient entre [22 et 797 $\Omega \cdot m$] pour la paroi Sud. Comme pour la paroi Nord, les résistivités élevées se trouvent à la proche surface de la paroi, i.e. à l'interface air-roche. L'épaisseur de la zone de résistivité élevée, interprété comme l'EDZ, est de 0,2 m pour la paroi Sud (> 100 $\Omega \cdot m$). La roche saine semble apparaître en partie à partir de 0,2 m par rapport à la surface selon les dispositifs Wenner- α + Wenner-Schlumberger et Wenner Schlumberger et de 0,3 m selon le dispositif dipôle-dipôle. Même si la profondeur de l'EDZ est très proche pour les deux parois verticales, l'état de l'endommagement de la paroi Sud semble plus marqué (contraste plus élevé en termes de résistivité entre EDZ et zone saine). Cet aspect est bien visible surtout aux extrémités du profil. Nous notons également dans l'EDZ une différence de résistivité interprétée entre celles localisée en hauteur et celles localisées en bas du profil : cette différence s'explique par un plan de calcite qui affleure en partie sur cette paroi Sud.

Radier :

Les résistivités inversées varient entre [20 et 2325 $\Omega \cdot m$] pour le radier. Certaines hétérogénéités en surface atteignent localement des valeurs de [4000 $\Omega \cdot m$]. L'échelle de couleur utilisée pour cette partie du profil en arc, est identique à celle utilisée pour le profil longitudinal au radier afin de faciliter la comparaison de l'EDZ transversale et longitudinale.

L'épaisseur de l'EDZ au radier varie entre 0,4 et 0,6 m selon tous les dispositifs sauf le dipôle-dipôle. Ce dernier représente une EDZ un peu plus profonde autour de 0,8 m. L'EDZ au radier est caractérisée par une zone quasi-continue des résistivités inversées > 140 $\Omega \cdot m$ (en jaune sur la **Figure II.58**). Il existe deux zones de fortes résistivités dans cette zone continue qui se caractérise par des valeurs de > 300 $\Omega \cdot m$ (en rouge sur la **Figure II.58**, entouré). Ces deux zones coïncident avec la position d'ensembles de fractures bien visibles sur le radier de ce profil (**voir annexe A2**).

Concernant les sections de chargeabilité inversées (Figure II.59) :

Paroi Nord :

Les chargeabilités inversées sont faibles, entre [1,6 et 2,3 mV/V]. Les plus faibles valeurs de chargeabilité sont observées sous la forme d'une zone continue à la proche surface de la paroi, i.e. à l'interface air-roche comme pour les résistivités inversées (**Figure II.58**). Les sections de chargeabilité inversée confirment l'origine hydrique (désaturation) de l'EDZ aux parois verticales (faibles valeurs de chargeabilité).

La réponse intrinsèque (dans la zone saine) en chargeabilité de l'argilite est très faible (de l'ordre de quelques mV/V) mais plus élevée que celle obtenue dans l'EDZ située en surface. Au regard des sections de résistivité inversée et de cette tendance, la réponse de la zone endommagée en paroi en termes de chargeabilité se manifeste donc par de très faibles valeurs de chargeabilité. L'endommagement aurait donc eu tendance dans ce contexte à diminuer la chargeabilité de la roche. En s'appuyant sur ce constat, l'épaisseur des faibles valeurs de chargeabilité interprétée associée à l'EDZ, est alors de l'ordre de 0,35-0,40 m pour la paroi Nord.

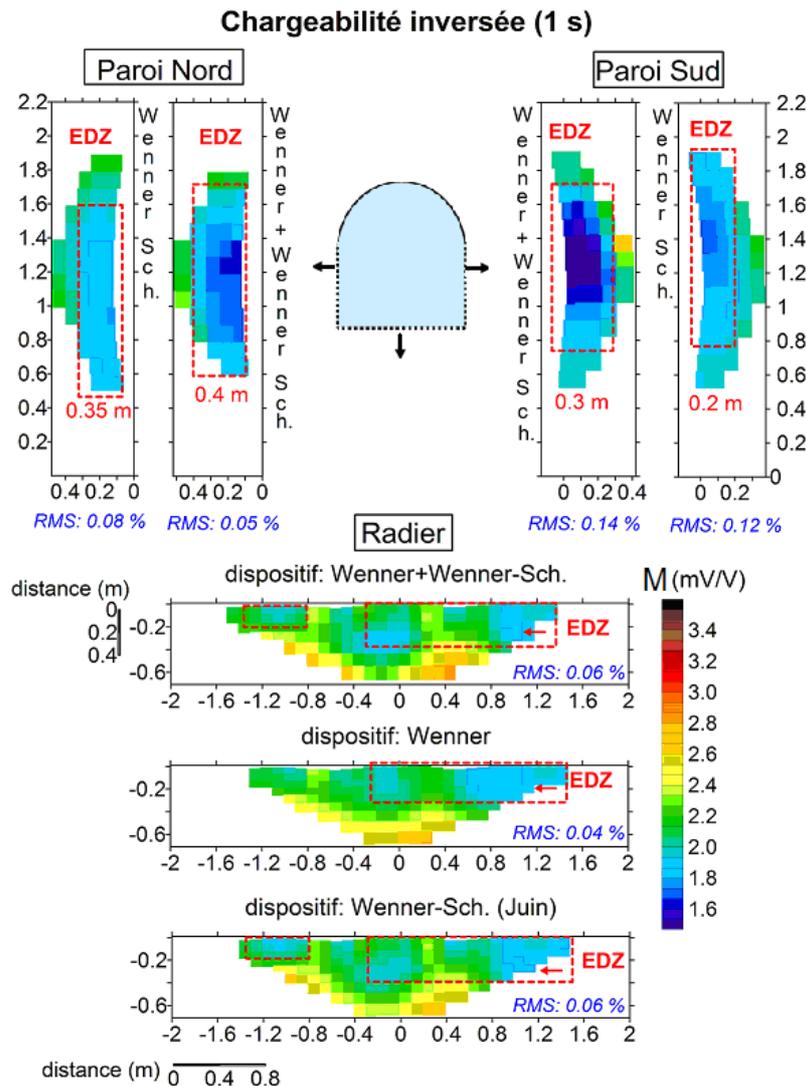


Figure II.59. Sections de chargeabilité inversée avec Res2DInv sur le profil en arc de la galerie Est-96 avec les dispositifs Wenner- α +Wenner Schlumberger, Wenner- α et Wenner Schlumberger pour trois différentes parties du profil : paroi Nord, paroi Sud, radier (juin 2008) (créneaux d'injection : 1 s). Les lignes rouges indiquent les limites probables de l'EDZ interprété comme la désaturation.

Paroi Sud : Les chargeabilités inversées sur la paroi Sud ont les mêmes caractéristiques que sur la paroi Nord : peu de variation importante et des chargeabilités globalement faibles. Les valeurs obtenues sont comprises entre [1,4 et 2,6 mV/V]. Comme pour la paroi Nord, les plus faibles valeurs de chargeabilité sont localisées en surface de la paroi, à l'interface roche-air. L'EDZ ici définie comme pour la paroi Nord par la zone de plus faibles chargeabilités, représente une épaisseur entre 0,2 et 0,3 m.

Radier : Au radier les chargeabilités obtenues restent faibles et varient entre [1,8 et 2,8 mV/V]. Nous n'observons pas de zone continue de faibles chargeabilités comme pour les parois verticales. Il est donc plus difficile de définir proprement l'épaisseur de l'EDZ sur le

radier. Les faibles valeurs de chargeabilités s'organisent sous forme de zones localisées (entourées sur la **Figure II.59**, en rouge). Nous observons toutefois une légère dissymétrie entre la partie Sud et la partie Nord du profil : les valeurs de chargeabilité sont beaucoup plus faibles au Sud et apparaissent de plus en plus élevées vers le Nord. La fissuration importante à 0,8 m au radier (résistivités élevées en surface) pourrait expliquer cette dissymétrie.

A ce stade, nous avons étudié la performance de deux logiciels pour l'inversion d'une géométrie complexe : le profil en arc. **La Figure II.60** comprend les inversions de différentes parties du profil en arc suivant différents dispositifs électriques avec le logiciel Res2DInv ainsi que l'inversion du profil en arc avec le logiciel BERT (en 2D) pour le dispositif Wenner- α .

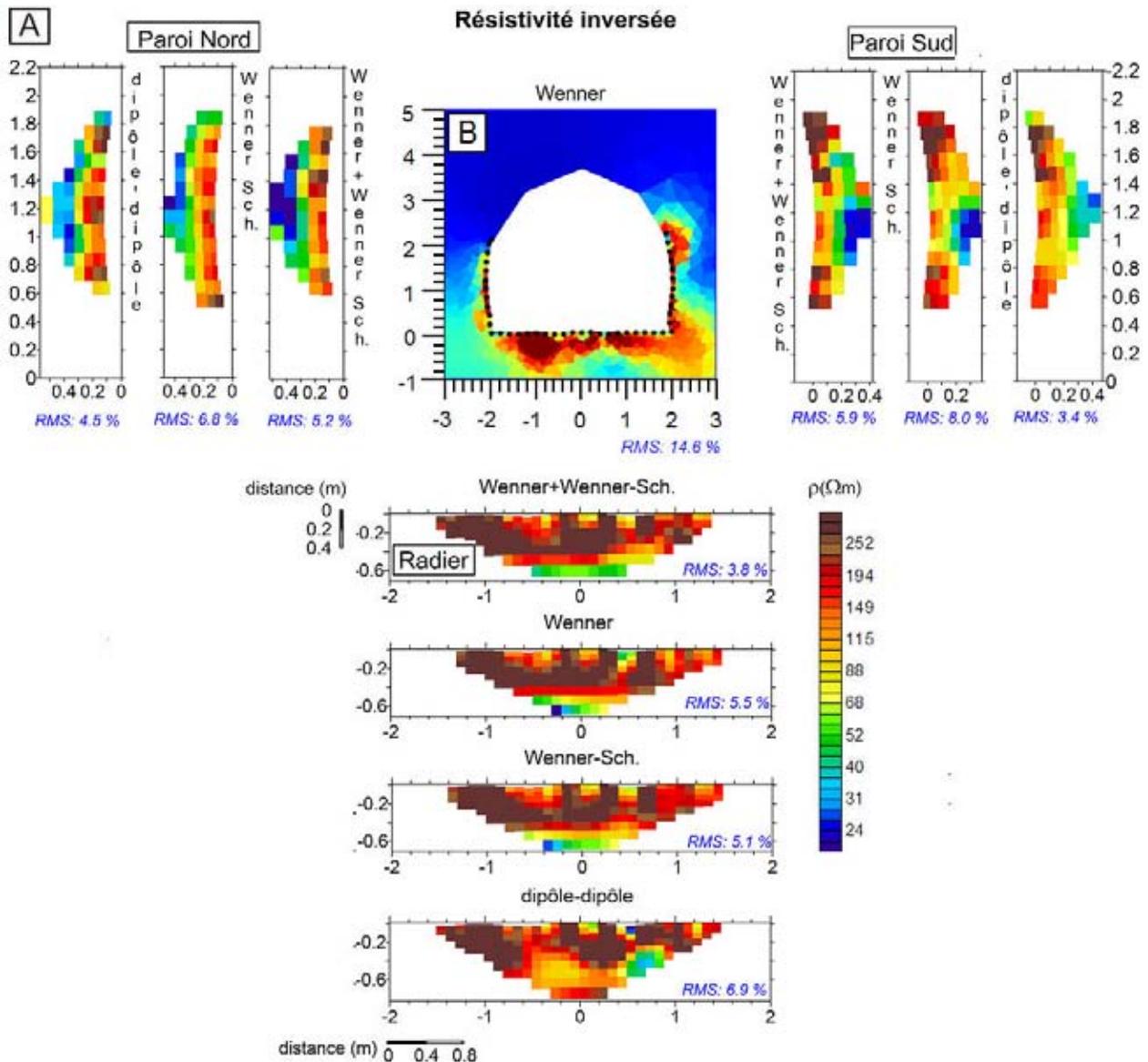


Figure II.60. Comparaison des sections de résistivité inversée avec les logiciels d'inversion : (A) Res2DInv et (B) BERT sur le profil en arc dans la galerie Est-96 (données juin 2008). Les points en noir sur la section inversée de résistivité avec BERT représentent les électrodes.

La **Figure II.60** met en évidence que les deux logiciels représentent des résultats parfaitement cohérents. Les outils numériques Res2DInv et BERT confirment que l'endommagement est plus important au radier. Pour les parois verticales, dans les deux cas d'inversion, la paroi Sud présente des endommagements locaux positionnés aux extrémités du profil. Cette étude a permis de valider notre stratégie d'inversion avec Res2DInv et de conclure qu'un logiciel qui tient compte de la complexité du profil n'apporte pas d'information supplémentaire décisive par rapport à la stratégie d'inversion utilisée. Par ailleurs, BERT ne permet pas d'inverser les données de chargeabilité pour cette géométrie.

2.6.7. Résultats des prospections PPS sur le profil en arc

❖ **Spectres de l'amplitude de résistivité complexe $|\rho^*|$, de la phase φ et de la conductivité imaginaire σ'' (PPS)**

Les spectres ci-dessous sur les **Figures II.61-62-63** représentent les mesures spectrales acquises avec le SIP FUCHS II pour une gamme de fréquences de 45 mHz (ou 366 mHz) à 12 kHz pour chaque position sur le profil en arc. Pour repérer la position de nos électrodes sur le profil, l'électrode indiquée n°1 a correspondu à l'électrode située la plus haute sur la paroi Sud (avec un espacement de 20 cm). Un dispositif Wenner- α a été utilisé avec trois nappes ($a=20$ cm, 40 cm, 60 cm). Au-delà de l'écartement inter-électrode de $a=60$ cm, nous avons observé l'intervention de l'effet instrumental et par conséquent, l'acquisition a été limitée jusqu'à cette troisième nappe. Les réponses spectrales ont été regroupées selon la position du quadripôle :

- en bleu pour la position de toutes les électrodes de mesure correspondant à la paroi Sud,
- en noir celles correspondant au radier,
- et en vert celles correspondant à l'intersection paroi verticale-radier et
- en rouge celles correspondant à la paroi Nord.

Les résistivités apparentes ont été corrigées par les coefficients géométriques (k) calculées à partir du logiciel de modélisation en éléments finis « Comsol Multiphysics » pour le profil en arc en considérant la séquence de mesure spectrale effectuée.

La **Figure II.61** montre les amplitudes de résistivité complexe ($\Omega \cdot m$) apparentes pour tous les espacements inter-électrodes ($a=20$ cm, 40 cm, 60 cm). Ces valeurs varient de [20 à 1000 $\Omega \cdot m$] en fonction de l'état d'endommagement et de la position de la mesure. Cette figure montre que la partie au radier du profil possède les amplitudes les plus élevées (30-1000 $\Omega \cdot m$ en noir) par rapport à celles mesurées aux parois (paroi Sud : 50-250 $\Omega \cdot m$, paroi Nord : 25-150 $\Omega \cdot m$). Ce résultat (même sur des valeurs apparentes) confirme les résultats de

prospection PPT obtenus sur le profil en arc : l'EDZ qui se traduit par des amplitudes élevées est plus importante sur le radier que sur les parois verticales. Les plus faibles valeurs d'amplitude (25-40 $\Omega.m$) pour les trois écartements apparaissent pour la paroi nord (en rouge). Ces résultats soulignent encore une fois la cohérence entre les prospections PPT et PPS.

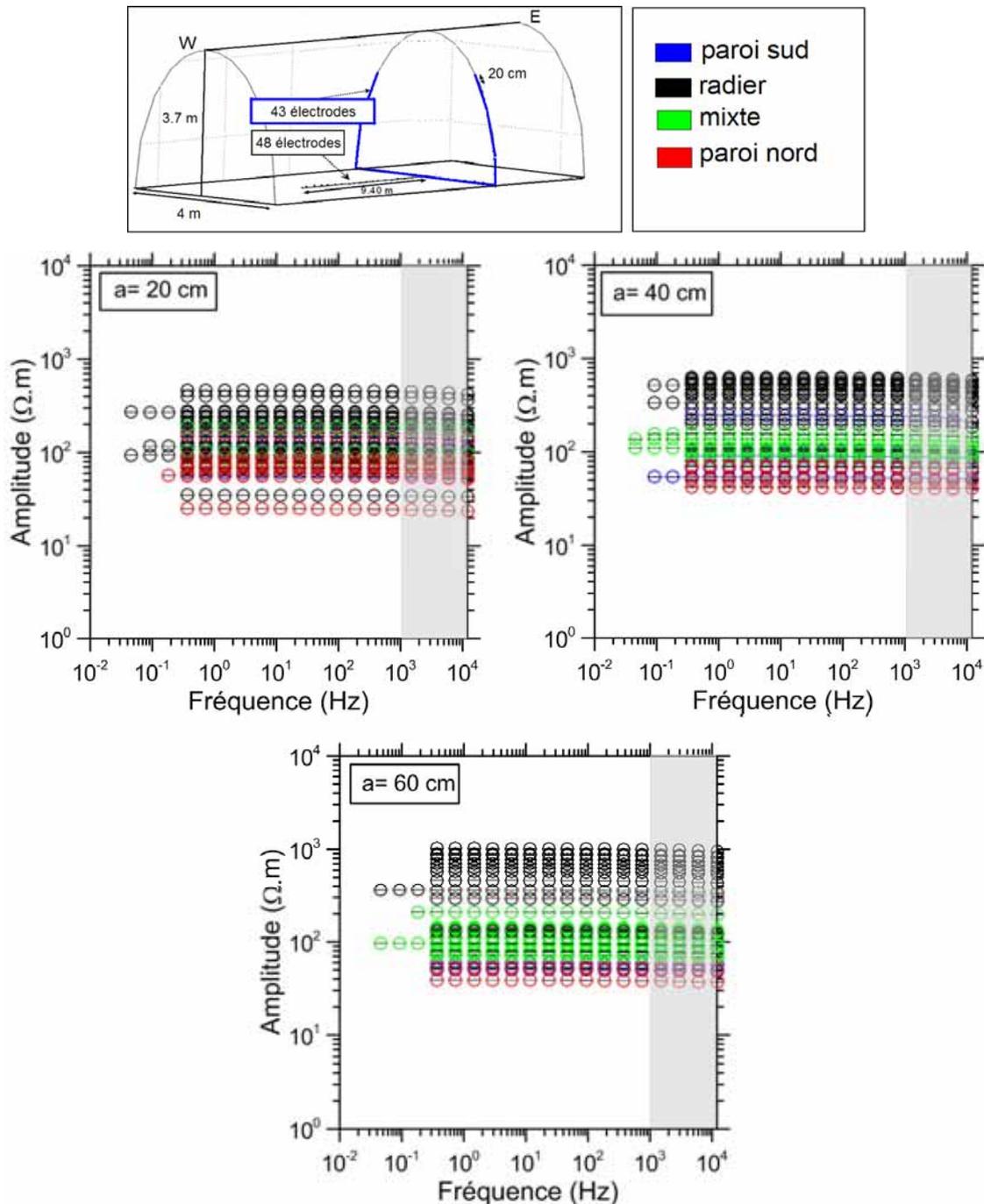


Figure II.61. Spectres d'amplitude de la résistivité complexe ($\Omega.m$) pour trois différents écartements inter électrodes a : 20 cm, 40 cm, 60 cm le long de tout le profil en arc de la galerie Est-96 avec le dispositif Wenner- α (juin 2008). Appareil de mesure : SIP FUCHS II. La zone en gris indique les fréquences susceptibles de présenter un effet instrumental parasite lié aux basses résistivités du milieu.

La **Figure II.62** représente la variation de la phase apparente (mrad) sur le même profil en fonction de la fréquence pour trois écartements inter-électrode. Globalement les phases varient entre [1 et 100 mrad] (pour le radier la gamme était de 1-300 mrad). La valeur de phase apparente la plus importante est obtenue pour une mesure correspondante à la paroi Sud où $a = 40$ cm. Cette mesure correspond probablement à un plan de calcite affleurant dans cette zone.

Sur l'ensemble du profil en arc, les spectres de phase ne présentent pas de pics de phases aux basses fréquences (autour de 1 Hz) comme obtenus pour le profil longitudinal au radier. On avait associé ces pics de phase à la réponse des fractures tectoniques remplies de calcite présentes sur le profil. Sur le profil en arc, on n'observe pas de fracture tectonique ce qui explique l'absence de pic de phase.

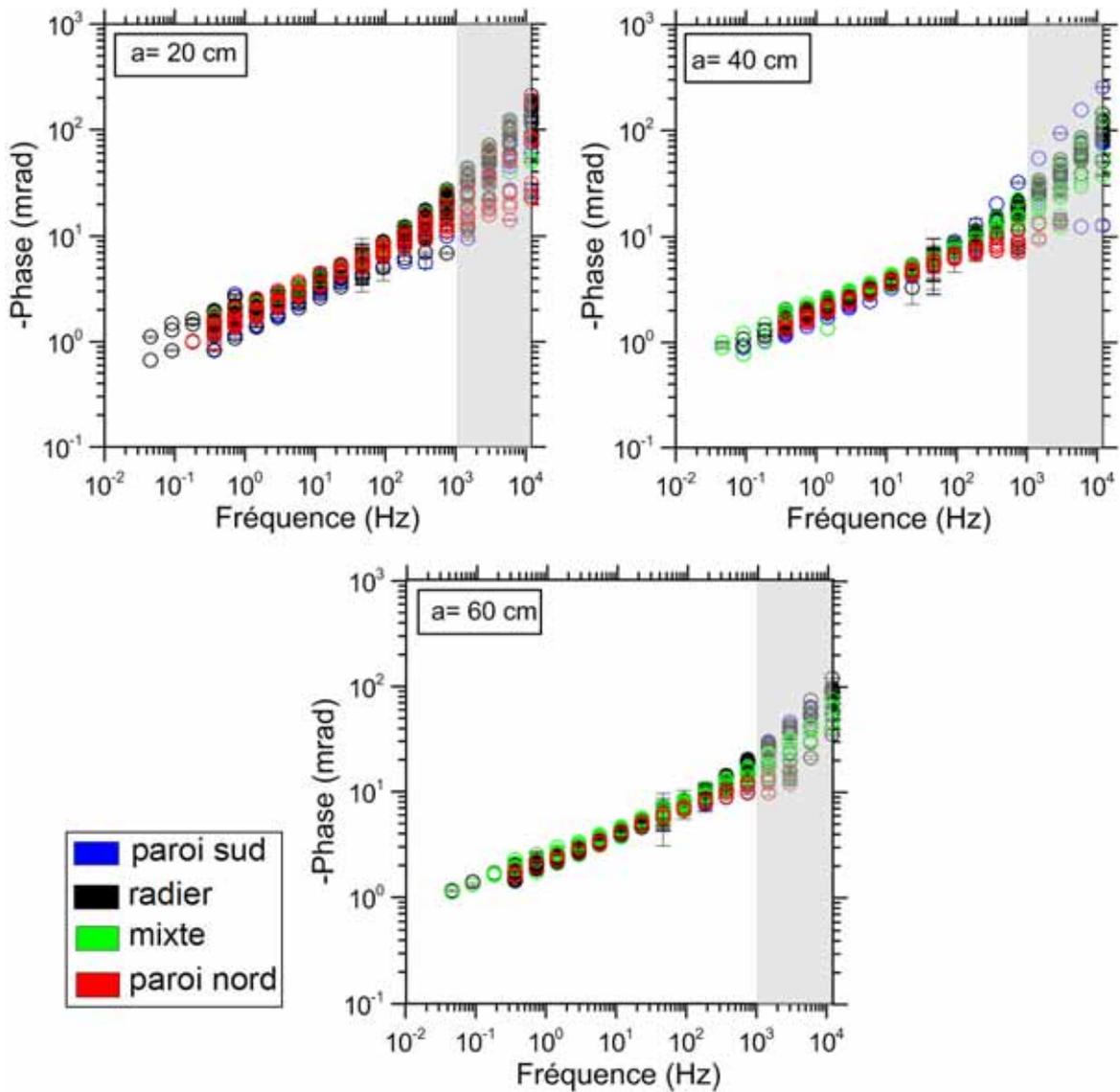


Figure II.62. Spectre de phase (mrad) pour trois différents écartements inter-électrodes a : 20 cm, 40 cm, 60 cm le long de tout le profil en arc de la galerie Est-96 avec le dispositif Wenner- α (juin 2008). Appareil de mesure : SIP FUCHS II. La zone en gris indique les fréquences susceptibles de présenter un effet instrumental parasite lié aux basses résistivités du milieu.

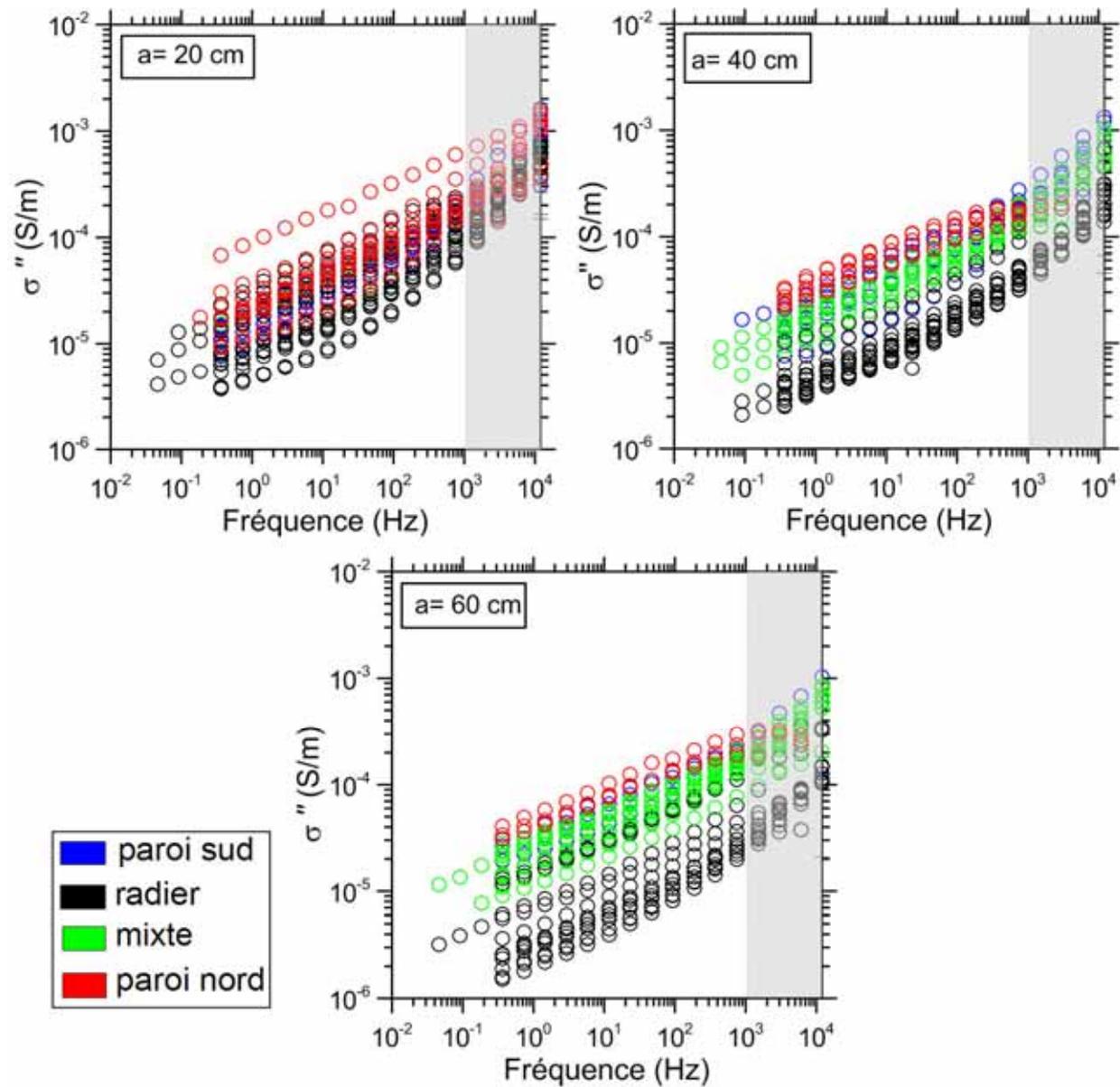


Figure II.63. Spectre de la conductivité imaginaire (S/m) pour trois différents écartements inter électrodes a : 20 cm, 40 cm, 60 cm le long de tout le profil en arc de la galerie Est-96 avec le dispositif Wenner- α (juin 2008). Appareil de mesure : SIP FUCHS II. La zone en gris indique les fréquences susceptibles de présenter un effet instrumental parasite lié aux basses résistivités du milieu.

La **Figure II.63** montre les spectres de la conductivité imaginaire du profil en arc. Conformément aux spectres de l'amplitude de résistivité complexe, le radier du profil en arc (résistivités élevées), présente de faibles valeurs de σ'' pour les trois écartements inter-électrodes. Les valeurs les plus élevées de σ'' ont été obtenues pour les parois verticales surtout sur la paroi Nord (résistivités plus faibles donc probablement une désaturation moins développée).

❖ **Pseudosections de résistivité complexe $|\rho^*|$, de la phase φ et de la conductivité imaginaire σ'' (PPS)**

Afin de mieux visualiser nos résultats acquis en PPS et ainsi mieux les discuter, les pseudosections des trois paramètres spectraux : la résistivité complexe, la phase conventionnelle (phase négative) et la conductivité imaginaire sont présentés sur les **Figures II.64-65** pour les différentes fréquences choisies. Les fichiers de pseudosections sont préparés de la manière suivante :

a- Nous rappelons qu'à chaque position du profil en arc, on dispose de mesures spectrales pour une gamme de fréquences de ~46 mHz ou 366 mHz à 12 kHz. Celle-ci est valable pour les trois différents écartements d'inter-électrodes ($a=20, 40, 60$ cm). Pour une fréquence choisie, toutes les données correspondant à différents écartements et positions spatiales sur l'ensemble du profil ont été rassemblées.

b- Ensuite les résistivités apparentes sont corrigées par les coefficients géométriques (k) calculées à partir du logiciel de modélisation en éléments finis « Comsol Multiphysics ».

c- Enfin, afin de positionner chaque valeur apparente en espace et en profondeur, la convention optée pour la présentation des pseudosections de résistivité et de chargeabilité (issue de la méthode PPT) a été utilisée pour la construction des pseudosections (de la résistivité complexe, de la phase conventionnelle et de la conductivité imaginaire issues de la méthode PPS).

Les pseudosections indiquées sur les **Figures II.64-65** permettent de mieux visualiser toutes les conclusions évoquées lors de l'interprétation des spectres. Ici, on ne les répétera pas. Nous attirons seulement l'attention sur un résultat déjà obtenu par les sections inversées de phase sur le profil longitudinal au radier (**Figure II.53**) : aux moyennes fréquences (≥ 375 Hz), les anomalies de phase apparente sont conformes à celles de la résistivité apparente élevée sur le radier (qui indiquent l'existence de l'EDZ) (**Figure II.65**).

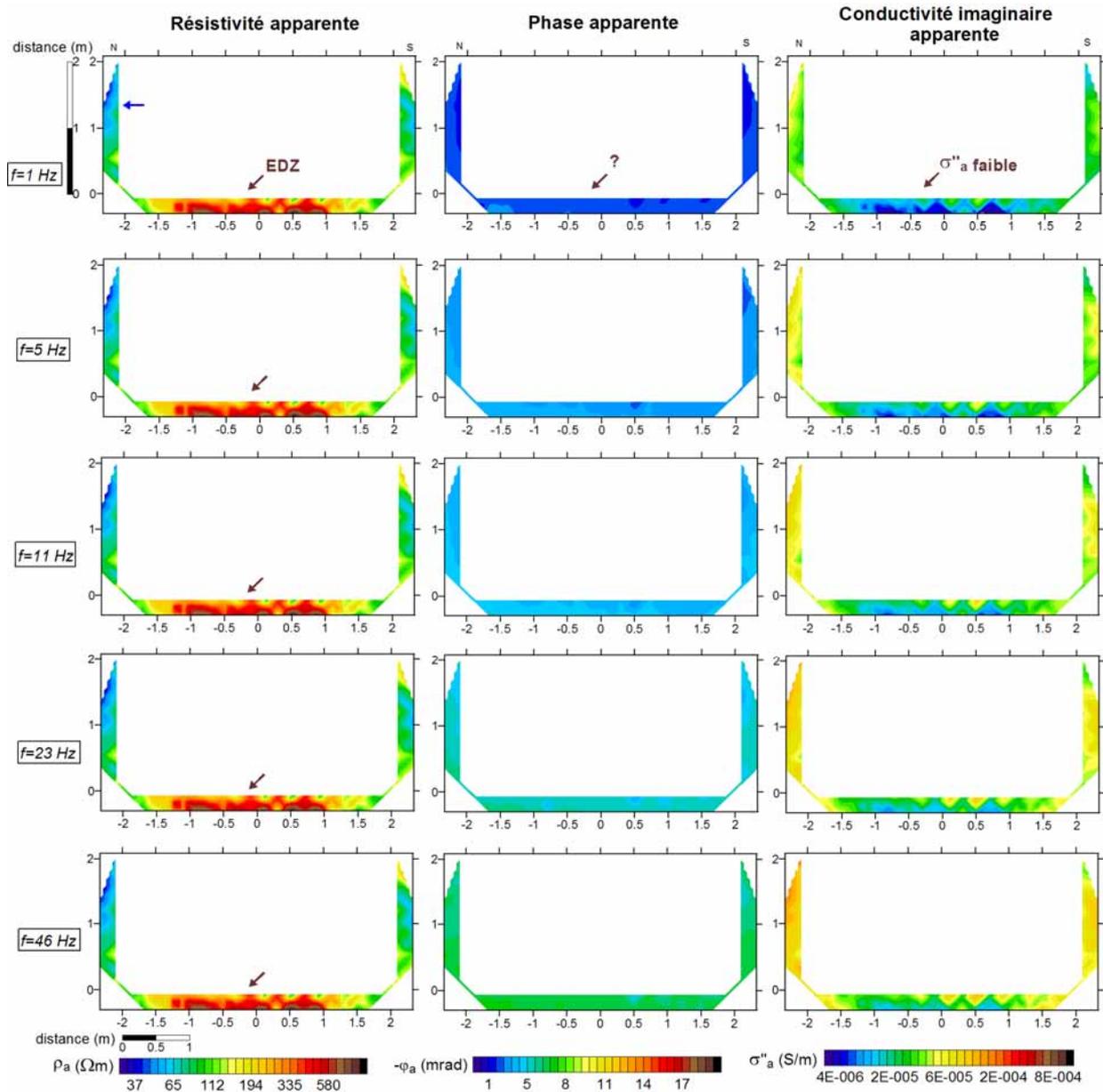


Figure II.64. Pseudosections de l'amplitude de résistivité complexe, de la phase et de la partie imaginaire de la conductivité sur le profil en arc de la galerie Est-96 suivant les fréquences 1 Hz, 5 Hz, 11 Hz, 23 Hz, 46 Hz (dispositif Wenner- α).

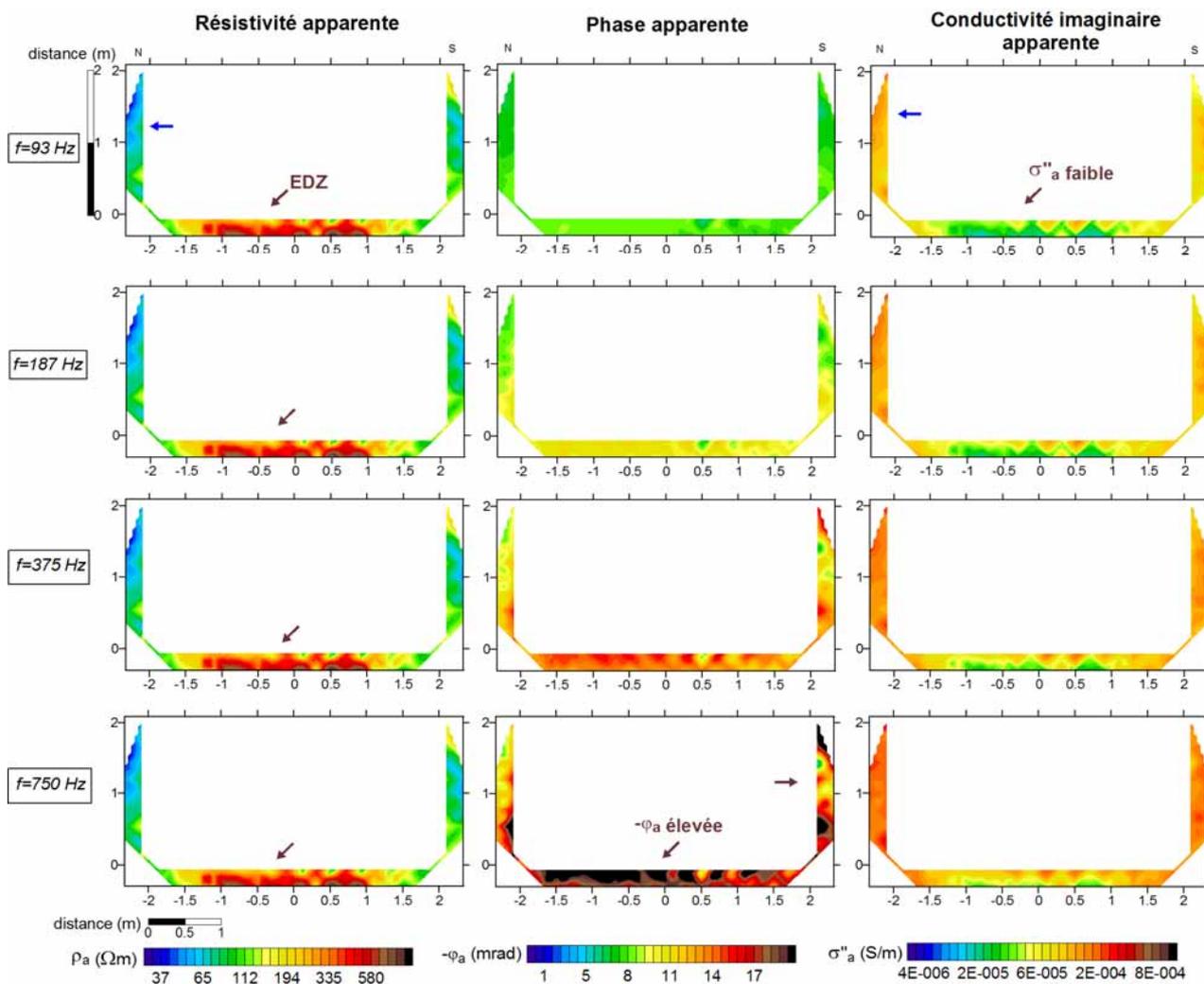


Figure II.65. Pseudosections de l'amplitude de résistivité complexe, de la phase et de la partie imaginaire de la conductivité apparente sur le profil en arc de la galerie Est-96 suivant les fréquences 93 Hz, 187 Hz, 375 Hz, 750 Hz (dispositif Wenner- α).

2.6.8. Synthèse et discussion des résultats du profil en arc

En comparaison avec les résultats obtenus sur le profil longitudinal au radier (**section 2.6.3**), les données acquises sur le profil en arc montrent des ressemblances mais aussi des caractéristiques propres que nous voudrions ici discuter.

Comme pour les sections obtenues du profil longitudinal, l'EDZ se traduit par une zone quasi-continue de résistivités élevées (typiquement supérieures à 100 $\Omega \cdot m$). Cette EDZ présente toutefois ici les particularités suivantes :

- Son extension dans l'espace (i.e. sa profondeur) et son amplitude sont plus importantes sur le radier que sur les parois verticales (parois Nord et Sud). Sur le radier, l'EDZ présente une extension autour de 0,6 m (avec des résistivités inversées > 300 $\Omega \cdot m$) alors que sur les parois, son extension se limite qu'à des valeurs comprises entre 0,2 et 0,4 m (avec des résistivités inversées > 100 $\Omega \cdot m$).
- Il existe une dissymétrie de son organisation spatiale entre les deux parois verticales (parois Nord et Sud). L'EDZ de la paroi Nord montre une extension plus développée que celle de la paroi Sud.
- L'EDZ se traduit clairement dans ce contexte par de plus faibles valeurs de chargeabilité et conductivité imaginaire. Autrement dit, l'EDZ se délimite par des zones de chargeabilités (voir **Figure II.59**) et de conductivités imaginaires (à 1 Hz sur les parois verticales voir **Figure II.64**) plus faibles que celles observées dans la roche saine.

La première caractéristique (i.e. différence de l'état d'endommagement entre les parois verticales et le radier) avait déjà été observée à partir de mesures de diagraphies ultrasoniques réalisées par [Contrucci et al. \(2007\)](#) dans cette zone à partir des forages rayonnants GEM. Les auteurs avaient observé des vitesses sismiques plus élevées aux parois (3663-3811 m/s) par rapport à celles obtenues sur le radier (2963 m/s) (on rappelle que les faibles vitesses sismiques correspondent à un endommagement plus important). Comment peut-on expliquer cette différence d'état d'endommagement ?

Nous pouvons avancer deux origines possibles (pas nécessairement indépendantes) : l'anisotropie des propriétés électriques de la roche et le rôle des fractures néoformées. L'anisotropie du comportement électrique de la roche qui a déjà été mis en évidence expérimentalement au laboratoire ([Cosenza et al., 2007](#)) peut expliquer en partie les différences d'amplitude mesurées mais plus difficilement les différences d'extension spatiale. Les fractures néoformées d'origine mécanique qui n'existent que sur le radier sont quant à

elles de bien meilleures candidats pour expliquer les différences d'organisation spatiale. Elles pourraient avoir deux effets. Le premier effet, bien connu, est d'augmenter globalement la résistivité moyenne de la roche puisque que ces fractures sont ouvertes (remplies d'air) et forment des barrières potentielles à la circulation du courant (e.g, [Samouëlian et al., 2003](#) ; [Lataste et al., 2003](#)). Le deuxième effet tiendrait à sa contribution dans le transport de l'air (à hygrométrie variable) dans des zones plus profondes de la roche : ces fractures pourraient être des vecteurs du transport de l'air en profondeur et induiraient une perturbation hydrique (désaturation) plus en profondeur. Autrement dit, le réseau de fractures néoformées présent sur le radier augmenterait l'accessibilité de l'air à des zones plus profondes. Ces deux effets associés à ces fractures expliqueraient ainsi l'existence des deux zones de fortes résistivités observées sur les sections du radier (entourées en marron sur la **Figure II.58**).

La deuxième caractéristique (i.e. dissymétrie de l'organisation spatiale de l'EDZ des deux parois verticales) est plus difficilement discutable. L'EDZ sur les parois verticales résulte principalement d'un processus d'endommagement hydrique se manifestant par des « fissures de désaturation » parallèles à la stratification (pas de fracture néoformée). Sans qu'il soit possible à ce stade d'avancer très loin dans la discussion, il semble que le processus d'endommagement et/ou perturbation hydrique possède des cinétiques différentes suivant les parois (flux d'air dissymétrique dans la galerie ? différences lithologiques et de propriétés physiques entre les roches des deux parois verticales ?).

La troisième caractéristique est probablement la plus originale, à notre connaissance : l'EDZ se caractériserait par des amplitudes des phénomènes de polarisation plus faibles que celles mesurées dans la roche saine. Autrement dit, les paramètres PP (chargeabilité dans le domaine temporel et conductivité imaginaire et phase dans le domaine fréquentiel) seraient de bons indicateurs de l'endommagement de la roche. Il convient d'abord de souligner que ce résultat a été mis en évidence sur le profil en arc car ce dernier n'était pas traversé par des fractures tectoniques avec remplissage de pyrite : ces dernières, par les anomalies provoquées, n'ont pas masqué cet effet. En outre, ce résultat s'appuie aussi bien sur les données *in situ* que sur des données de laboratoire : [Ghorbani et al. \(2009\)](#) avaient déjà observé une baisse de la conductivité imaginaire (et de la chargeabilité normalisée inversée) avec la dessiccation (et la micro-fissuration induite).

2.6.9. Synthèse et discussion des prospections géoélectriques réalisées dans la galerie Est-96

La synthèse de nos résultats permet de dégager les points qualitatifs suivants :

- Le radier présente une EDZ plus importante (en amplitude et en extension) que les parois. Comme indiqué précédemment, nous expliquons cette différence par l'endommagement d'origine mécanique (lié au creusement) induisant des fractures néoformées et par le rôle joué par ces fractures : le réseau dense de fractures néoformées présent sur le radier augmenterait l'accessibilité de l'air à des zones plus profondes, induisant ainsi une perturbation supplémentaire d'origine hydrique plus profonde et plus importante.
- L'amplitude d'endommagement de la paroi Nord semble être moins importante que celle de la paroi Sud néanmoins son extension semble être légèrement plus importante.
- L'EDZ au radier se caractérise par des résistivités et des phases élevées, des chargeabilités et des conductivités imaginaires plus faibles. La bonne sensibilité des paramètres PP (chargeabilité, conductivité imaginaire et phase) à l'endommagement est un résultat nouveau qui mériterait d'être vérifié dans d'autres galeries.

Les **Tableaux II.9** et **II.10** suivants représentent un récapitulatif des résultats obtenus à partir de diverses méthodes (ERT, PPT, PPS) sur l'extension de l'EDZ pour les deux profils choisis (longitudinal au radier et en arc). Une comparaison est aussi établie avec les résultats obtenus antérieurement avec d'autres méthodes de caractérisation. D'une manière générale, on note la bonne corrélation des résultats obtenus par ces méthodes de nature très différente. Plus particulièrement, on souligne la bonne concordance entre l'extension de l'EDZ (des parois verticales) définie par les chargeabilités et celle donnée par l'étude cartographique réalisée à partir de forages rayonnants autour de la même galerie.

Cette bonne corrélation entre des résultats d'origine diverse permet ainsi de valider indirectement nos résultats PP et donc met en exergue l'intérêt d'utiliser la méthode PP pour la caractérisation de l'EDZ de galeries excavées dans l'argilite.

Tableau II.9. Synthèse et comparaison de l'extension de l'EDZ sur le profil longitudinal au radier (perpendiculaire aux fracturations) dans la galerie Est-96 estimée à partir de nos expérimentations (en bleu) et de diverses méthodes de caractérisation.

Méthodes	Prof. d'inv.	Extension de l'EDZ au radier	Radier
ERT (résistivité) (2008)	1,7 m	0,50-0,80 m	400 Ω .m
PPT (chargeabilité) (2008)	1,7 m	~ 0,70-0,80 m	≤ 2 mV/V
PPS (résistivité) (2008)	0,75 m	0,75 m	300 Ω .m
PPS (phase) f=375 Hz, (2008)	0,75 m	0,75 m	16-35 mrad
Sismique réfraction haute résolution (1999)		0,31-0,65 m	2085-2575 m/s
Sismique réfraction haute résolution (2007)		0,80 m	2085-2575 m/s

Tableau II.10. Synthèse et comparaison de l'extension de l'EDZ sur le profil en arc (parallèle aux fractures sur la partie du radier) dans la galerie Est-96 estimée à partir de nos expérimentations (en bleu) (la profondeur d'investigation aux parois verticales est de 56 cm, au radier de 82 cm) et de diverses méthodes de caractérisation.

Méthodes	Paroi Nord	Radier	Paroi Sud	Paroi Nord	Paroi Sud	Radier	Paroi Sud
ERT (résistivité) (2008)	0,35 m	0,40-0,60 m (0,80 m)	0,30 m	≥ 100 Ω .m	≥ 100 Ω .m	140-300 Ω .m	≥ 100 Ω .m
PPT (chargeabilité) (2008)	0,35-0,40 m	~ 0,40 m	0,20-0,30 m	1,6-2,3 mV/V	1,4-2,6 mV/V	1,8-2,8 mV/V	1,4-2,6 mV/V
Sismique réfraction haute résolution (1999)	0,15-0,35 m	----	----	2085-2575 m/s	----	----	----
Sismique réfraction haute résolution (2007)	----	0,40 m	----	----	----	----	----
Cartographie de la fissuration d'origine hydrique (GEM 90, 180, 270) (2005)	0,40 m	0,40 m	0,40 m	----	----	----	----

2.7. Les campagnes expérimentales dans la galerie Nord-08

En juin 2009, la galerie Nord-08 fut choisie pour la deuxième campagne de mesures électriques. D'une part cette galerie offrait sensiblement les mêmes caractéristiques géologiques et géotechniques (mêmes dimensions et même mode d'excavation) que la galerie précédemment étudiée (i.e., la galerie Est-96), d'autre part le creusement en étant récent (mai 2008), nous pouvions ainsi étudier l'effet de l'âge de la galerie sur l'extension de l'EDZ. Autrement dit, en comparant les données PP acquises dans ces deux galeries, les nouvelles campagnes visaient à répondre à la question suivante : est-ce que l'endommagement est un processus dynamique, i.e. qui évolue avec le temps ?

Cinq profils électriques ont été choisis. En ce qui concerne les mesures PPT, deux profils furent longitudinaux au radier et un profil était en arc (N° 1-2-3 respectivement). Deux autres profils longitudinaux (N° 4-5) ont été dédiés aux mesures PPS (**Figure II.66**). Le premier profil PPT, effectué au radier (profil N° 1) était orienté Nord-Sud le long de l'axe de la galerie. La première électrode du profil au radier se situait à la cote 18,5 m. La position de cette électrode était approximativement située à 1,5 m du fond de la galerie. Ce profil traversait une fracture tectonique principale, des fractures néoformées ainsi qu'une zone à nodules calcaires. Les 48 électrodes sur le profil au radier étaient espacées de 20 cm, pour une longueur totale de 9,40 m. La dernière électrode (au Sud) se trouve à 2,20 m de la partie bétonnée, et était localisée à l'entrée de la galerie Nord. Soulignons que les sept premiers mètres de la galerie Nord sont bétonnés du côté Sud (**Figure II.66**). Le deuxième profil PPT au radier (profil N°2) comprenait également 48 électrodes espacées de 20 cm. Ce profil a été rajouté afin de corroborer les fortes anomalies de chargeabilité observées vers la fin du profil N°1. Une partie du profil N°2 se trouvait sur la partie bétonnée (9 électrodes). Finalement, le profil en arc N°3 se situe à la cote 15 m (par rapport à l'entrée de la galerie). Il comprenait 41 électrodes également espacées de 20 cm.

❖ Paramètres d'acquisition des campagnes de mesures de Polarisation Provoquée Temporelle et de résistivité électrique

Les mesures dans le domaine temporel ont été réalisées de la même manière qu'à la galerie Est-96. Les paramètres d'acquisition et les séquences préparées furent les mêmes que pour les missions dans la galerie Est-96.

❖ Paramètres d'acquisition des campagnes de mesures de Polarisation Provoquée Spectrale

Pour les mesures spectrales, c'est le prototype SECR-1 qui a été utilisé (développé à l'UMR Sisyphe), le SIP FUCHS II étant en réparation. Cet appareil ne dispose pas de multiplexeur comme le SIP FUCHS II. Par conséquent, les mesures de tomographies PPS ont été également réalisées à la main. Pour chaque point, deux mesures ont été acquises ; on a retenu celle présentant le meilleur rapport signal/bruit. La gamme de fréquence allait de 0,2 Hz à 7 kHz (comme précédemment, on a considéré dans l'interprétation que les mesures inférieures à 1 kHz).

Les mesures PPS ont été mises en œuvre avec le dispositif Wenner-Schlumberger avec les mêmes positions que pour les profils temporels. Les acquisitions ont utilisé des électrodes impolarisables Cu/CuSO₄. Deux zones d'études (deux profils) ont été choisies afin de procéder à des mesures spectrales localisées. Ces deux zones ont été sélectionnées sur la base des résultats de PPT indiquant différents degrés d'hétérogénéité propres à ces secteurs. Un de ces profils, le profil N° 4 (**Figure II.66**) débute au début du profil N°1 et présente une longueur de 4 m en total.

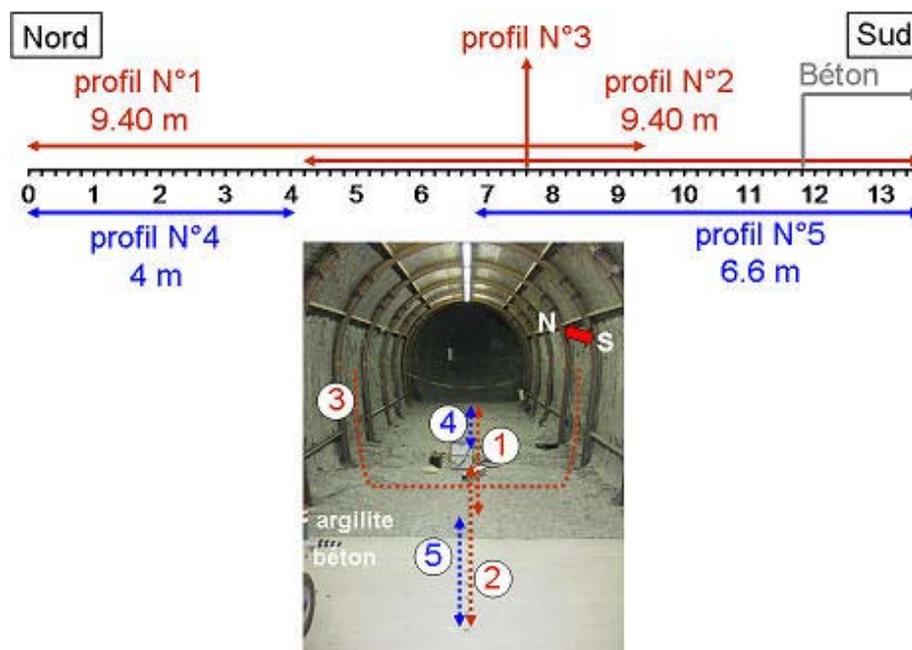


Figure II.66. Installations des profils électriques dans la galerie Nord-08 (en rouge : N° 1-2 profils longitudinaux au radier, N° 3 profil en arc relatif aux mesures de Polarisation Provoquée Temporelle et de résistivité électrique ; en bleu : N° 4-5 profils longitudinaux au radier relatifs aux mesures de Polarisation Provoquée Spectrale).

Le profil N°4 a été éloigné des zones à nodules calcaires qui affleurent vers l'entrée de la galerie au radier (coté Sud). L'autre profil (N° 5) débuta à partir de 7 m sur les profils longitudinaux PPT au radier et il faisait une longueur de 6,6 m. Ce profil PPS traversa une zone d'hétérogénéité plus importante (présence également de nodules calcaires). Sur les profils N° 4-5, trois niveaux d'acquisition ont été réalisés avec le dispositif Wenner-Schlumberger ($a=20$ cm ; $n=1, 2, 3$).

2.7.1. Résultats des prospections PPT et résistivité électrique sur les profils au radier

Concernant les sections de résistivité inversée :

La profondeur d'investigation sur les profils longitudinaux au radier est de l'ordre de 1,6 m (dispositif Wenner- α). Les résistivités inversées varient respectivement entre [7 et 2044 $\Omega \cdot m$] pour le profil N° 1 et entre [10 et 5700 $\Omega \cdot m$] pour le profil N°2 (**Figures II.67 et II.68**). Ce contraste de résistivité obtenue entre deux profils est lié à la couche de béton que le profil N°2 traverse. Les sections de résistivité inversée avec Res2DInv sur les profils au niveau du radier présentent une erreur maximum de 2,9 % concernant le profil N° 1 et de 9,9 % pour le profil N°2.

Profil N°1 (Figure II.67) :

L'identification de l'EDZ à partir des sections de résistivité inversée n'est pas aussi claire que dans le cas de la galerie Est-96. Nous observons en surface, localement, des résistivités inversées relativement élevées (de 80 à 300 $\Omega \cdot m$) par rapport aux parties plus profondes de la section inversée (36-60 $\Omega \cdot m$). Ces valeurs élevées en surface sont systématiquement liées à des hétérogénéités superficielles (fractures néoformées, **voir annexe A2**). En effet, les flèches sur la **Figure II.67** indiquent les positions de l'apparition des fissures néoformées (**voir aussi annexe A2**) qui sont systématiquement associées à ces anomalies résistantes très marquées. Ces anomalies de résistivité locales atteignent un maximum vers 50 cm de profondeur.

Par conséquent, contrairement à la galerie Est-96, l'EDZ ne se traduit pas ici par une couche quasi-continue de valeurs de résistivité élevée près de la surface mais plutôt par un niveau d'anomalies résistantes discontinues, clairement associées à la présence de fractures néoformées. Dans cette galerie récemment creusée (i.e. en 2008), l'endommagement ne serait pas complètement développé.

Profil N°2 (Figure II.68) :

Grâce aux sections de résistivité inversée, nous remarquons également l'impact des endommagements mécaniques locaux pour le profil N° 2 à la suite du profil N° 1. Ces anomalies ont les mêmes ordres de grandeurs que pour le profil N° 1 (80-300 Ω .m). Néanmoins, il apparaît que sur le profil N° 2, ces anomalies localisées sont plus étendues horizontalement et verticalement par rapport au profil N° 1. Ceci est lié soit à la densité de fissures présentes dans cette zone favorisant les perturbations mécaniques et hydriques ou à la présence d'autres hétérogénéités (**voir annexe A2**). L'extension maximum en profondeur de ces anomalies de résistivité élevées (en jaune sur la **Figure II.68**) est de l'ordre de 90 cm. Au Sud de la section, la couche de béton recouvrant une partie du profil N° 2 est caractérisée par des résistivités bien plus élevées, supérieures à [300 Ω .m].

Concernant les sections de chargeabilité inversée :

Les erreurs RMS calculées pour les sections de chargeabilité inversée sont au maximum de 0,1 % pour le profil N°1 et de 0,2 % concernant le profil N°2.

Profil N°1 (Figure II.67) :

Les chargeabilités inversées varient entre [1 et 15 mV/V]. Le début du profil (Nord) révèle des valeurs de chargeabilité faibles de l'ordre de [3,5 mV/V] (en bleu sur la **Figure II.67**). Cette zone correspond à des résistivités de l'ordre de [60 Ω .m] indicatrices d'un état endommagé et/ou désaturé relativement modéré. Cette zone peut correspondre à l'argilite ayant subi une légère désaturation à partir des fractures néoformées apparues récemment. Nous remarquons à peine la réponse d'une fracture tectonique remplie de calcite qui se trouve à peu près à 1,5 m sur le profil N°1 ($\geq 3,5$ mV/V en vert sur la **Figure II.67**).

La continuité de l'argilite saine légèrement désaturée le long du reste du profil paraît difficile à déterminer en raison de la présence des fortes anomalies de chargeabilité observées à partir de $x=4$ m sur le profil. Ces anomalies de chargeabilité sont supérieures à [6 mV/V] et atteignent [15 mV/V] vers la fin du profil. Les informations géologiques indiquent la présence d'une couche de nodules calcaires dans cette zone. Elles sont certainement responsables de ces anomalies de forte chargeabilité. La résolution en résistivité ne permet pas de distinguer cette couche d'hétérogénéités car elle présente des ordres de grandeurs comparables à l'argilite saine (environ 36 Ω .m).

Profil N°2 (Figure II.68) :

Sur le profil N°2, la roche présente des chargeabilités qui varient de [1 à 21 mV/V]. Les faibles valeurs de chargeabilités ($\sim 3,5$ mV/V) sont plus continues en surface pour ce profil. Rappelons que les anomalies de résistivités élevées en surface dans cette zone sont plus

étendues verticalement et horizontalement. Comme pour les mesures PP des profils en arc de la galerie Est-96, on peut interpréter ces caractères par l'impact de la désaturation qui serait plus significative pour cette section.

Au Sud, la couche de béton se caractérise par des ordres de grandeurs faibles. Des anomalies de chargeabilité forte sont bien présentes sur le profil N° 2 qui se trouve exactement au niveau des nodules calcaires. Selon les paramètres de chargeabilité obtenus, la couche de nodules calcaires commence à partir de *10 cm* (minimum en profondeur) depuis la surface à $x=9,8 m$. A partir de $x=10 m$, cette couche de nodules affleure au niveau du radier de la galerie. Elle présente un pendage léger vers le nord. Les connaissances géologiques du site confirment l'inclinaison de cette couche comme étant 5° .

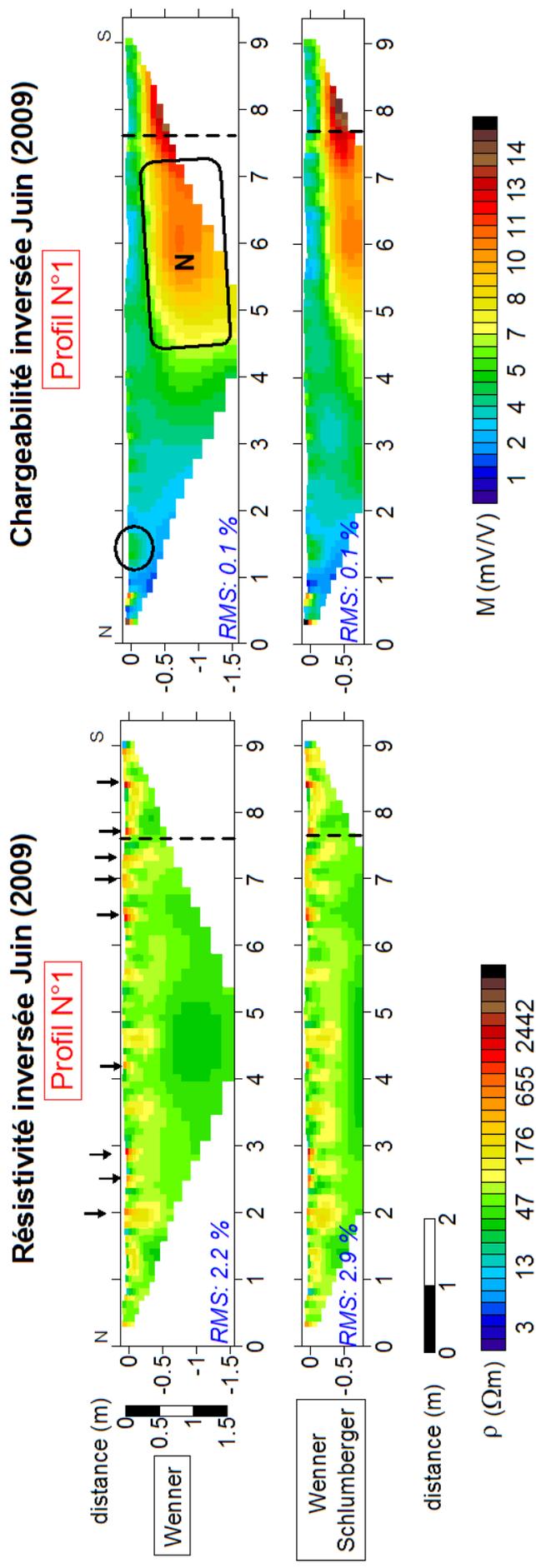


Figure II.67. Sections de résistivité et chargeabilité inversées sur le profil N°1 dans la galerie Nor d-08 en juin 2009 (ligne pointillée représente la position du profil en arc, N : Nodules calcaires, les flèches en noir indiquent les fractures néoformées au radier, le cercle en noir indique la position de la fracture tectonique, créneau d'injection : 1 s, nombre d'itération : 3).

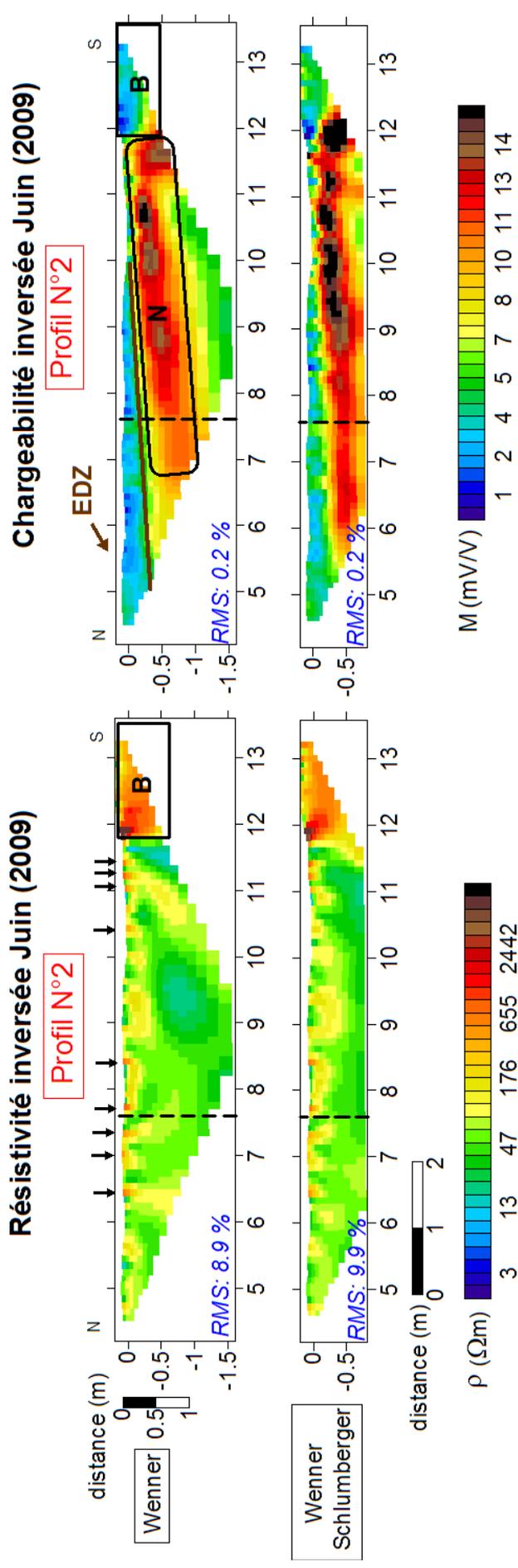


Figure II.68. Sections de résistivité et chargeabilité inversée sur le profil N°2 dans la galerie Nor d-08 en juin 2009 (la ligne pointillée représente la position du profil en arc, N : Nodules calcaire, B : Béton, les flèches en noir indiquent les fractures néoformées au radier ; créneau d'injection : 1 s (Wenner-Sch.), 2 s (Wenner- α) ; nombre d'itération : 4).

2.7.2. Résultats des prospections PPS sur les profils au radier

Les mesures PPS réalisées au radier de la galerie Nord-08 concernent les profils N° 4-5 (**Figure II.66**). Les **Figures II.69** et **II.70** représentent les sections de résistivités et de phase inversées à partir de Res2DInv pour les fréquences suivantes $f = 15 \text{ Hz}$, 60 Hz , 244 Hz , 488 Hz (dispositif Wenner-Schlumberger). L'échantillonnage entre les fréquences respecte la répartition des fréquences de l'appareil de mesure (SECR-1). Afin de valider et comparer les résultats PPS au radier de la galerie, les sections de résistivité et de chargeabilité obtenues dans le domaine temporel sont aussi associées aux **Figures II.69** et **II.70** (dispositif Wenner- α). L'inversion montrent des valeurs d'erreur RMS satisfaisantes, de l'ordre de 3,6 % au maximum concernant les sections de résistivité inversée et de 0,7 % au maximum concernant les sections de phase inversée avec le dispositif Wenner Schlumberger (4 itérations). L'inversion tient compte de la topographie. La profondeur d'investigation est de 25 cm.

Caractérisation des hétérogénéités texturales et hydriques des géomatériaux argileux par la méthode de Polarisation Provoquée : Application à l'EDZ de la station expérimentale de Tournemire.

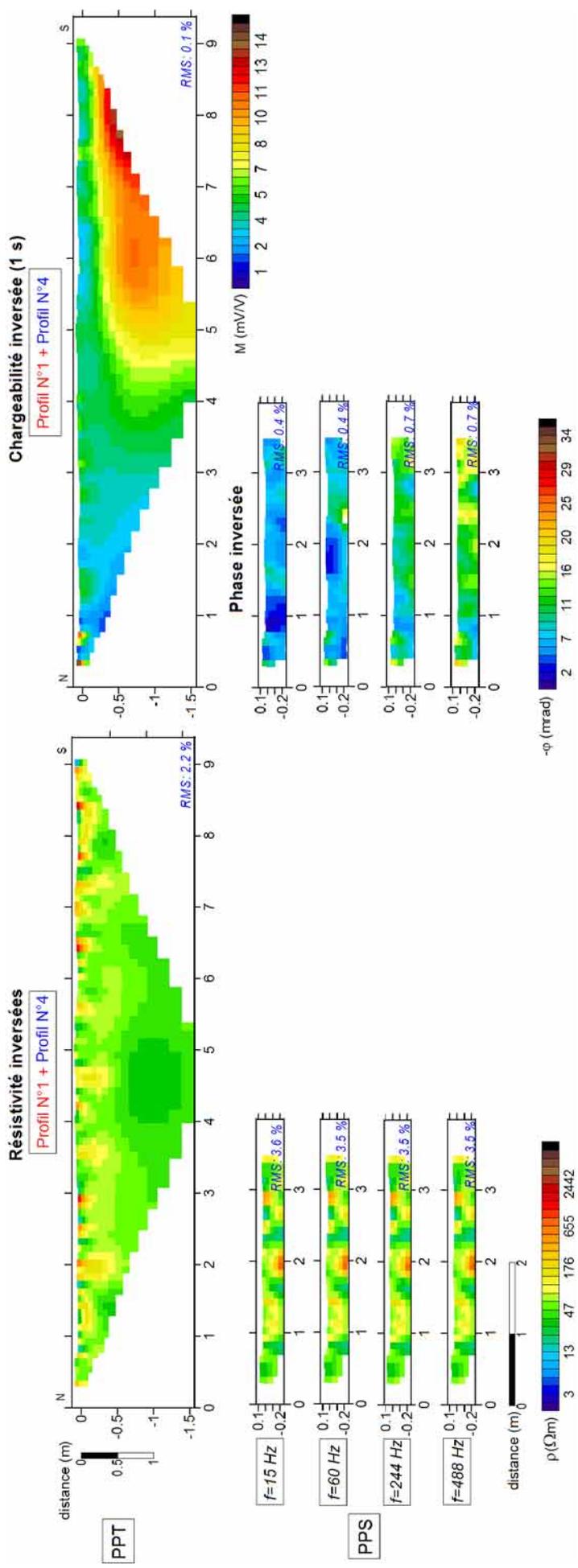


Figure II.69. Sections de résistivité et de chargeabilité inversées (en haut) sur le profil N°1 (temp orelle avec le Wenner- α) et sections de résistivité et de phase inversées (en bas) sur le profil N°4 (spectral avec le Wenner-Schlumberger) pour $f = 15$ Hz, 60 Hz, 244 Hz, 488 Hz.

Caractérisation des hétérogénéités texturales et hydriques des géomatériaux argileux par la méthode de Polarisation Provoquée : Application à l'EDZ de la station expérimentale de Tournemire.

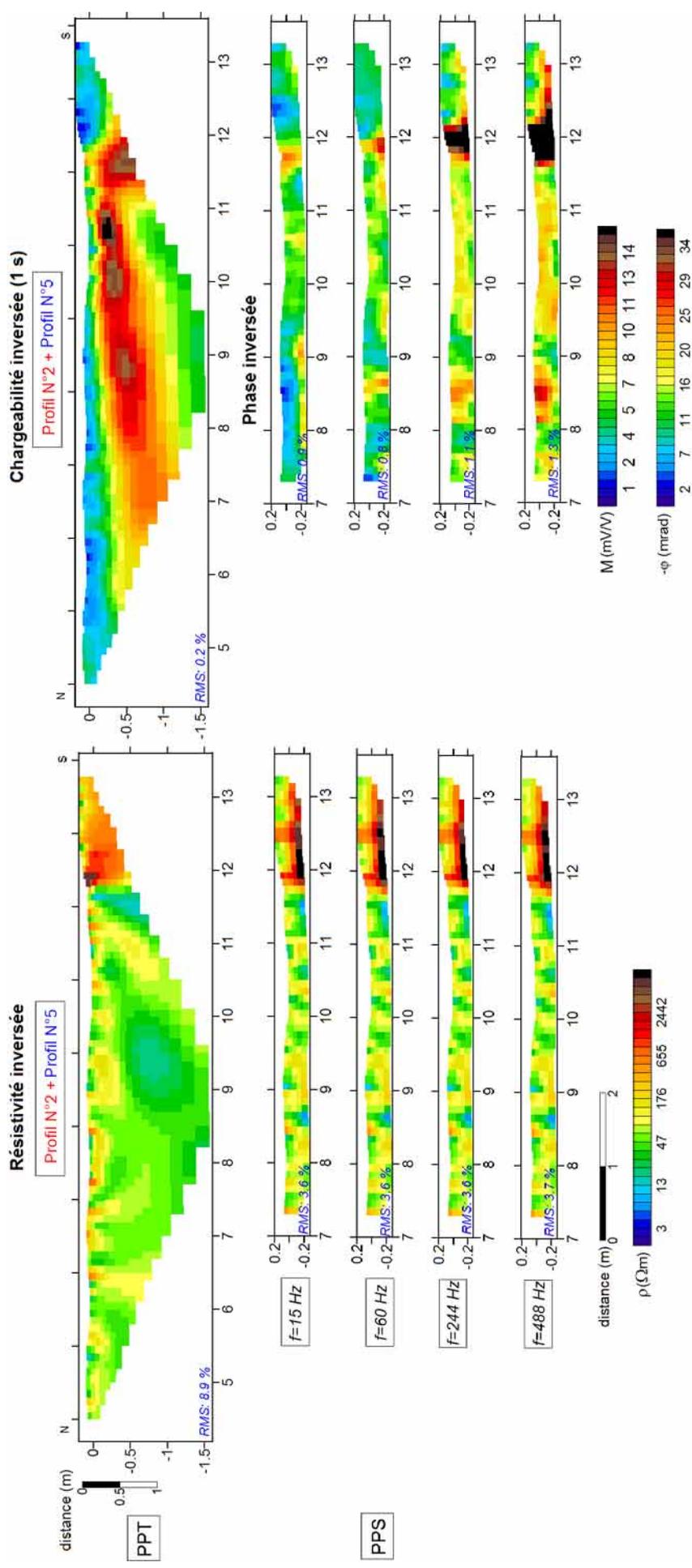


Figure II.70. Sections de résistivité et de chargeabilité inversées (en haut) sur le profil N°2 (temporelle avec le Wenner- α) et sections de résistivité et de phase inversées (en bas) sur le profil N°5 (spectral avec le Wenner-Schlumberger) pour $f = 15$ Hz, 60 Hz, 244 Hz, 488 Hz.

Concernant les sections de résistivité complexe inversée (Figures II.69 et II.70) :

- Globalement, les résultats obtenus par les mesures PPS sont cohérents avec celles obtenues par les mesures PPT.
- On remarque la présence des hétérogénéités localisées (endommagement modéré ?) pour toute la gamme de fréquence d'étude.
- La couche de béton apparaît avec des résistivités élevées à la fin du profil.

Concernant les sections de phases inversée (Figures II.69 et II.70) :

- Plus la fréquence augmente plus les valeurs de phase augmentent et semblent s'approcher des hétérogénéités identifiées par les sections de résistivité inversée. Néanmoins, la profondeur d'investigation étant assez limitée (de l'ordre de 25 cm), il est plus difficile d'établir des interprétations à grande échelle.

2.7.3. Résultats des prospections PPT et Résistivité électrique sur le profil en arc

❖ **Pseudosections de résistivité et de chargeabilité**

Les pseudosections de résistivité et de chargeabilité ont été réalisées avec le dispositif Wenner- α . Afin de présenter ces pseudosections conformément à la convention décrite précédemment, les résistivités apparentes ont été à nouveau corrigées via les coefficients géométriques (k) calculés avec le logiciel de modélisation aux éléments finis « Comsol Multiphysics » (**annexe A4**). Les résistivités apparentes (**Figure II.71**), montrent une variation de [14 à 290 $\Omega \cdot m$]. Comme pour les autres profils, la zone endommagée apparaît au radier du profil en arc avec des valeurs de résistivité plus élevées.

Les chargeabilités apparentes varient de [3,8 à 16,9 mV/V]. En surface, nous remarquons la présence des valeurs de chargeabilité apparente relativement plus faibles (4,7 mV/V en bleu **Figure II.71**) conformément aux sections de chargeabilité inversée pour les profils au niveau du radier. Néanmoins, cette fois-ci, ces valeurs augmentent clairement et progressivement avec la profondeur. La zone de forte chargeabilité observée en profondeur sur le profil en arc correspond probablement à la couche de nodules calcaires mise en évidence au niveau des profils longitudinaux au radier dans ce secteur (**Figures II.67-68**, ligne en pointillés). Sur cet aspect, le profil en arc (transversal) confirme donc les résultats des profils transversaux acquis sur le radier.

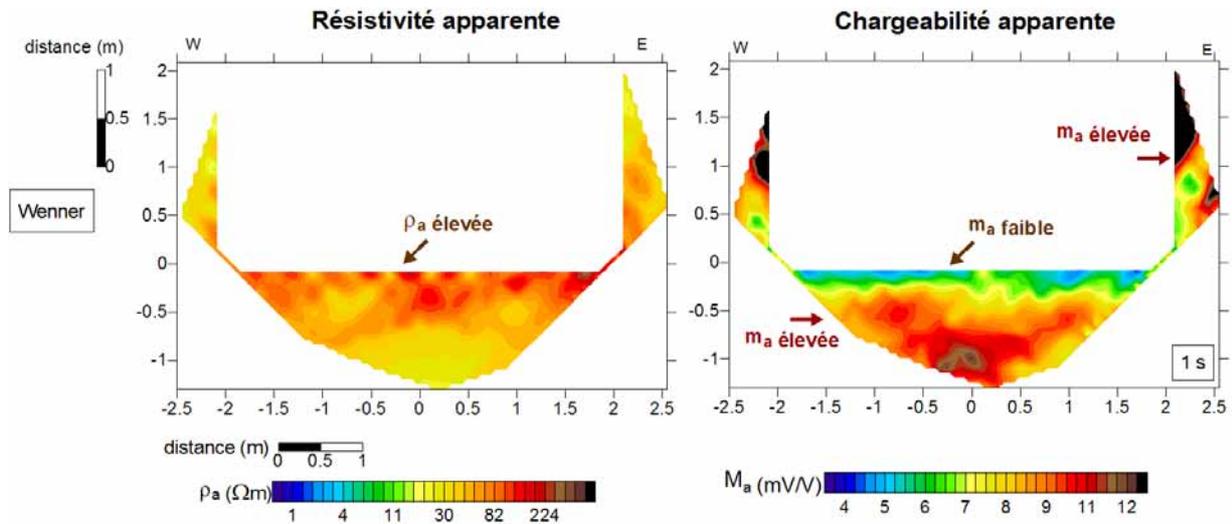


Figure II.71. Section de résistivité et chargeabilité apparente sur le profil en arc à la galerie Nord-08 en juin 2009 avec le dispositif Wenner- α (créneaux d'injection : 1 s). L'interpolation est faite sous Surfer 8.0 par l'interpolateur de type « triangulation with linear interpolation ».

❖ Inversion du profil en arc (Res2DInv)

L'inversion des résistivités et des chargeabilités acquises sur le profil en arc a été faite de la même manière que pour la galerie Est-96. Les données ont été sélectionnées en correspondance avec les différentes parties du profil (paroi Ouest, paroi Est, radier) et ont été inversées une par une selon le dispositif utilisé (**Tableau II.11**). Les **Figures II.72 et II.73** suivantes représentent les sections de résistivité et de chargeabilité inversée pour tous les dispositifs issus de l'acquisition de Juin 2009 pour les différentes parties du profil en arc. Lors de l'inversion, la topographie a été prise en compte. L'erreur RMS maximum obtenue en ce qui concerne les parois est de 3,4 % (dispositif Wenner- α +Wenner-Schlumberger), 4 itérations ayant été nécessaires. La profondeur d'investigation aux parois est au maximum de 55 cm.

Au radier, l'erreur RMS maximum atteint 19,1 % (dispositif Wenner- α +Wenner-Schlumberger), également pour 4 itérations. Nous présentons sur **la Figure II.72** les zones localement perturbées sur le radier et aux parois verticales. La profondeur d'investigation au radier est au maximum de 68 cm (dispositifs Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle).

Tableau II.11. Récapitulatif du nombre de données correspondant aux différentes parties du profil en arc à la galerie Nord-08 en fonction du dispositif utilisé.

dispositif	paroi Ouest	radier	paroi Est
Wenner- α +Wenner Sch.	32	118	27
Wenner- α	15	38	12
Wenner-Sch.	17	78	15
Dipôle-dipôle	20	55	19

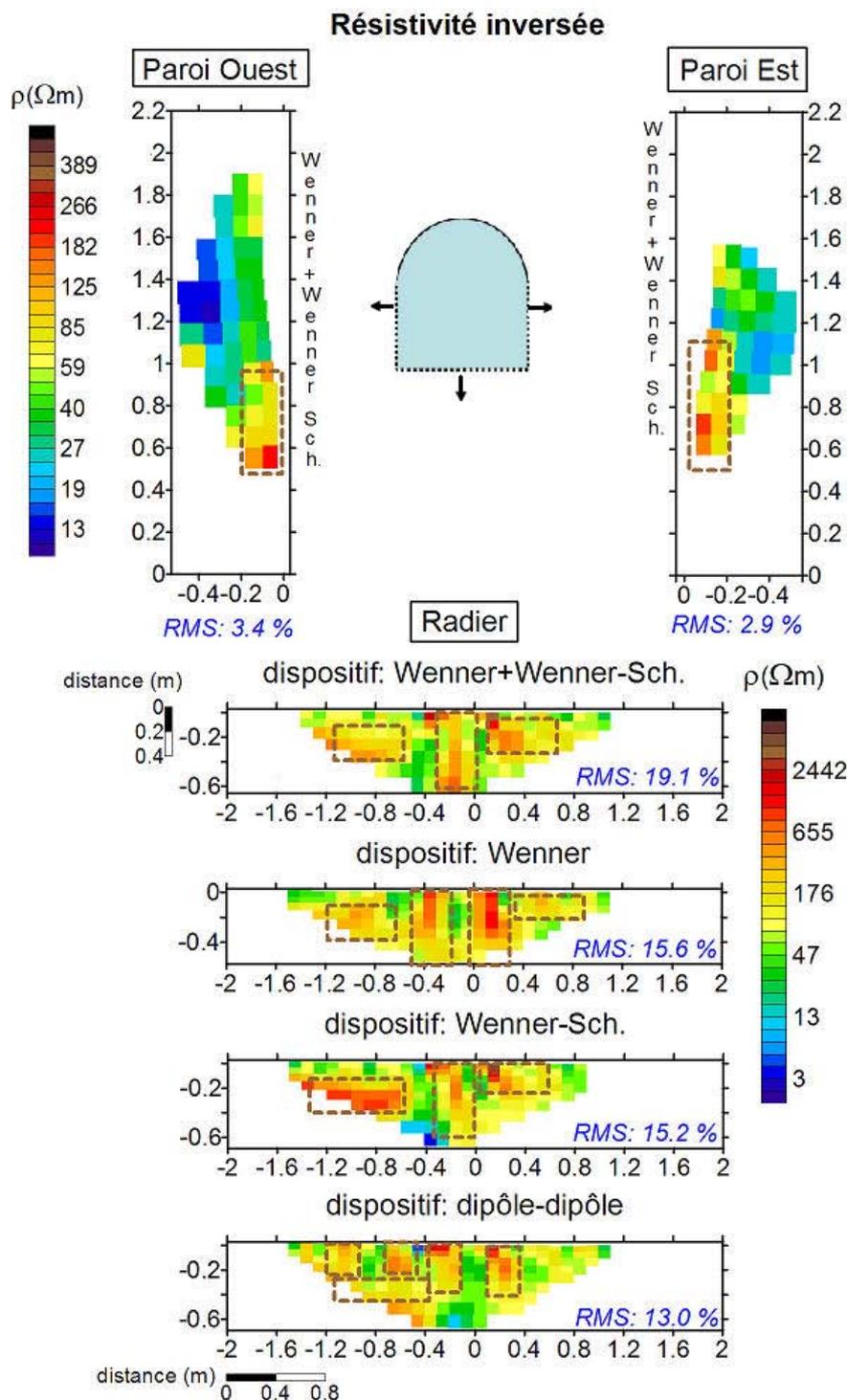


Figure II.72. Sections de résistivité inversée avec Res2DInv sur le profil en arc de la galerie Nord-08 avec les dispositifs Wenner- α +Wenner Schlumberger, Wenner- α , Wenner Schlumberger, dipôle-dipôle pour trois parties différentes du profil : paroi Est, paroi Ouest, radier (Juin 2009). Les lignes en marron indiquent des zones de résistivité élevée associées probablement à un endommagement relativement plus important. *Les parois verticales comprennent 11 électrodes et le radier comprend 17 électrodes sans la prise en compte des électrodes à l'intersection « radier-paroi verticale ».

Concernant les sections de résistivité inversée (Figure II.72) :

Paroi Ouest :

Les résistivités inversées varient entre [12 et 217 Ω .m] pour la paroi Ouest. Les valeurs les plus élevées (60-200 Ω .m) apparaissent pour les niveaux bas de la section (entouré par un rectangle en pointillé marron, **Figure II.72**). Cette zone correspond à un endommagement local fort probablement lié au niveau du banc de nodules calcaires partiellement visible dans ce secteur ou tout simplement à un effet de mélange associé à des nodules calcaires décimétriques (résistants électriquement). Pour le reste du profil sur la proche surface de paroi (en hauteur), les résistivités inversées sont de l'ordre de [30 Ω .m] (en vert, **Figure II.72**). Cette couche a une épaisseur de 15 cm. Sous cette couche, les résistivités sont encore plus faibles, inférieures à [16 Ω .m] (en bleu foncé, **Figure II.72**).

Paroi Est :

Les résistivités inversées varient entre [16 à 186 Ω .m]. Nous observons la même caractéristique que pour la paroi Ouest : un niveau de résistivité inversée élevée de [60 à 180 Ω .m] au niveau bas de la section et associé aux hétérogénéités présentes (nodules calcaires). Le reste du profil est caractérisé par des valeurs de résistivité plus faibles (20-40 Ω .m) mais pas aussi faibles qu'à la paroi Ouest.

Radier :

Au niveau du radier, les résistivités varient dans une gamme plus large (de 4 à 1600 Ω .m) par rapport aux parois verticales. Apparemment, ce caractère attribué à l'endommagement apparaît indépendant de l'âge de creusement d'une galerie. Il faut toutefois rester prudent car la couche de nodules calcaires est ici à quelques décimètres sous la surface du radier. La définition de l'EDZ est conforme aux résultats obtenus sur les profils longitudinaux au radier caractérisées par une organisation spatiale hétérogène des résistivités inversés (zones entourées par des rectangles sur la **Figure II.72**).

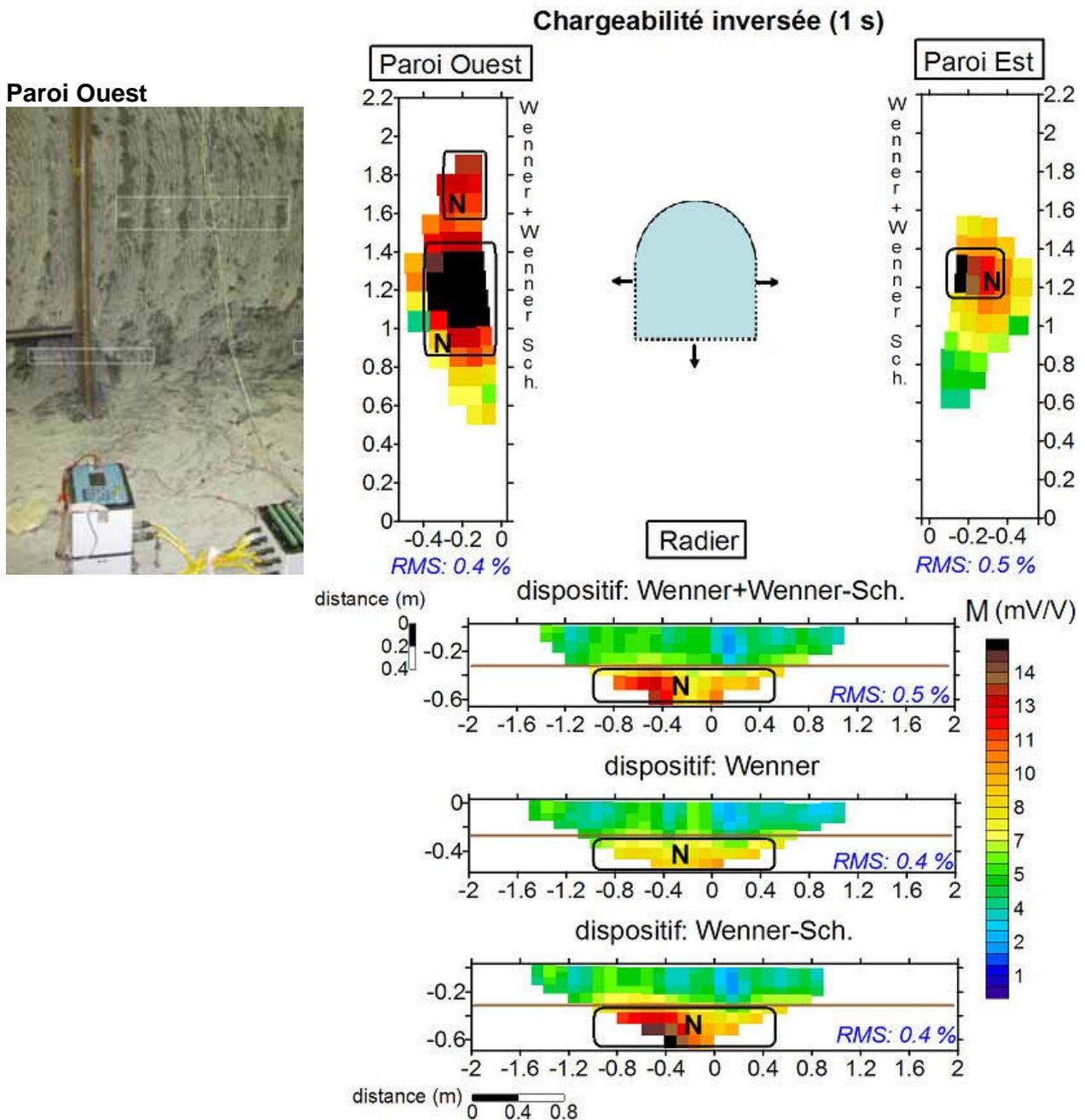


Figure II.73. Sections de chargeabilité inversée avec Res2DInv sur le profil en arc de la galerie Nord-08 avec les dispositifs Wenner- α +Wenner Schlumberger, Wenner- α , Wenner Schlumberger pour trois différents parties du profil : paroi Est, paroi Ouest, radier (juin 2009). Les lignes en marron indiquent le toit de la couche de nodule calcaire.

Concernant les sections de chargeabilité inversée (Figure II.73) :

Les chargeabilités inversées obtenues varient de [4,3 à 24,7 mV/V]. Les chargeabilités de même ordre de grandeur obtenues au niveau des profils longitudinaux au radier avaient montré l'existence d'hétérogénéités de type nodules calcaires. Dans cette partie de la paroi, les nodules calcaires sont visibles à l'affleurement (entourés sur les sections par des rectangles en noir sur la **Figure II.73**) et sont responsables des fortes anomalies observées.

Ces hétérogénéités sont encore une fois mieux distinguées sur les sections de chargeabilité que sur les sections de résistivité.

Paroi Est :

En paroi Est, les chargeabilités inversées sont aussi élevées que sur la paroi Ouest (5,1 mV/V - 21,9 mV/V) et elles sont encore une fois liées à la présence des nodules.

Radier :

La gamme des chargeabilités obtenues au radier du profil en arc à la galerie Nord varie entre [2 et 15 mV/V]. En surface, jusqu'à ~30 cm, on distingue une couche relativement moins chargeable (≤ 6 mV/V, en vert). Cette couche est partiellement discontinue par l'intrusion de chargeabilités plus faibles (3 mV/V, en bleu). Ces intrusions correspondent exactement aux fortes anomalies de résistivité obtenues au radier (**Figure II.73**). Comme pour les sections des parois verticales de la galerie Est-96, ces anomalies de faibles chargeabilités (correspondant aux mêmes positions spatiales de résistivités élevées) pourraient être interprétées comme des zones plus désaturées au radier de la galerie (**Figure II.74**).

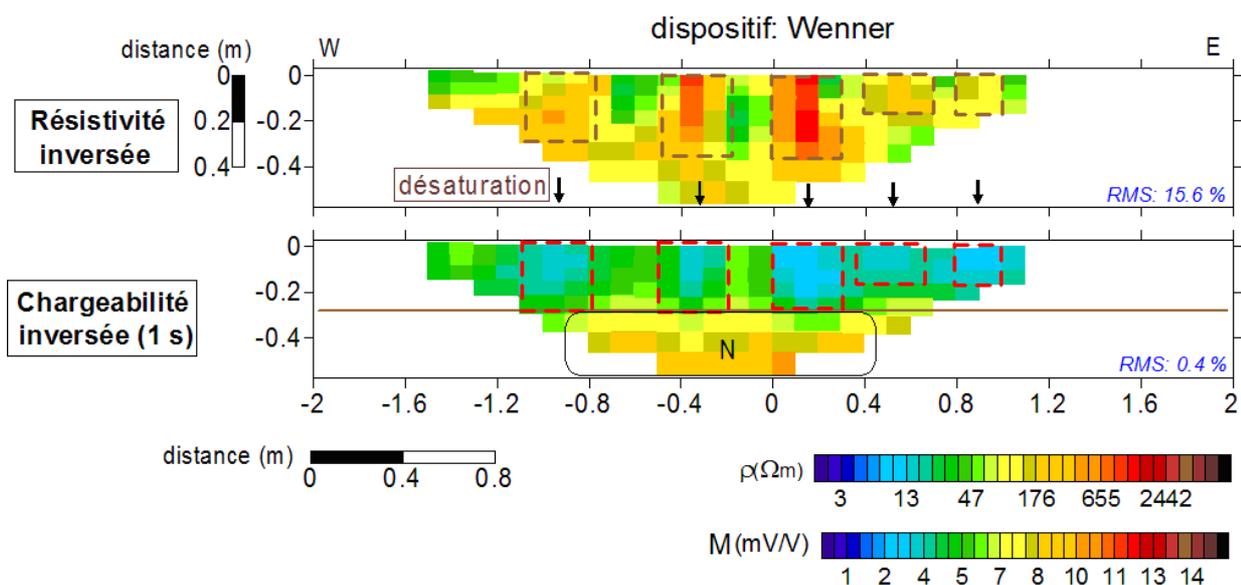


Figure II.74. Comparaison entre les sections de résistivité et chargeabilité inversées au niveau du radier du profil en arc dans la galerie Nord (1 s) (les flèches montrent la corrélation entre les deux paramètres physiques, N : niveau du nodule calcaire).

A partir de 30 cm, jusqu'à la profondeur d'investigation (68 cm), les chargeabilités obtenues apparaissent plus importantes. Cette zone correspond à la couche de nodules calcaires mise en évidence grâce aux sections de chargeabilité inversée obtenues sur les profils longitudinaux au radier. Les résultats sur le profil en arc confirment aussi la présence de nodules calcaires (**Figures II.67, II.68, II.73**).

2.7.4. Synthèse et discussion des résultats obtenus dans la galerie Nord-08

Les résultats acquis dans la galerie Nord-08 confirment ceux obtenus dans la galerie Est-96 sur les points suivants : (a) l'EDZ se caractérise encore par des niveaux de résistivités plus élevées (ici entre 80 et 300 $\Omega \cdot m$) que ceux observés dans la roche saine et (b) par des chargeabilités plus faibles (de quelques mV/V). Sur ce dernier point, nous confirmons ainsi les observations analogues obtenues dans la galerie Est-96.

Cette étude met toutefois en avant deux particularités qui n'ont pas été observées dans la galerie Est-96. La première particularité concerne l'organisation spatiale de l'EDZ. En effet contrairement à la galerie Est-96 où l'EDZ s'organise sur le radier sous forme d'une *couche quasi-continue* de résistivités élevées, l'EDZ dans la galerie Nord-08 se traduit sur le radier par un réseau d'anomalies (de fortes résistivités) *discontinues* (**Figures II.75**). Il semble que dans cette galerie récemment creusée (i.e., en 2008), l'endommagement ne soit encore totalement développé. Il est très probable qu'au fur et à mesure, une EDZ semblable à celle du radier de la galerie Est-96 va apparaître, lorsque les perturbations hydriques vont se développer avec le temps (grâce en partie aux fractures verticales néoformées).

De ce point de vue, cette étude menée dans une galerie récemment creusée aura montré l'efficacité de la méthode de résistivité électrique pour la détection des fractures néoformées au radier après le creusement : ces fractures ont été clairement associées à la présence des résistivités locales élevées en surface (**Figures II.67 et II.68**).

La deuxième particularité mise en évidence dans la galerie Nord-08 a trait à la mise en évidence de fortes anomalies de chargeabilités associées à la présence de nodules calcaires. Contrairement aux anomalies associées aux fractures tectoniques de la galerie Est-96, les anomalies de chargeabilités ici mises en jeu sont beaucoup plus massives et concernent une échelle d'espace bien supérieure (**Figure II.75**). Quelle est l'origine physique des anomalies de chargeabilité associées à ces nodules calcaires ?

Afin de comprendre l'origine de la réponse PP au niveau des nodules calcaires, nous avons effectué un prélèvement d'échantillon de la galerie Nord-08 à la surface du radier. Nous avons procédé à une analyse minéralogique par DRX à l'Université de Poitiers (réalisation technique C. Fontaine). Les résultats montrent que la composition minéralogique du nodule diffère selon que l'on se trouve au cœur ou dans l'auréole externe (partie qui se débite en pelures d'oignon) :

- **l'auréole** : semble être une pellicule d'altération où la dissolution de la calcite entraîne l'augmentation relative des teneurs en quartz et surtout en phases argileuses, notamment du mica et de la kaolinite. Les analyses DRX montre la présence de traces de chlorite et d'un interstratifié (peut être illite-smectite où l'illite est la composante largement majoritaire). Enfin, une réflexion à 7,61 Å peut être attribuée à la présence de gypse (phase issue de la déstabilisation de la pyrite et de l'oxydation des sulfures et sulfates)
- **au cœur** : la calcite (probablement légèrement magnésienne par rapport à celle de la cassure) est largement majoritaire en association avec le quartz. La pyrite, disséminée sous forme de très petits cristaux (description précédente), représente environ 5 % du matériau.

Cette analyse minéralogique met ainsi en évidence l'origine des anomalies de chargeabilité obtenues : elles sont probablement liées à la présence de minéralisation des sulfures (cristaux de pyrite disséminés à une teneur massique d'environ 5 %) localisées au cœur des nodules calcaires.

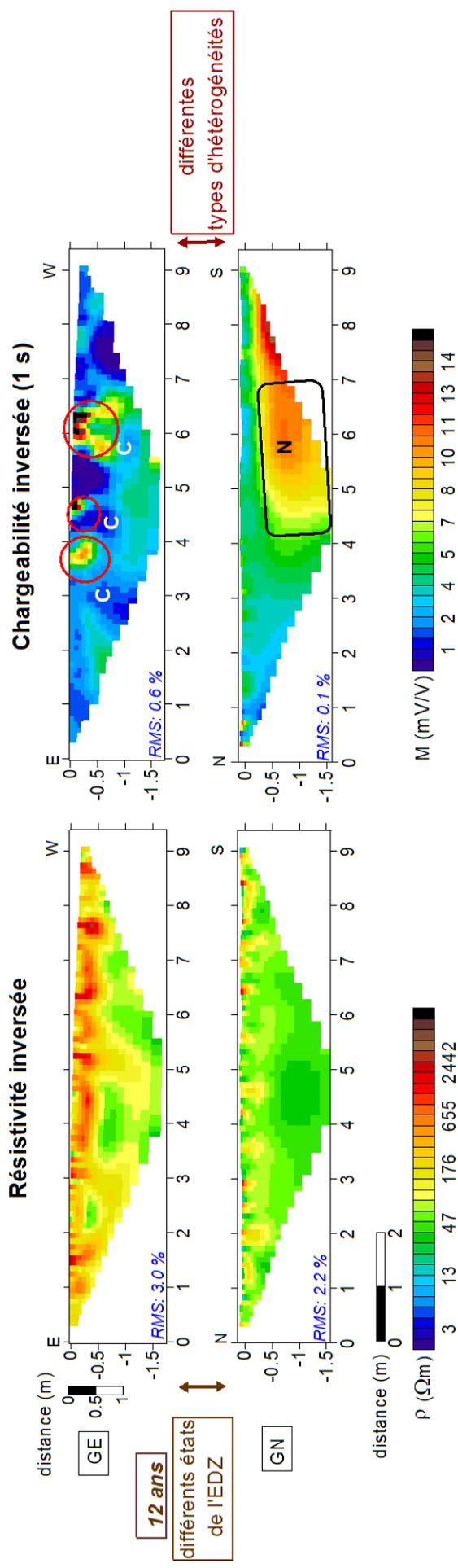


Figure II.75. A partir des profils au radier, comparaison des propriétés électriques « résistivités et chargeabilités » de deux galeries d'âge de creusement différent de 12 ans (GE : Galerie Est-96, GN : Galerie Nord-08, dispositif : Wenner- α , C : Fracture remplie de calcite, N : Nodule calcaire).

2.8. Les campagnes expérimentales dans la galerie Est-03

2.8.1. Introduction : stratégie d'acquisition et de la méthodologie

Un site de stockage géologique profond comporte plusieurs types de confinement. La formation argileuse constitue la principale des ces barrières naturelles. La couche de béton constitue une deuxième barrière qui va également servir de soutènement pour la stabilité mécanique de la galerie. Par conséquent, les recherches actuelles en matière de sûreté sont non seulement focalisées sur l'argilite mais aussi sur cette barrière artificielle et/ou sur l'interaction argile-béton *etc.*

Les prospections géophysiques évoquées jusqu'à présent concernent la caractérisation de l'argilite dans des galeries non bétonnées. Nous nous intéressons maintenant (toujours au moyen de méthodes électriques) au cas plus réaliste d'une galerie bétonnée, cas plus conforme aux structures en projet pour le stockage souterrain. Un des objectifs scientifiques qui se pose est de savoir si les méthodes électriques sont encore satisfaisantes pour la caractérisation de l'EDZ en présence d'une couche de béton. Une difficulté peut être associée à la probable résistance (électrique) de la couche de béton comparativement à l'argilite. Cette couche peut constituer en quelque sorte un « barrage » au courant électrique jusqu'à la formation argileuse. Il s'agit là d'un questionnement très important. Pour travailler sur un tel contexte, nous bénéficions d'innovations récentes en termes de méthodologies d'acquisition. Ainsi, la prospection réalisée dans une galerie bétonnée est une étude de caractérisation qui se double d'un travail méthodologique. Rappelons que la galerie Est-03 possède des parois verticales et un radier bétonné (sur les premières 10 m) (**Figure II.10**). Concernant le reste de la galerie (30 m), le bétonnage n'est présent que pour le radier. Cette galerie est bien adaptée pour une étude méthodologique.

❖ **Caractéristiques de la couche de béton**

La couche de béton à la galerie Est-03 n'est pas armée. Ce point favorable est très important pour la qualité des prospections électriques. Cette couche est constituée d'un « Béton Portland avec gravas calcaire » et possède *a priori* une épaisseur d'environ 30 cm.

❖ **Etude de faisabilité de la résistivité sur du béton (mesures électrostatiques)**

Afin d'avoir un ordre de grandeur *a priori* de la résistivité de cette couche, nous mettons en œuvre des mesures ponctuelles avec un dispositif électrostatique. Ce dispositif a été développé au laboratoire Sisyphe ([Souffaché et al., 2010](#)). L'intérêt majeur de cet appareil est de permettre la mesure de la résistivité apparente sur des surfaces dures, type pierre, béton, bitume où la qualité du contact galvanique est difficile à obtenir.

La méthode électrostatique consiste à générer un champ électrique alternatif à partir de deux pôles (soit posé sur le sol soit positionné à l'air en dehors du milieu investigué avec un maximum de 1 cm de hauteur) et à mesurer le voltage à partir deux autres pôles (Grard & Tabbagh, 1991 ; Tabbagh *et al.*, 1993). Cette méthode peut être considérée comme la généralisation de la méthode de résistivité électrique en courant continu (DC). La réponse d'un quadripôle électrostatique est théoriquement identique à celle d'un quadripôle électrique à contact galvanique. Nous utilisons ici un hexapôle composé de deux pôles d'injection A et B, de deux pôles de mesure du potentiel entre M_1 et N_1 (petit dispositif) et de deux pôles supplémentaire pour la mesure du potentiel entre M_2 et N_2 (grand dispositif). L'hexapôle et ses dimensions sont présentés sur les **Figure II.76**. Le résultat de cette étude a donné la résistivité de la couche de béton égale à $127 \Omega \cdot m$.

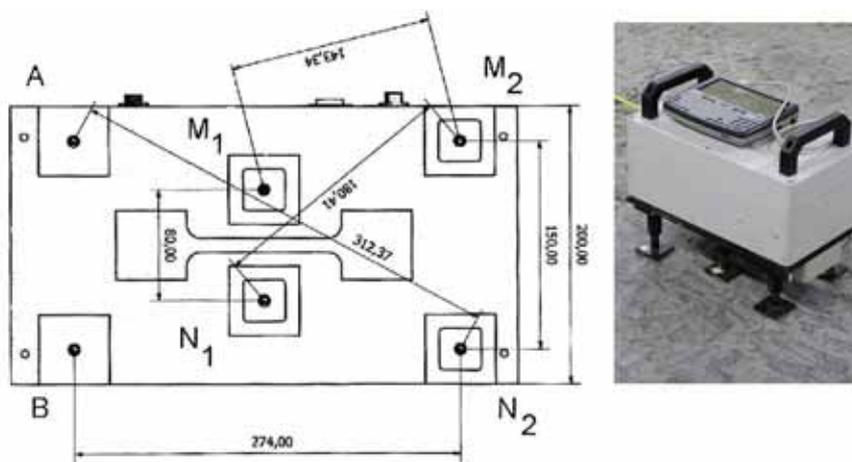


Figure II.76. Plan de l'hexapôle (vue du dessous ; unité en mm). Les éléments « carré » sur le plan constituent les pôles d'injection (A et B) et les pôles de mesure du potentiel électrique M_i et N_i ($i = 1, 2$) (photo prise sur un radier non-bétonné).

❖ Géométrie des profils

Dans cette partie, seul un profil longitudinal au radier a été considéré (9,40 m de longueur).

❖ Choix du type d'électrode et l'installation des électrodes

1) Dans un premier temps, les mesures ont été réalisées suivant la même méthodologie que les galeries non-bétonnées. Nous avons utilisé des microforages de 12 mm de diamètre et de 5 cm de profondeur dans la couche de béton. Ensuite, pour assurer le contact électrique entre les électrodes et l'argilite, nous y avons injecté un peu de bentonite humide. Après avoir vérifié que les réponses électriques des électrodes en acier (3×55 mm) et les électrodes impolarisables étaient comparables (**section 2.5.2c, Figure II.33**), nous avons opté pour les électrodes en acier, plus simples à mettre en œuvre (**Figure II.77**).

(2) Dans un deuxième temps, la profondeur des microforages a été prolongée jusqu'à l'interface argilite-béton. Cette profondeur a été contrôlée grâce à la différence de résistance mécanique de ces deux matériaux lors des microforages (**Figures II.77 et II.78**). Une fois que l'interface était atteinte, la profondeur, de l'ordre de 30 cm, fut systématiquement notée afin d'établir un profil topographique de l'interface argilite-béton. Pour cette deuxième phase de mesures, les électrodes impolarisables ont été privilégiées car elles étaient plus faciles à mettre en place pour une longueur désirée. Un autre avantage de ces électrodes, pour une profondeur d'électrode voisine de 30 cm, est lié à leur conception. Comme elles sont constituées d'un tube en plastique, le contact de cette enveloppe avec le béton, le long du microforage ne crée pas de point de contact électrique supplémentaire et la ponctualité des électrodes sera bien respectée en fond de trou. Ceci n'aurait pas été le cas pour des électrodes en acier. Afin d'assurer le contact électrique, le bout des électrodes a été enrobé par de la bentonite humide avant la mise en place. Les résistances de contact mesurées étaient à un niveau satisfaisant (i.e., inférieures à 10 k Ω).

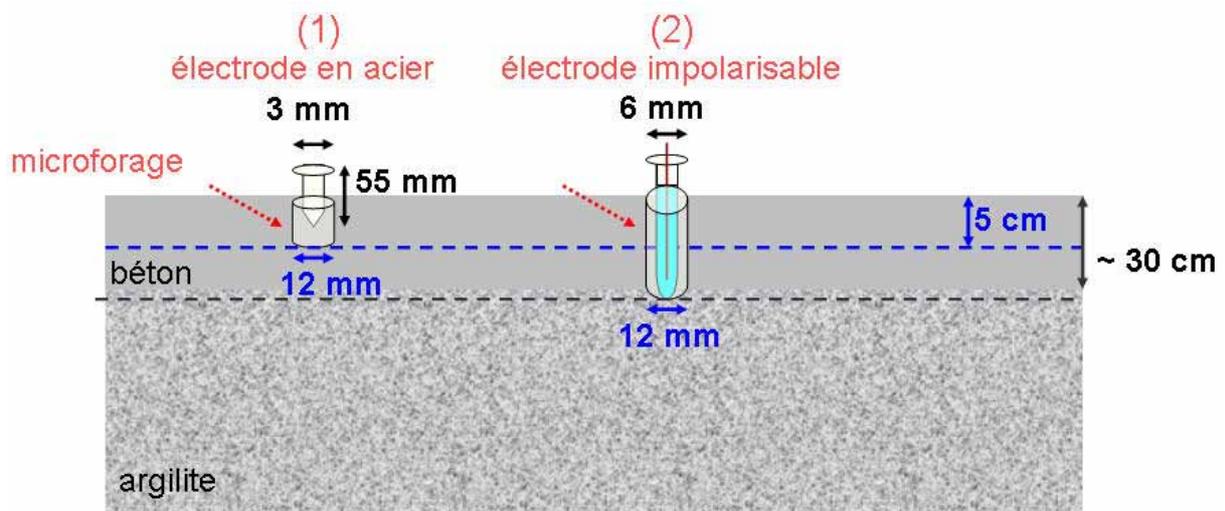


Figure II.77. Installation sur le profil au radier de la galerie Est-03 pour deux différentes études méthodologiques.

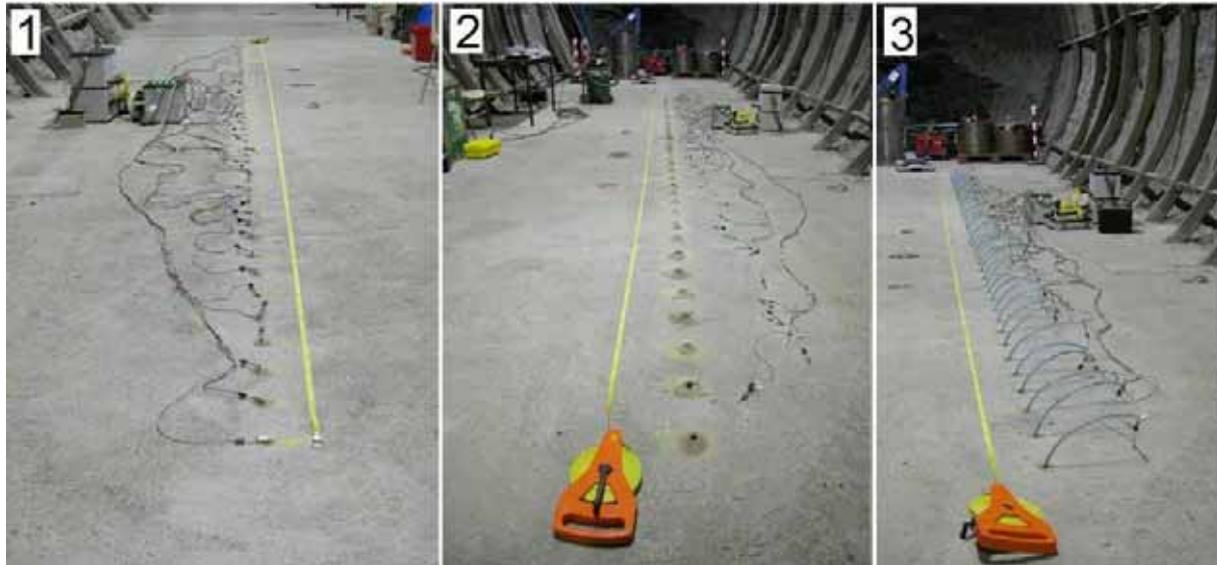


Figure II.78. Les trois étapes de l'installation du profil longitudinal au radier de la galerie Est-03 : (1) mise en place des électrodes à 5 cm de profondeur (depuis la surface du béton), (2) prolongation des microforages jusqu'à l'interface argile-béton, (3) mise en place des électrodes à ~30 cm de profondeur.

Le profil longitudinal au radier était orienté Est-Ouest. Ce profil était décalé de 1 m vers le Sud par rapport à l'axe de la galerie. Les électrodes étaient espacées de 20 cm sur le profil. Il est aussi important ici de souligner que la galerie, proche du fond, traverse une faille tectonique avec environ 1 m de largeur de brèche (**Figure II.6**). Une fracture dans le béton souligne la présence de cette faille (**cf. légende de la Figure II.80**). Cette fracturation est apparue peu après le bétonnage du radier. Les mesures ont été réalisées (août 2009) avec les dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle. Les mêmes séquences (que celles utilisées dans les autres galeries) ont été utilisées pour garder le même échantillonnage spatial des mesures.

❖ **Inversion de l'acquisition à partir des électrodes à ~30 cm de profondeur (RES2DInv)**

L'inversion des données acquises par des électrodes installées à 30 cm de profondeur, a été réalisée à partir du logiciel Res2DInv. Néanmoins, la conception du logiciel considère que les électrodes sont en surface. Par conséquent, l'utilisation des options de l'inversion classique qui tiennent compte d'électrodes en surface, n'est plus appropriée ici lorsque les données ont été acquises avec des électrodes à 30 cm de profondeur. Afin d'inverser ce jeu de données en respectant la profondeur des électrodes, l'option « underwater survey » de Res2DInv a été activée. Cette option, qui est normalement dédiée aux prospections électriques sous-marines, est une bonne solution puisque l'algorithme considère la profondeur et la topographie des électrodes. La **Figure II.79** illustre l'utilisation de l'option « underwater survey ». La première couche en bleu représente traditionnellement le tronçon

d'eau : ce fut dans notre cas la couche de béton. Au lieu d'introduire la valeur de la résistivité de l'eau, on a donné bien évidemment à cette couche la résistivité du béton.

La prise en compte de la résistivité de cette couche est importante et influence le processus de l'inversion puisque cette dernière fait partie du modèle de départ. C'est pour cette raison que lors de l'inversion, une étude de sensibilité a été effectuée en changeant la résistivité du béton pour les valeurs suivantes $\rho = 70 \Omega \cdot m$, $110 \Omega \cdot m$, $127 \Omega \cdot m$, $150 \Omega \cdot m$, $200 \Omega \cdot m$.

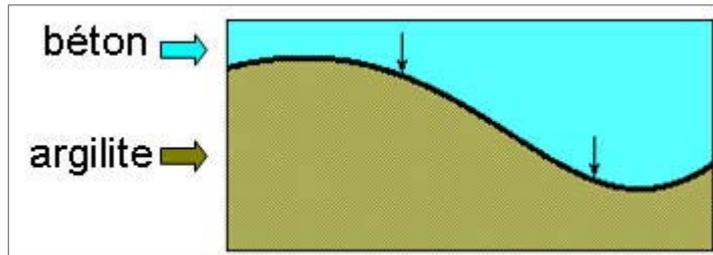


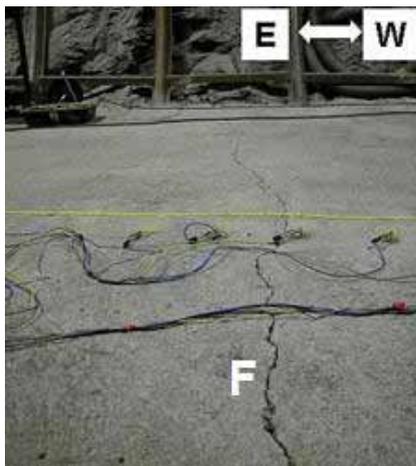
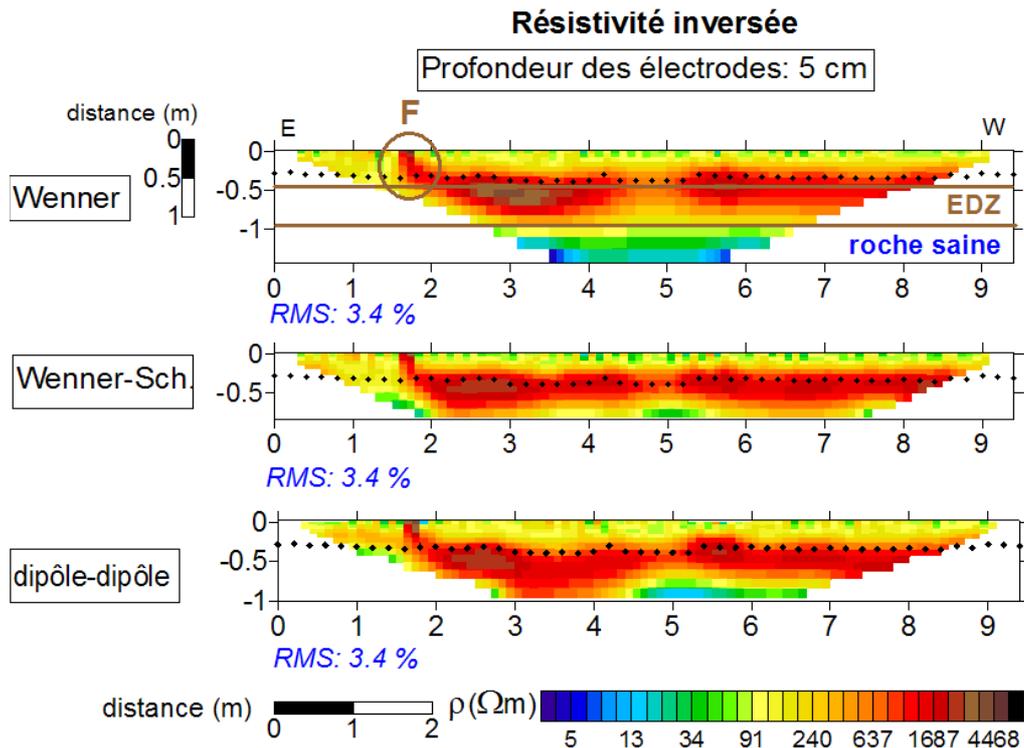
Figure II.79. Représentation de l'option « underwater survey » utilisé pour l'inversion des données acquises à partir de 30 cm profond (les flèches illustrent les électrodes) (Loke, 2001).

Finalement la valeur de $\rho = 150 \Omega \cdot m$, fut considérée comme la plus raisonnable au regard des erreurs RMS obtenues et la concordance entre section inversée et réalité. Lors de l'inversion, la topographie de l'interface argilite-béton a été aussi prise en compte grâce aux profondeurs mesurées lors des microforages.

2.8.2. Résultats des prospections PPT et résistivité électrique sur le profil au radier (électrodes à 5 cm de profondeur)

Concernant les sections de résistivité inversée (Figure II.80) :

La profondeur d'investigation est au maximum de $1,4 m$ sur le profil au radier pour la prospection effectuée directement à partir de la surface bétonnée (dispositif Wenner- α). Parmi tous les dispositifs utilisés, les résistivités inversées varient entre $[3 \text{ et } 4900 \Omega \cdot m]$. Les sections de résistivité ont été inversées avec Res2DInv (inversion classique) par la méthode des moindres carrées aux contraintes lissantes. L'erreur RMS calculée pour les sections inversées au niveau du profil au radier ne dépasse pas $3,4 \%$. Lors de l'inversion, la topographie a été prise en compte. L'échelle de couleur est adaptée au cas présent.



- **F** : position de la fracture observé sur le radier en béton liée à la faille tectonique (cf. photo). Cette fracture se trouve à 1,60 m sur le profil.
- La ligne pointillée en noir indique la profondeur des microforages réalisés pour l'installation des électrodes. Cette ligne indique donc la profondeur mesurée de l'interface béton-argilite.
- Les lignes en marron indiquent les limites supposées de l'EDZ.

Figure II.80. **Cas 1 « Electrodes en acier à 5 cm de profondeur »** : sections de résistivité inversée avec les dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle sur le profil longitudinal au radier dans la galerie Est-03 (acquisition en août 2009).

Electrodes à 5 cm de profondeur :

Ces résultats mettent en évidence au 1^{er} ordre, une organisation verticale des résistivités en trois couches. La 1^{ère} couche, la plus superficielle, (couleur jaune-verte) fait environ 30 cm d'épaisseur et correspond bien à la couche de béton. Nous remarquons la bonne corrélation de l'extension de cette couche définie par la méthode de résistivité électrique avec les profondeurs de l'interface béton-argilite mesurées indépendamment lors de la réalisation des microforages (points noirs sur la **Figure II.80**).

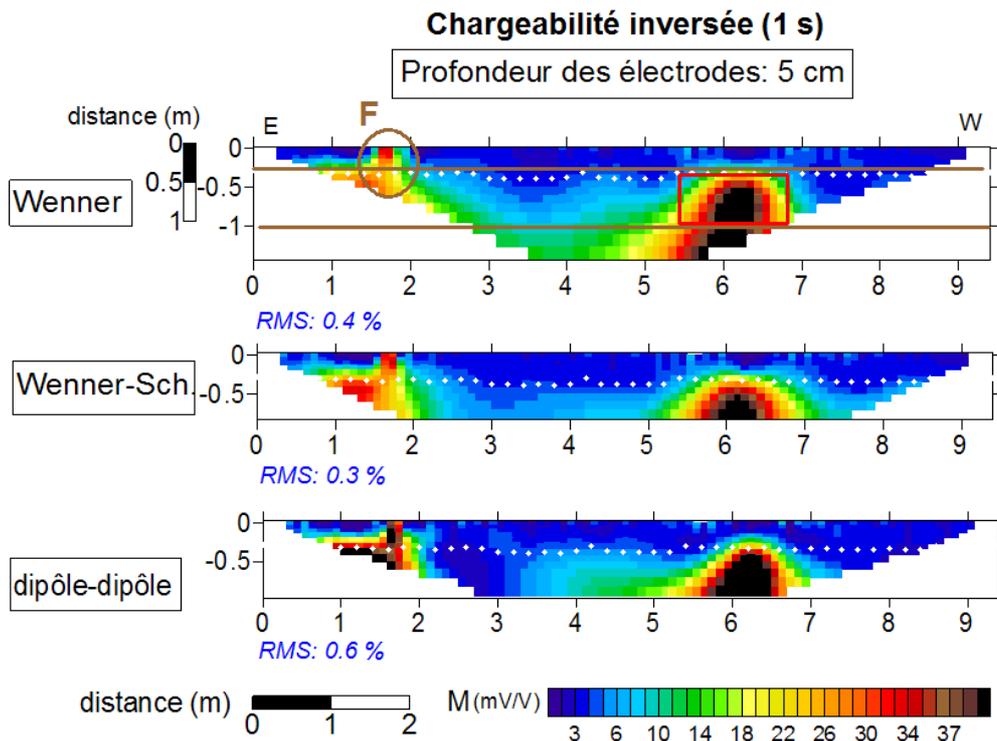
La 2^{ème} couche intermédiaire (couleur rouge) possède des résistivités élevées (supérieures à 500 Ω .m) et est à associer à l'argilite endommagée. Cette deuxième couche possède une épaisseur irrégulière. Elle commence à partir de 30 cm et peut s'étendre jusqu'à 90 cm de la surface.

La 3^{ème} couche, la plus profonde, (couleur verte-bleue, résistivités inférieures à 40 Ω .m) correspond à l'argilite saine. Cette couche semble apparaître au-delà de 1,1 m (dispositif Wenner- α). Avec le dispositif dipôle-dipôle (sensible à des changements horizontaux donc à des structures verticales), cette couche apparaît à partir de 70 cm entre $x=4,6$ et 5,4 m. Dans cette zone, l'EDZ est moins étendue.

Les sections inversées mettent en évidence un état d'endommagement plus souligné à l'Est du profil qu'à l'Ouest. L'extension de l'EDZ à l'Est est relativement plus étendue en profondeur par rapport à l'Ouest. En outre, une anomalie sub-verticale de fortes résistivités (plusieurs milliers d' Ω .m) est remarquée à 1,6 m sur le profil. Toutes ces observations sont expliquées par la faille tectonique secondaire présente sur ce secteur. L'impact de cette faille secondaire est observé au niveau du radier bétonné par l'apparition d'une fracture dans cette zone (**cf. Figure II.80**). L'origine de l'EDZ à la galerie Est-03 est principalement mécanique, résultant du creusement de la galerie. Toutefois, il est possible qu'avant le creusement, l'argilite dans cette zone ait pu être en partie déstabilisée par la faille tectonique. La **Figure II.81** montre les résultats des sections de chargeabilité inversée concernant la prospection par les électrodes à 5 cm de profondeur.

Concernant les sections de chargeabilité inversée (Figure II.81) :

Les sections de chargeabilité inversée pour le profil du radier présentent une erreur RMS très faible, de l'ordre de 0,6 %. Les chargeabilités inversées varient entre [0 et 60 mV/V]. L'échelle de couleur a été limitée à 40 mV/V afin de mettre en évidence les anomalies locales. Sur la **Figure II.81**, les limites de l'EDZ définies selon les sections de résistivités (**cf. Figure II.80**) sont intégrées afin d'établir une interprétation comparative.



- **F** : position de la fracture observée sur le radier en béton liée à la faille tectonique,
- La ligne pointillée en blanc indique la profondeur des microforages réalisés pour l'installation des électrodes. Cette ligne indique donc la profondeur mesurée de l'interface béton-argilite.
- Les lignes en marron indiquent les limites supposées de l'EDZ selon les sections de résistivités,
- Le rectangle en rouge entoure la plus importante anomalie observée.

Figure II.81. Cas 1 « Electrodes en acier à 5 cm de profondeur » : sections de chargeabilité inversée avec les dispositifs Wenner- α (1 s), Wenner-Schlumberger (1 s), dipôle-dipôle (1 s) sur le profil longitudinal au radier dans la galerie Est-03 (acquisition en août 2009).

Electrodes à 5 cm de profondeur :

Les chargeabilités inversées ne mettent pas en évidence d'organisation verticale en tri-couche comme c'est le cas pour les sections de résistivité (cf. **Figures II.80 et II.81**). La roche présente globalement des faibles valeurs de chargeabilités (≤ 4 mV/V, en bleu foncé). Ces faibles valeurs correspondent à la couche de béton (matériau non chargeable), et à l'EDZ définie par les sections de résistivité. Néanmoins concernant l'EDZ - les faibles valeurs de chargeabilité ont deux exceptions avec des valeurs fortes observées à $x=1,6$ m et à $x=6$ m sur la section. Ces anomalies sont supérieures à [24 mV/V].

A $x=1,6$ m l'origine de la forte anomalie de chargeabilité est associée à la présence de la faille tectonique secondaire (brèches). Rappelons que les résistivités inversées révèlent cet

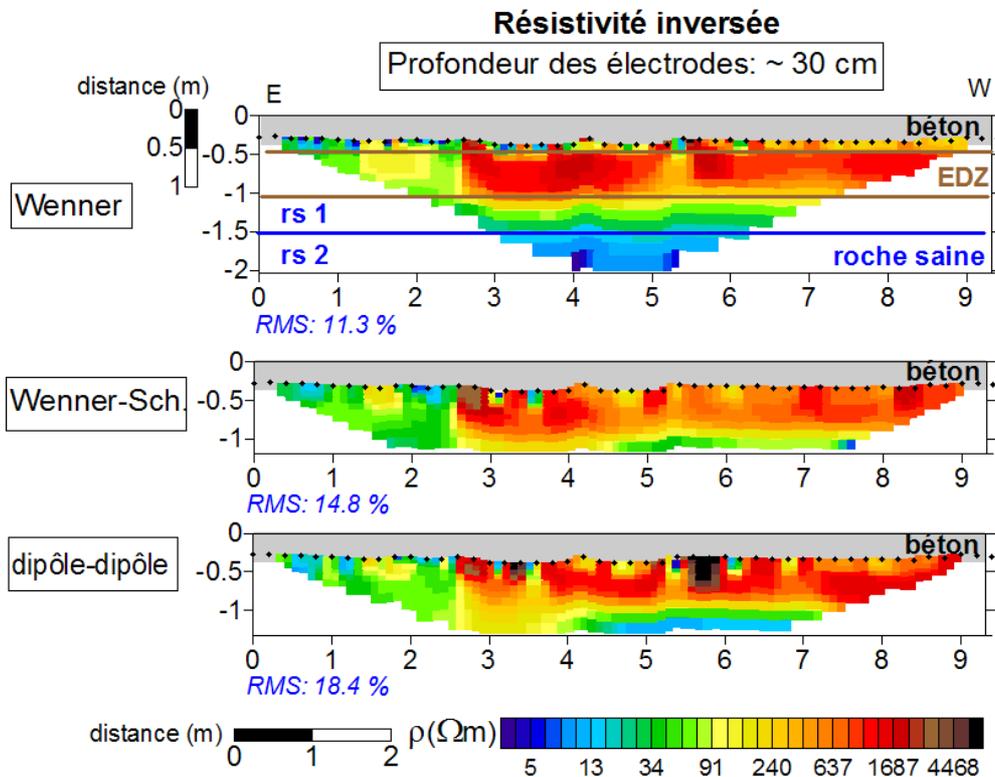
accident ou du moins la fracture qu'il a induit dans le béton. Néanmoins, l'anomalie à $x=6\text{ m}$, n'a pas à ce jour d'origine claire. Par rapport à notre expérience, des anomalies d'intensité aussi importantes ne peuvent pas correspondre à la réponse intrinsèque de l'argilite mais seraient liées à la présence d'hétérogénéités (ici peut être de type fracture tectonique car les couches noduleuses ne s'expriment pas verticalement vers la surface (même si des diagraphies ultrasoniques réalisées à partir des forages rayonnants GPM indiquent la présence de nodules calcaires à quelques mètres de profondeur, **Figure II.16**). Toutefois, cette anomalie de chargeabilité n'a pas d'équivalent en termes de chargeabilité, tandis alors qu'à $x=1,6\text{ m}$, les deux paramètres physiques (résistivité et chargeabilité) sont associées à la présence de la faille tectonique. La différence entre l'extension de ces deux anomalies est liée à la différence de sensibilité géométrique entre le Wenner- α et le dipôle-dipôle (ce dernier étant moins sensible horizontalement).

2.8.3. Résultats des prospections PPT et résistivité électrique sur le profil au radier (électrodes à 30 cm profondeur)

Concernant les sections de résistivité inversée (Figure II.82) :

La profondeur d'investigation est au plus de 2 m pour le profil au radier pour la prospection effectuée avec des électrodes installées à environ 30 cm depuis la surface bétonnée (dispositif Wenner- α). Pour cette étude, les résistivités inversées varient entre [1 et 7000 $\Omega \cdot \text{m}$]. Les résistivités apparentes ont été inversées avec le logiciel Res2DInv (cette fois-ci avec l'option « underwater survey ») par la méthode des moindres carrées aux contraintes lissantes. L'erreur RMS ici calculée pour les sections de résistivité inversée est plus élevée (18,4 %) par rapport à celle calculée pour les sections de résistivité correspondant aux électrodes à 5 cm de profondeur (3,4 %). Cette erreur qui paraît élevée par rapport aux précédentes sections peut être liée à plusieurs facteurs. Une cause peut être associée à l'hypothèse d'homogénéité de la couche de béton (résistivité supposée constante) alors que ce n'est peut-être pas le cas. Malheureusement, cette hypothèse est inhérente au mode sous-marin du logiciel. Une autre cause relève peut-être de l'incohérence entre les distances suggérées *a priori* et mises en œuvre réellement *in situ* en termes d'espacement et de profondeur des électrodes, ce qui peut induire des erreurs lors du calcul mathématique. Cette dernière cause semble peu probable pour l'étude menée à la galerie Est-03. Les distances ont été mesurées précisément à l'aide d'un laser et la profondeur de chaque microforage a été notée afin d'inclure une topographie précise dans le processus d'inversion.

Au niveau des résistances de contact, les valeurs ici sont plus satisfaisantes (6 k Ω) par rapport à l'acquisition antérieure faite à partir des électrodes à 5 cm de profondeur (un peu inférieure à 10 k Ω).



- Espace en gris : couche de béton.
- La ligne pointillée en noir indique la profondeur des microforages réalisés pour l'installation des électrodes.
- Les lignes en marron indiquent les limites supposées de l'EDZ.
- La ligne en bleu indique les limites de la roche saine à deux niveaux : rs1, rs2.

Figure II.82. Cas 2 « Électrodes impolarisables à ~ 30 cm de profondeur » : sections de résistivité inversée avec les dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle sur le profil longitudinal au radier de la galerie Est-03 (acquisition en août 2009) (inversion avec Res2DInv à l'aide de l'option « underwater survey ». La résistivité apparente du béton ρ_a est considérée égale à 150 Ω .m).

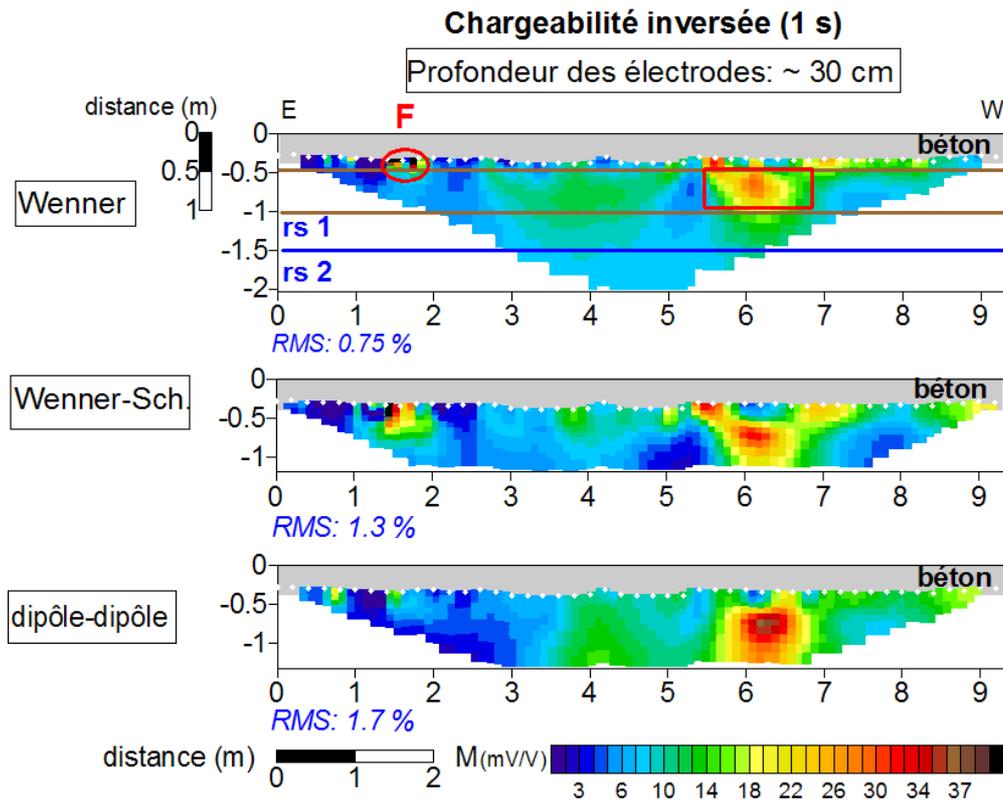
Electrodes à ~30 cm de profondeur :

La résistivité inversée pour le dispositif Wenner- α (profondeur d'investigation plus importante), montre une organisation verticale en deux couches. La 1^{ère} couche (faisant suite à la couche de béton) (couleur rouge) fait environ 80 cm d'épaisseur. Elle commence à l'interface béton-argilite (à environ 30 cm) et s'étend jusqu'à 1,1 m depuis la surface bétonnée. Ces résultats sont compatibles avec ceux de la campagne précédente (électrodes à 5 cm de profondeur). Cette couche, détectée par les deux méthodes d'acquisition est attribuée à l'EDZ de la galerie Est-03 et s'exprime par des résistivités supérieures à [500 Ω .m].

La 2^{ème} couche (couleur verte-bleue) est caractérisée par des résistivités faibles. Elle est associée à la roche saine. Nous notons une diminution de l'état d'endommagement en fonction de la profondeur. En effet, la couche interprétée comme la roche saine peut être scindée en deux parties (rs1, rs2, **Figure II.82**). La partie dite rs1 apparaît juste après l'EDZ c'est-à-dire à partir de 1,1 m et continue jusqu'à 1,5 m ($\leq 70 \Omega$.m). Cette zone peut être aussi considérée comme une zone de transition. La partie dite rs2 correspond parfaitement à l'argilite saine vu les très faibles valeurs de résistivité ($\leq 16 \Omega$.m). Le toit de cette couche est à 1,5 m depuis la surface (dispositif Wenner- α). La réponse liée à la faille tectonique apparaît légèrement à l'Est de la section (90 Ω .m, couleur jaune).

Concernant les sections de chargeabilité inversée (Figure II.83) :

L'erreur RMS calculé pour les chargeabilités inversées au niveau du radier (électrodes à environ 30 cm de profondeur) est limitée à 1,7 %. Pour tous les dispositifs utilisés, les chargeabilités inversées varient entre [0 et 40 mV/V] (voire 125 mV/V du fait des hétérogénéités superficielles au niveau de la faille tectonique). Les limites de l'EDZ définies selon les sections de résistivité inversée (**Figure II.82**) sont comme précédemment de nouveau associées sur la **Figure II.83**, afin de faciliter une interprétation comparative.



- **F** : fracture observée sur le radier en béton liée à la faille tectonique.
- Espace en gris : couche de béton.
- La ligne pointillée en blanc indique la profondeur des microforages réalisés pour l'installation des électrodes.
- Les lignes en marron indiquent les limites supposées de l'EDZ selon les sections de résistivités.
- Le rectangle en rouge entoure la l'anomalie la plus importante observée.
- La ligne en bleu indique les limites de la roche saine en deux niveaux : rs1, rs2.

Figure II.83. **Cas 2 « Electrodes impolarisables à 30 cm de profondeur »** : sections de chargeabilité inversée avec les dispositifs Wenner- α (1 s), Wenner-Schlumberger (1 s), dipôle-dipôle (1 s) sur le profil longitudinal au radier de la galerie Est-03 (acquisition en août 2009).

Électrodes à ~30 cm de profondeur :

Les sections de chargeabilité inversée ne mettent pas en évidence d'organisation verticale en deux-couches comme celles obtenues pour les sections de résistivité (**Figures II.82 - II.83**). Ce résultat était aussi vrai pour l'acquisition à partir des électrodes installées à 5 cm de profondeur (**Figures II.80 - II.81**). Les chargeabilités les plus élevées (125 mV/V) sont positionnées au niveau de la faille tectonique. On observe également l'anomalie caractérisée précédemment à $x=6$ m (16-36 mV/V). Les valeurs obtenues sont comparable aux précédentes (18-45 mV/V). Cette deuxième anomalie semble exister jusqu'à 1 m en profondeur à partir de la surface. Dans la zone saine, définie à partir des sections de résistivité

inversée (**Figure II.82**), les valeurs de chargeabilité sont de l'ordre de [7 mV/V] (couleur bleue claire).

2.8.4. Synthèse des prospections géoélectriques réalisées dans la galerie Est-03

La galerie Est-03 a été choisie afin de développer des méthodologies d'acquisition et d'étudier la résolution électrique à partir d'un radier bétonné. Cette étude est extrêmement novatrice puisqu'à notre connaissance, aucune prospection PP n'a été réalisée dans de telles conditions (i.e., caractérisation de l'EDZ depuis un parement en béton). Les résultats obtenus avec succès montrent que la méthode électrique en courant continu reste discriminante, et permet de distinguer sans ambiguïté le radier en béton, d'une épaisseur d'une trentaine de centimètres, la zone endommagée par l'excavation, d'extension variable *autour de 60 cm* et enfin la roche argileuse saine, au-delà de *1,1 m*.

2.9. Conclusion des prospections géoélectriques dans les galeries radiers bétonnés et non-bétonnés

Afin de faire une synthèse concernant les prospections à l'échelle de la galerie, les sections de résistivité et de chargeabilité obtenues pour chaque galerie (radier bétonné ou non) ont été rassemblés sur la **Figure II.84**. Ces sections sont issues des mesures dans le domaine temporel et des profils effectués au niveau du radier.

Pour les sections de résistivités inversées, on note une variété en termes d'organisation spatiale et d'état de l'EDZ selon la galerie étudiée. L'EDZ des galeries avec radier non bétonné se trouve à la proche surface de l'argilite et s'étale en profondeur en fonction de l'âge de l'excavation. L'extension est la plus importante pour la galerie la plus ancienne (galerie Est-96 avec une extension comprise entre 50-80 cm en profondeur) et la moins importante pour la galerie la plus récente (galerie Nord-08). Cette dernière présente plutôt des endommagements localisés en surface du radier, qui ne se sont pas encore propagés en profondeur. L'EDZ pour la galerie avec radier bétonné (galerie Est-03) possède des caractéristiques intermédiaires; elle a plutôt une organisation verticale au niveau des différentes couches, EDZ incluse. Son EDZ a une épaisseur peu variable latéralement et présente une extension de l'ordre de 60 cm en profondeur. L'amplitude de son endommagement pourrait avoir toutefois été plus importante que celle de la galerie Est-96 (valeurs de résistivités supérieures à 500 $\Omega \cdot m$ presque uniformément réparties). La présence de la couche de béton semble avoir limité la désaturation (liée à la ventilation des galeries),

cette dernière induisant des perturbations plus profondes en l'absence de béton (grâce à la présence notamment de fractures néoformées).

Les hétérogénéités présentes dans les différentes galeries prospectées peuvent contribuer à la variabilité de l'endommagement (faille, fracture etc.). A ce stade, les sections de chargeabilité offrent des perspectives satisfaisantes pour la caractérisation des hétérogénéités, en s'appuyant sur les connaissances géologiques *a priori*. Chaque galerie possède divers types d'hétérogénéités à différentes échelles, comme des fractures tectoniques (mm), des failles secondaires et des nodules calcaires. La prospection géoélectrique à l'échelle de ces hétérogénéités est présentée de manière détaillée dans le **section 2.10** suivante.

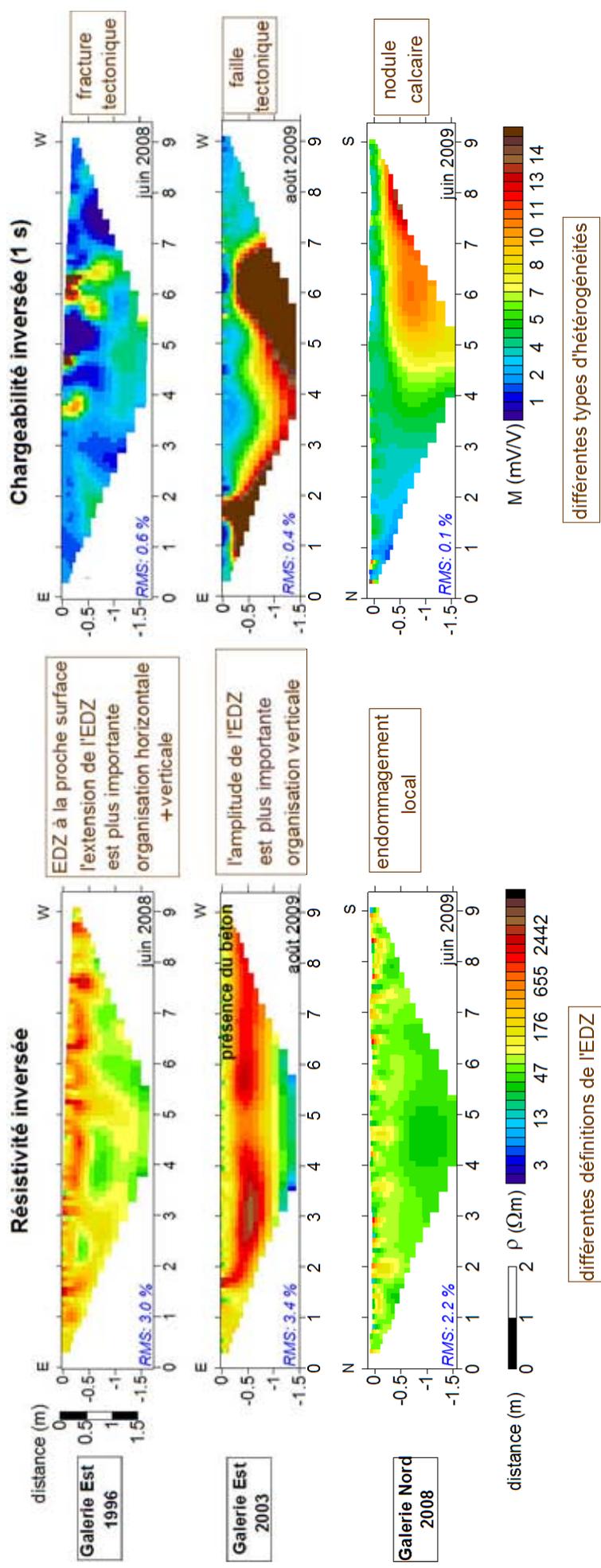


Figure II.84. Synthèse géoélectrique de caractérisation de l'EDZ dans des galeries radiers non-bétonnés (Galerie Est-96, Galerie Nord-08) et bétonné (Galerie Est-03).

2.10. Applications des méthodes PP à l'échelle des hétérogénéités

Dans le cadre du stockage des déchets radioactifs en formations argileuses profondes, la caractérisation des hétérogénéités est aussi importante que celle de l'EDZ. Les hétérogénéités ont un rôle important pour la génération et l'évolution de la zone endommagée. En effet, ces hétérogénéités et ces discontinuités peuvent constituer des chemins préférentiels de transport de fluides (ou d'éléments en solution) ou tout simplement des zones de fragilité mécanique (par incompatibilité des déformations). La compréhension de ces discontinuités à la fois concernant leur détection et leur nature, apportent donc des informations scientifiques précieuses en termes de sûreté d'un site de stockage. Dans ce cadre là, il est apparu important de réaliser des études géophysiques focalisées à l'échelle de l'hétérogénéité. En outre, ces études vont permettre de vérifier l'origine des anomalies PP mises en évidence précédemment sur les profils « en grand ». Nous nous intéresserons plus particulièrement à la réponse PPT des différents types d'hétérogénéités rencontrés sur le site de Tournemire. Ces hétérogénéités peuvent être regroupées en deux grandes classes : **(1) les hétérogénéités artificielles liées aux travaux d'excavation et (2) les hétérogénéités naturelles**. Parmi les hétérogénéités artificielles, on note **(i)** les fractures de désaturation (générées par une perturbation hydrique), **(ii)** les fractures néoformées (générées par une perturbation mécanique). Quant aux hétérogénéités naturelles, on peut citer **(a)** les fractures (ou failles) tectoniques, **(b)** les nodules calcaires.

Nous présentons ainsi dans cette section la réponse PP et électrique en courant continu des hétérogénéités artificielles *d'origine mécanique ou hydrique* et naturelles de différentes échelles (*mm, cm*). A la fin de ce chapitre, on essayera de savoir dans quelle mesure les méthodes géophysiques utilisées sont capables de détecter ces hétérogénéités. Présentons à présent la méthodologie adoptée pour travailler à l'échelle de chacune des hétérogénéités étudiées.

2.10.1. Méthodologie

Afin d'étudier la réponse PPT des hétérogénéités à une échelle pertinente, cinq profils localisés ont été choisis dans différentes galeries du site expérimental de Tournemire (galerie Est-96, Ouest-08, Sud-08). Ces profils ont ciblé directement des fractures de désaturation, des fractures néoformées (*artificielles*), des fractures tectoniques remplies de calcite et des nodules calcaires (*naturels*). L'argilite étant assez hétérogène et compte tenu de la densité d'hétérogénéités parfois élevée, l'installation des profils a été délicate dans certaines zones.

Sur ces profils localisés, l'échantillonnage a été ici choisi relativement plus fin (10 cm) comparativement à celui choisi pour les profils installés à l'échelle de la galerie (20 cm). Par conséquent, l'utilisation des électrodes en acier a été privilégiée de par leurs dimensions plus adaptées à cette échelle. Les différents dispositifs électriques ont été de nouveau utilisés afin de réaliser une étude avec différentes sensibilités. Les créneaux d'injection ont aussi un peu plus variés (1 s, 2 s ou 4 s), les plus faibles longueurs des profils (1,60 m ou 1,70 m) permettant un temps d'acquisition raisonnable.

❖ **Deux Profils « fractures de désaturation » (galerie Ouest-08 et Sud-08)**

L'étude géoélectrique des fractures de désaturation a été réalisée à partir du front de la galerie Ouest et de la paroi Ouest de la galerie Sud-08. Ces fractures apparaissent souvent aux fronts ou aux parois verticales de ces galeries. La période de l'acquisition a été choisie pour que l'ouverture de ces fractures soit maximum (mois de février 2010). On rappelle qu'à cette période sèche, le contraste d'humidité est maximum entre l'air ambiant et la zone saturée dans la roche. Dans le cadre de cette étude, l'objectif était d'étudier la résolution électrique permettant de détecter les fractures de désaturation au fond et à la paroi de ces galeries. Les détails concernant ces études sont résumés dans les **Tableaux II.12 à II.16** suivants :

Tableau II.12. Caractéristiques du profil localisé sur les fractures de désaturation dans la Galerie Ouest-08 en paroi et des paramètres d'acquisition.

hétérogénéité ciblée	fractures de désaturation
ouverture	1 mm
localisation du profil	<ul style="list-style-type: none"> à la paroi ouest au fond de la galerie Ouest-08 la 1^{ère} électrode est en haut. Le profil est décalé de 1,33 m vers le Nord selon l'axe de la galerie la fin du profil est à 1,17 m haut du radier
longueur du profil	1,70 m
orientation du profil	⊥ aux fractures et à la stratification
espacement inter-électrode	10 cm
nombre d'électrode	18
type d'électrode	en acier (3×55 mm)
caractéristiques des microforages	diamètre : 5 mm profondeur : 20 mm
dispositifs utilisés	Wenner- α (1 s, 2 s, 4 s) Wenner-Sch. et Wenner- β (1s)

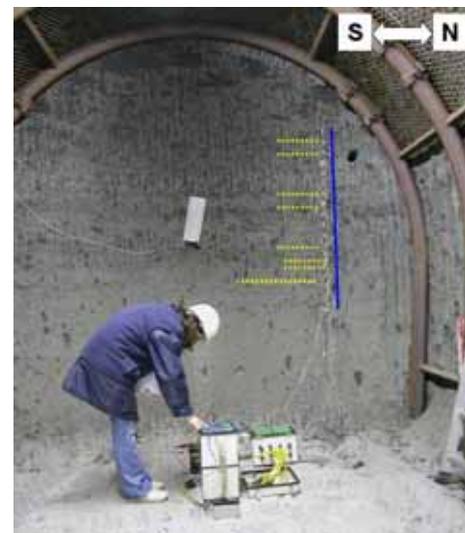


Figure II.85. Etude locale des hétérogénéités : fractures de désaturation (ouverture ~ 1 mm) au fond de la galerie Ouest-08 (bleu : profil électrique, jaune : présence des hétérogénéités ciblées). Sur l'axe du front de la galerie, on remarque l'extensomètre qui n'est pas en fonctionnement.

Tableau II.13. Caractéristiques du profil localisé sur les fractures de désaturation dans la Galerie Sud-08 en paroi et des paramètres d'acquisition.

hétérogénéité ciblée	fractures de désaturation
ouverture	1 mm - 4 mm
localisation du profil	<ul style="list-style-type: none"> • paroi ouest de la galerie Sud-08 • 54 cm décalé vers le Nord à partir du cintre N°25 • la 1^{ère} électrode est en haut, la fin du profil à 51 cm haut à partir du radier
longueur du profil	1,60 m
orientation du profil	⊥ aux fractures et à la stratification
espacement inter-électrode	10 cm
nombre d'électrode	17
type d'électrode	en acier (3×55 mm)
caractéristiques des microforages	diamètre : 5 mm profondeur : 20 mm
dispositifs utilisés	Wenner- α (1 s, 4 s) Wenner-Sch. (1 s) Wenner- β (1 s)

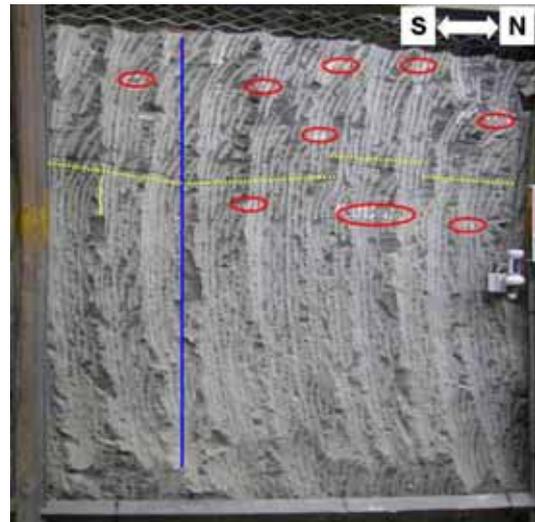


Figure II.86. Etude locale des hétérogénéités : fractures de désaturation (4 mm) à la paroi Ouest de la galerie Sud-08 (bleu : profil électrique, jaune : présence de l'hétérogénéité, rouge : hétérogénéités parasites non ciblées de type nodules calcaires)

❖ Profil « fractures néoformées » (galerie Est-96)

L'étude géoélectrique des fractures néoformées a été réalisée à partir de la galerie Est-96 où la densité de ce type de fractures et l'endommagement dont elles sont responsables sont importantes du fait de l'âge de la galerie. Les fractures néoformées apparaissent souvent au niveau du radier et par conséquent le profil localisé a été mis en place au niveau du radier. Une nouvelle zone de prospection a été choisie (différente de celle utilisée pour les prospections « en grand » à l'échelle de la galerie). La première électrode du profil localisé se trouvait un peu plus au fond de la galerie à 25,10 m par rapport au précédent profil au radier où la 1^{ère} électrode était à 21,10 m. Cette étude à plus petite échelle visait à clarifier les rôles et les impacts des fractures néoformées présentes dans la matrice argileuse.

Tableau II.14. Caractéristiques du profil localisé sur les fractures néoformées à la Galerie Est-96 au radier et des paramètres d'acquisitions.

hétérogénéité ciblée	fractures néoformées
ouverture	~ mm
localisation du profil	<ul style="list-style-type: none"> • au radier de la galerie Est-96 • la 1^{ère} électrode est à l'Est (PM 25,10) • // à l'axe de la galerie décalé de 71 cm vers le Sud
longueur du profil	1,70 m
orientation du profil	Est - Ouest, \perp aux fractures
espacement inter-électrode	10 cm
nombre d'électrode	18
type d'électrode	en acier (3×55 mm)
caractéristiques des microforages	diamètre : 5 mm profondeur : 20 mm
dispositifs utilisés	Wenner- α (1 s, 4 s) Wenner-Sch. (1 s) Wenner- β (1 s)



Figure II.87. Etude locale des hétérogénéités : fractures néoformées au radier de la galerie Est-96 (bleu : profil électrique).

❖ Profil « fractures tectoniques remplies de calcite » (galerie Est-96)

L'étude géoélectrique localisée au niveau des fractures tectoniques remplies de calcite a été réalisée au sein de la galerie Est-96. L'intérêt de cette étude était d'observer la réponse électrique d'une fracture tectonique remplie de calcite possédant une ouverture plus importante. Ce nouveau profil à l'échelle de l'hétérogénéité a été installé au front de la galerie, que deux fractures tectoniques remplies de calcite traversent. Ces deux fractures offrent deux échelles en termes d'ouverture (millimétrique et centimétrique).

Tableau II.15. Caractéristiques du profil localisé sur les fractures tectoniques remplies de calcite à la Galerie Est-96 en paroi et des paramètres d'acquisitions.

hétérogénéité ciblée	deux fractures tectoniques
échelle d'hétérogénéité	mm et cm
localisation du profil	<ul style="list-style-type: none"> • au fond de la galerie Est-96 en paroi • 1,6 m haut depuis le radier
orientation du profil	Nord - Sud
longueur du profil	1,70 m
caractéristique du profil	// à la stratigraphie ⊥ aux fractures
espacement inter-électrode	10 cm
nombre d'électrode	18
type d'électrode	en acier (3×55 mm)
microforages	diamètre : 5 mm profondeur : 20 mm
dispositifs utilisés	Wenner- α (1 s, 2 s) Wenner-Sch. (1 s, 2 s) dipôle-dipôle (1 s)



Figure II.88. Etude locale des hétérogénéités : fractures tectoniques remplies de calcite au fond de la galerie Est-96 (bleu : profil électrique, jaune : position des hétérogénéités ciblées)

❖ Profil « nodule calcaires » (galerie Ouest-08)

L'étude localisée au niveau d'un nodule calcaire a été réalisée à partir de la galerie Ouest-08 au niveau de la paroi Sud. Cette étude avait pour objectif de vérifier l'association entre les nodules calcaires mis en évidence au radier de la galerie Nord-08 et les réponses en chargeabilités qui leur correspondent très vraisemblablement (**Figures II.67 et II.68**). L'étendue des nodules calcaires et la présence de la fracture tectonique au radier de la galerie Nord ne permettaient pas de dérouler une étude locale dans cette galerie. Par conséquent, la galerie Ouest-08 a été choisie pour sa proximité à la galerie Nord et sa composition noduleuse bien observée en paroi (le radier étant bétonné). Cette zone a une densité de nodules calcaires importante et dispersée dans la matrice argileuse (**Figure II.89**).

Tableau II.16. Caractéristiques du profil localisé sur un nodule calcaire à la Galerie Ouest-08 en paroi et des paramètres d'acquisitions.

hétérogénéité ciblée	nodule calcaire
échelle d'hétérogénéité	10 cm d hauteur et ~ 20 cm de largeur
localisation du profil	paroi Sud (PM 83)
longueur du profil	1,60 m
caractéristique du profil	⊥ aux fractures et à la stratification
espacement d'électrode	10 cm
nombre d'électrode	17
électrodes	en acier (3×55 mm)
microforages	diamètre : 5 mm profondeur : 20 mm
dispositifs utilisés	Wenner- α (1 s) Wenner-Sch. (1 s, 4 s) dipôle-dipôle (1 s)



Figure II.89. Etude locale de l'hétérogénéité : nodule calcaire à la paroi Sud de la galerie Ouest-08 (bleu : profil électrique, jaune trait continu : nodule ciblé (10x20 cm), pointillé : nodules calcaires non ciblés ($x = 0,2$ m, $0,3$ m, $0,5$ m, $0,7-0,8$ m, $0,9$ m))

2.10.2. Hétérogénéités (artificielles)

2.10.2a. Fractures de désaturation

Fractures avec ouverture de ~1 mm :

La **Figure II.90** montre la mosaïque du profil opté en paroi au fond de la galerie Ouest-08 au niveau des fractures de désaturation (ouverture ≈ 1 mm) avec des indications de ces fractures visibles en surface. Nous avons utilisé Res2DInv pour le traitement des données (résistivité et chargeabilité apparente). Lors de l'inversion, la topographie de la surface de paroi n'a pas été prise en compte. Les sections inversées (2D) sont présentées sur la **Figure II.91**. L'axe des x sur les figures représente la profondeur d'investigation calculée perpendiculairement à partir de la surface de paroi. La profondeur d'investigation maximum obtenue est de 30 cm (dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger). L'axe des y représente les distances en mètre sur le profil. La première électrode est installée à la plus haute partie de la paroi et elle se trouve à $y=0$ m. Les erreurs RMS maximum calculées sont de 5,5 % pour les sections de résistivité et de 0,4 % pour la chargeabilité. Les positions des fractures sont également indiquées sur les sections inversées (**Figure II.91**).

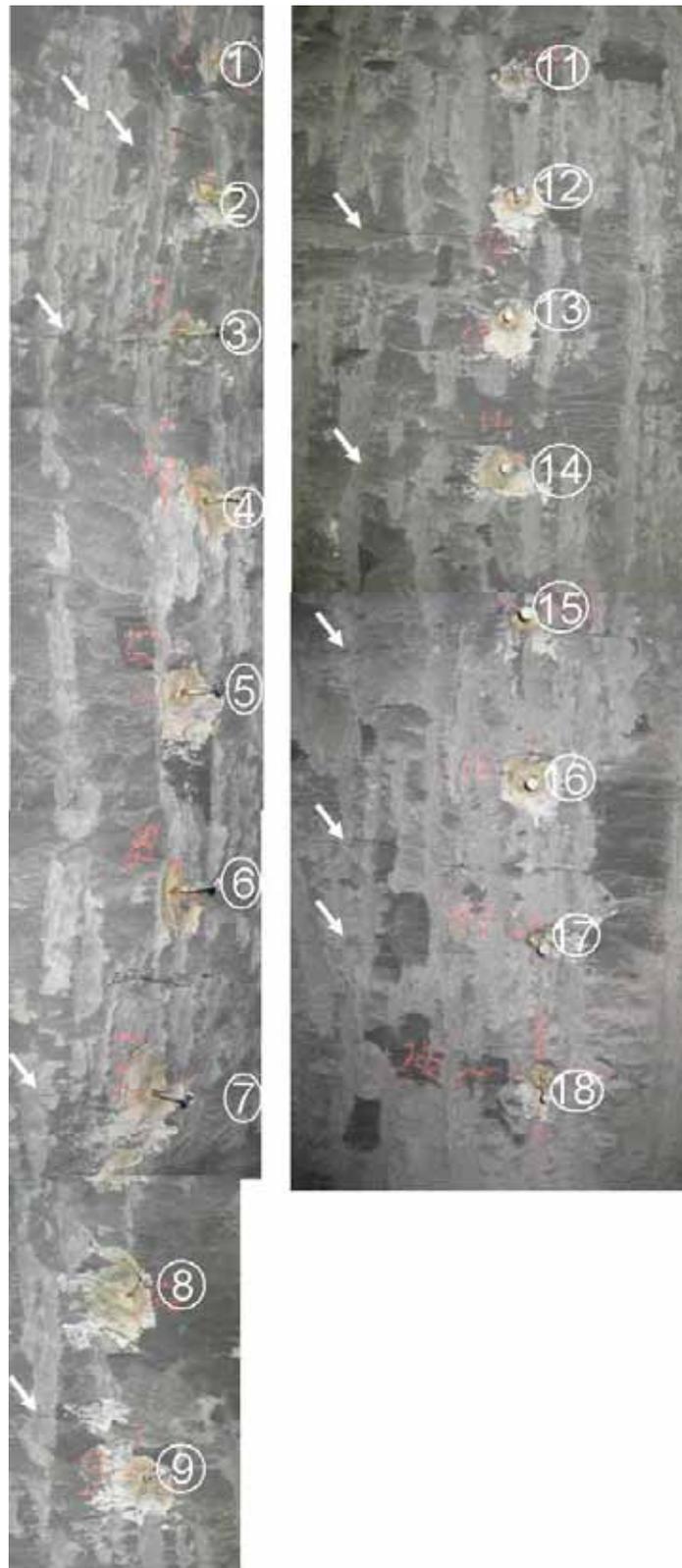


Figure II.90. Photo du profil local « fracture de désaturation (ouverture ~1 mm) » en paroi avec les indications par des flèches blanches des positions des fractures de désaturation (la numérotation correspond aux numéros des électrodes) au fond de la galerie Ouest-08 à la paroi Ouest.

Chargeabilité inversée

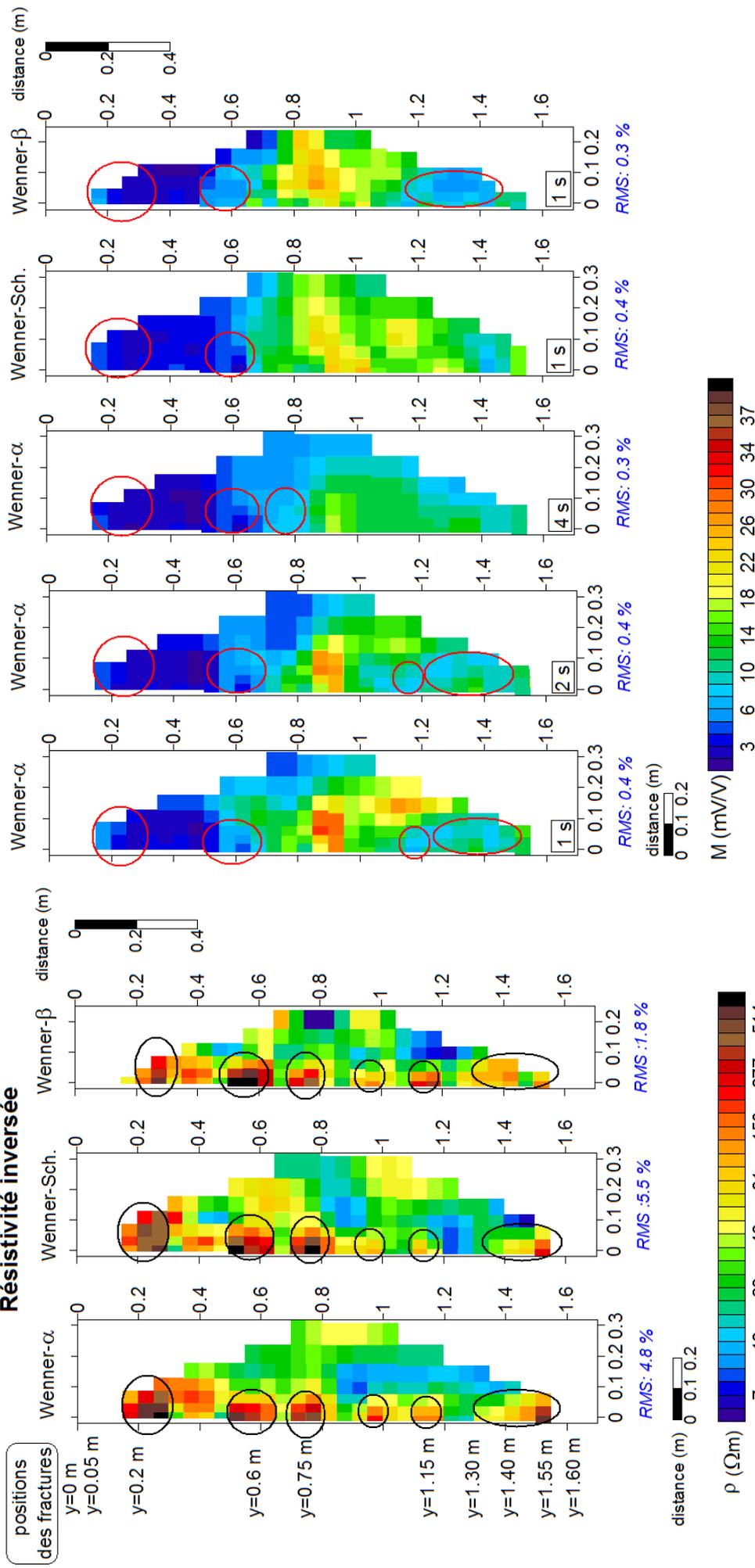


Figure II.91. Sections de résistivités (à gauche) et de chargeabilités (à droite) inversées pour les dispositifs Wenner- α (1 s, 2 s, 4 s), Wenner-Schlumberger (1 s) et Wenner- β (1 s) sur le profil local « fractures de désaturation (ouverture ~ 1 mm) » au fond de la galerie Ouest-08 à la paroi Ouest (les cercles noirs et rouges correspondent aux anomalies au niveau des fractures).

Interprétations en parallèle des sections de résistivité et de chargeabilité : fracture de désaturation (ouverture ≈ 1 mm)

Les sections de résistivité et de chargeabilité permettent de mettre en évidence les fractures de désaturation à l'échelle millimétrique en surface de la paroi par l'intermédiaire des valeurs de résistivité relativement élevées ($\geq 94 \Omega \cdot m$) et des chargeabilités faibles en surface (≤ 5 mV/V) (ce dernier point n'est pas systématique). Concernant les sections de résistivité, tous les dispositifs utilisés sont capables de détecter les niveaux de fractures. Quant à ceux de chargeabilité, le dispositif Wenner- α semble le meilleur avec une injection de 2 s.

Il existe une partie sur le profil où les données de résistivité et chargeabilité ne sont pas cohérentes entre-elles, i.e. au niveau de $y=0,75$ m et $y=1$ m. Les sections de résistivité permettent d'y détecter la fracturation, mais pas les sections de chargeabilité qui indiquent, sur ces mêmes niveaux, des valeurs élevées (≥ 14 mV/V). Comme la chargeabilité est fortement sensible à la présence d'hétérogénéités, ces valeurs élevées pourraient correspondre à une hétérogénéité non ciblée (de type nodule calcaire, fractures tectoniques) qui ne serait pas visible sur la paroi ou à un endommagement local supplémentaire associé aux hétérogénéités présentes dans la roche.

En conclusion, l'application de deux méthodes en parallèle (résistivité électrique et PPT) a permis de détecter les fractures de désaturation à l'échelle millimétrique à partir de la paroi d'une galerie récemment creusée (Ouest-08). Cette étude a permis également de mettre en évidence la présence de(s) hétérogénéité(s) parasite(s) et l'endommagement local de la roche liée à ces derniers.

*** Fractures avec ouverture de $\sim 1-4$ mm**

Le profil local au niveau de la fracture de désaturation la plus ouverte sur le site se trouve dans une zone où la densité des nodules calcaires est importante (**Figure II.86**). Pour l'inversion, la topographie de la surface de paroi a été prise en compte. La profondeur d'investigation maximum obtenue est de 40 cm (dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger). Les erreurs RMS maximum calculées sont de 3,9 % pour la résistivité et de 0,4 % pour la chargeabilité. Les positions des fractures sont données sur les sections inversées (**Figure II.93**).

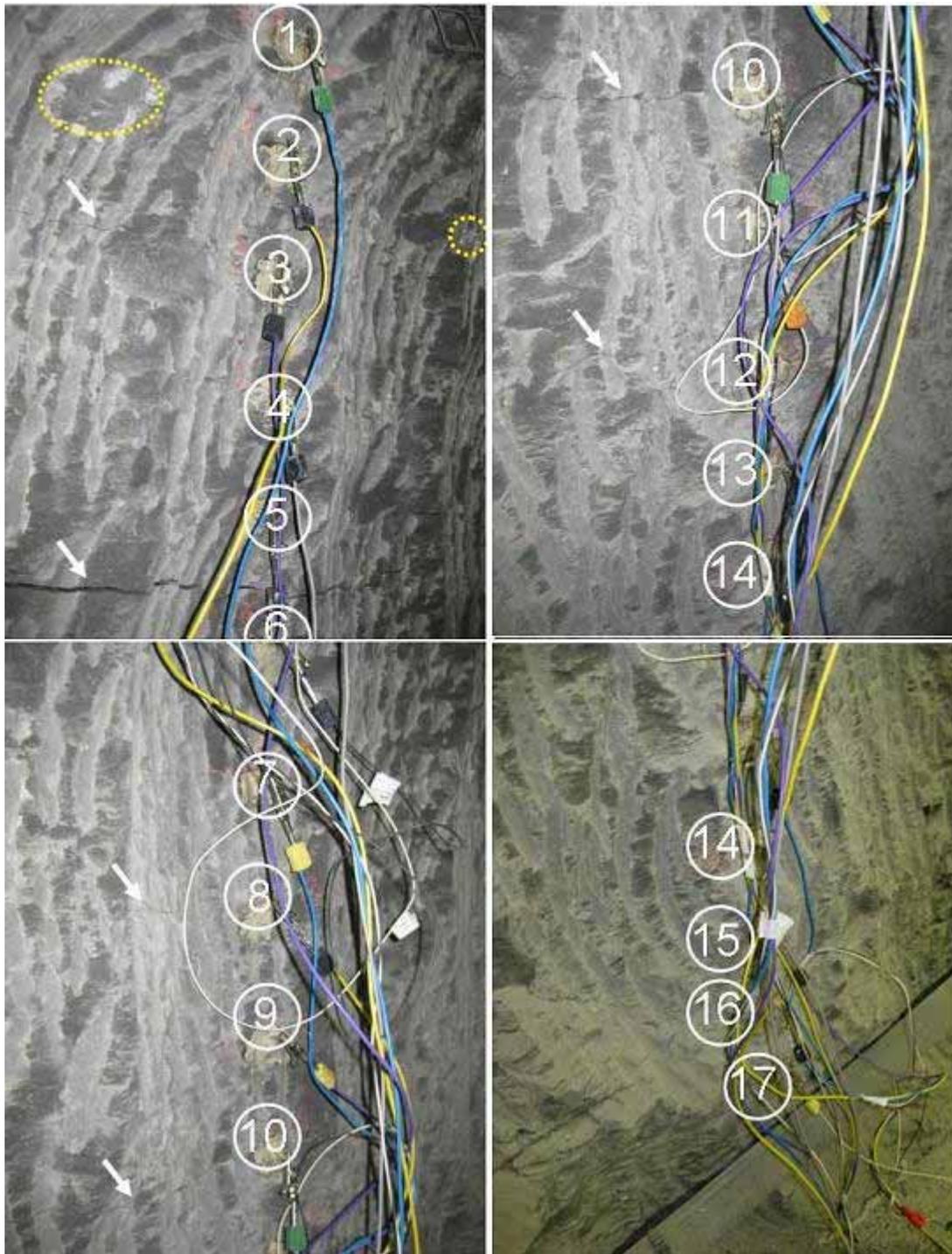


Figure II.92. Photo du profil local « fracture de désaturation (ouverture ~1-4 mm) » dans la galerie Sud-08 en paroi Ouest avec les indications (flèches blanches) des positions des fractures de désaturation (la numérotation correspond aux numéros des électrodes).

Interprétations en parallèle des sections de résistivité et de chargeabilité : fractures de désaturation (ouverture \approx 1-4 mm)

Les sections de résistivité permettent de détecter parfaitement tous les niveaux de fracturation présents sur le profil. Quant aux sections de chargeabilité, elles sont aussi satisfaisantes surtout avec le dispositif Wenner- α pour 4 s de durée d'injection. La fracture la plus ouverte (4 mm) se trouve à $y=0,45$ m sur le profil : elle est bien détectée par les deux paramètres physiques (résistivités élevées et chargeabilités faibles) avec le dispositif Wenner Schlumberger.

A $y=0,45$ m sur le profil, malgré la proximité du profil aux nodules calcaires encaissants dans la matrice hétérogène de l'argilite, des faibles valeurs de chargeabilité sont observées (**Figure II.93**). Par conséquent, nous concluons que la résolution du dispositif est suffisamment satisfaisante.

Le nodule (5cmx10 cm) le plus proche apparaît sur les sections inversés à $y=0,6-0,8$ m depuis la surface jusqu'à environ 30 cm en profondeur par des fortes valeurs de chargeabilité (≥ 7 mV/V). Les sections de résistivité n'apportent guère d'information sur la localisation de ce nodule (on retrouve ici les résultats obtenus sur les sections de résistivité inversée acquis au radier de la galerie Nord-08 qui n'avaient pas localisés le banc de nodules affleurant).

2.10.2b. Fractures néoformées

Le profil localisé au niveau des fractures néoformées a été installé au radier de la galerie Est-96. Ce profil a traversé de nombreuses fractures néoformées présentant une densité variable latéralement en surface du radier. La profondeur d'investigation maximum atteinte était de 40 cm (dispositifs Wenner- α et Wenner-Schlumberger). La topographie de la surface du radier a été prise en compte pour l'inversion. Les erreurs RMS maximales calculées pour les sections de résistivité et de chargeabilité sont respectivement de 7,2 % et de 0,9 %. Les **Figures II.94** et **II.95** montrent les deux zones où la densité des fractures est importante. Les deux zones de densité de fractures importante (rectangle en noir et en rouge) sont également tracées sur les sections inversées.

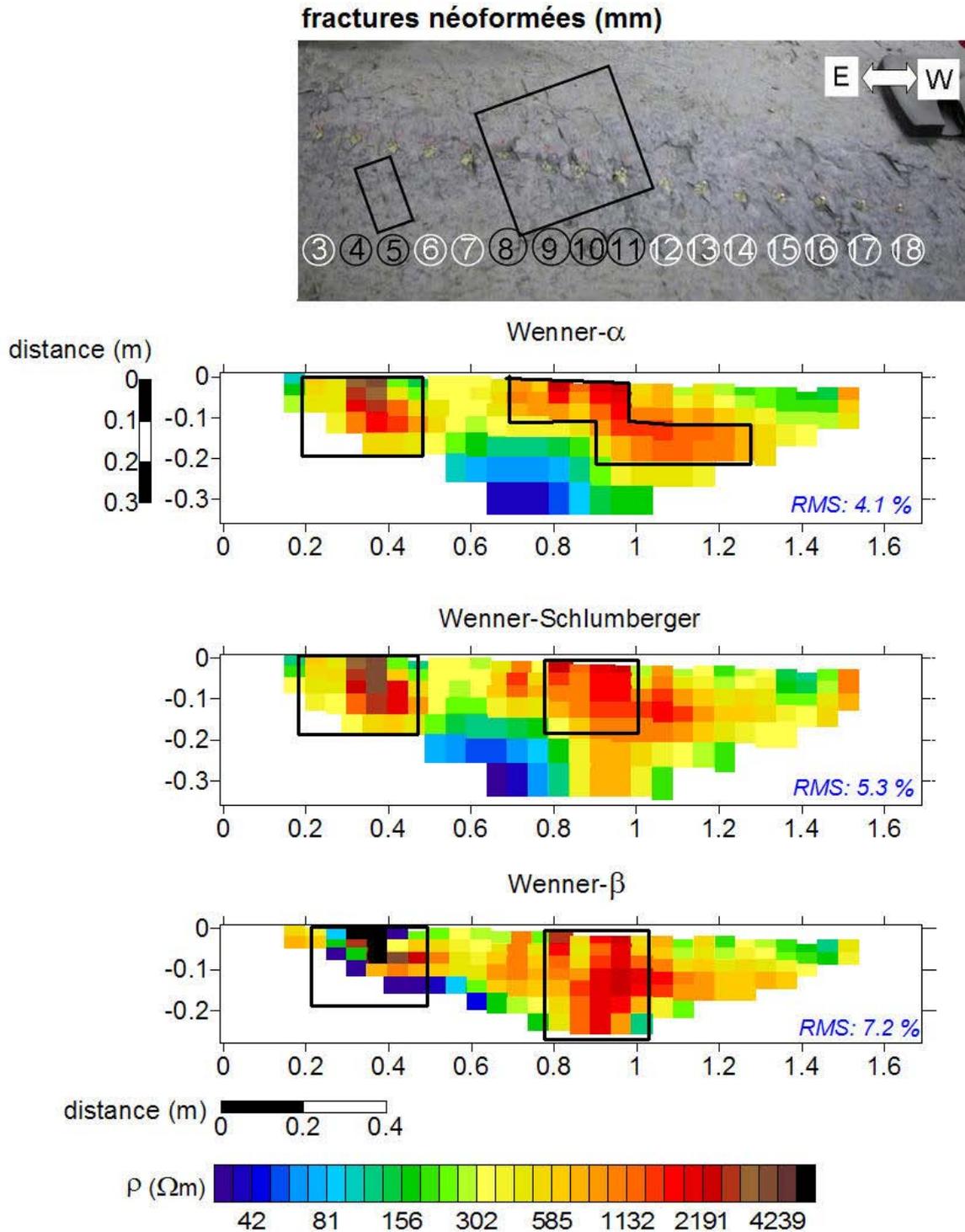


Figure II.94. **En Haut :** Photo du profil local « fractures néoformées » au radier de la galerie Est-96 avec les indications en forme de rectangle noir pour les fractures néoformées (les numérotations correspondent aux numéros des électrodes), **En bas :** Sections des résistivités inversées pour les dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger et Wenner- β sur le même profil (les polygones noirs correspondent aux anomalies de résistivité élevée au niveau des fractures néoformées).

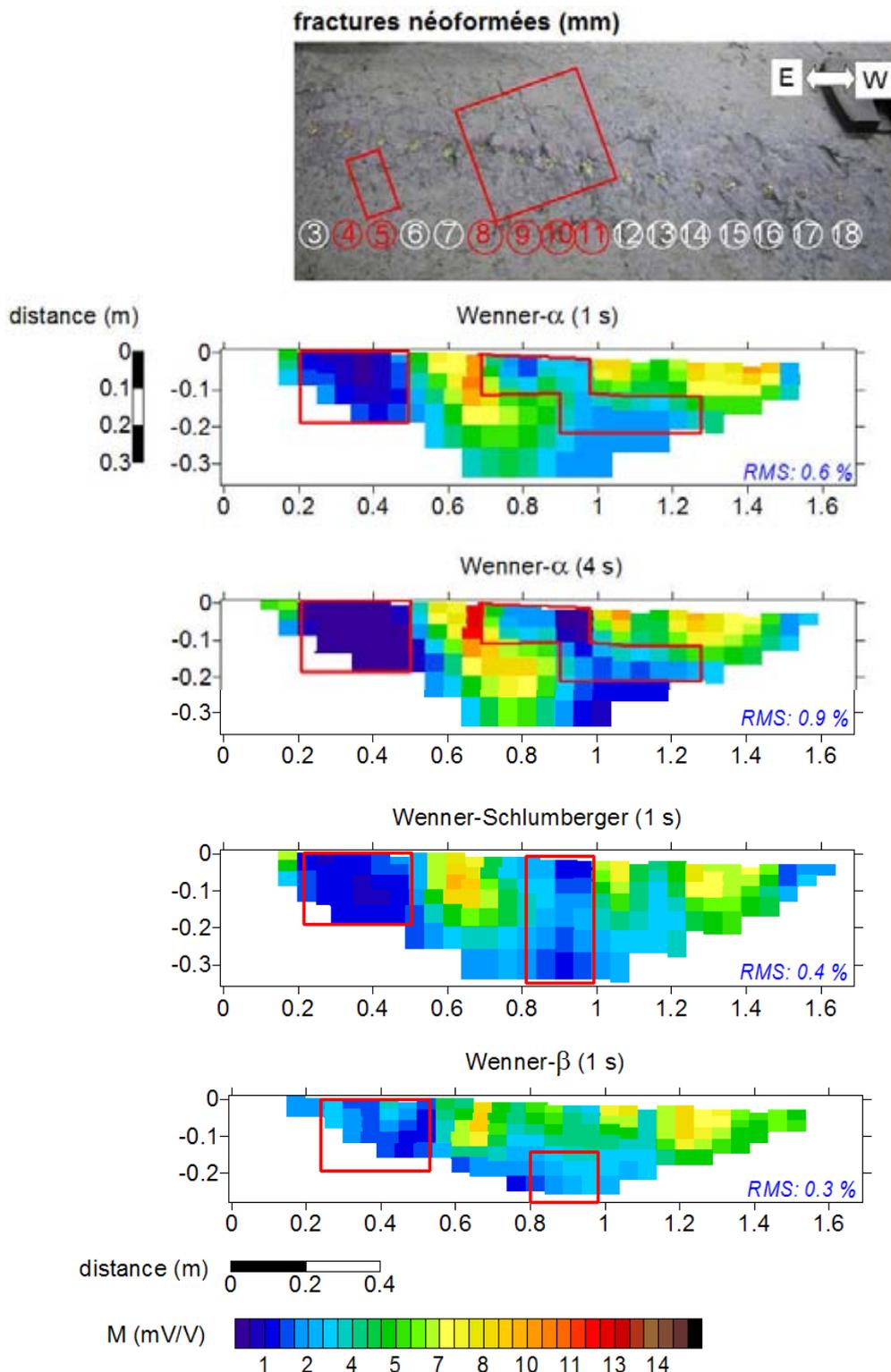


Figure II.95. En haut : Photo du profil local « fractures néoformées » au radier de la galerie Est-96 avec les indications en forme de rectangle noir pour les fractures néoformées (les numérotations correspondent aux numéros des électrodes), En bas : Sections des chargeabilités inversées pour les dispositifs Wenner- α (1 s, 4 s); Wenner-Schlumberger (1 s) et Wenner- β (1 s) sur le même profil (les polygones rouges correspondent aux anomalies de faible chargeabilité au niveau des fractures néoformées).

Interprétations en parallèle des sections de résistivité et de chargeabilité : fractures néoformées (ouvertures \approx mm)

La densité des fractures néoformées est importante sur le profil d'étude, si bien que la réponse électrique de ces structures est superposée aux réponses des autres structures. La réponse des fractures néoformées est caractérisée par des résistivités élevées en surface sous forme d'une couche continue (couleur jaune, **Figure II.94**). Cette étude a justifié que ces fractures soient responsables de l'EDZ observée au niveau du radier. La réponse des fractures néoformées est un peu plus ambiguë que pour les autres structures. Mais les dispositifs sensibles aux structures verticales (Wenner Schlumberger et Wenner- β) mettent toutefois bien évidence des anomalies subverticales qui pourraient être associées aux fractures néoformées ciblées.

Nous remarquons certaines zones de faibles chargeabilités (**Figure II.95**). La partie du profil définie par ($x=0,2$ m- $0,4$ m et $x=0,7$ m- $1,2$ m) correspond à une densité de fractures néoformées relativement plus importante par rapport au reste du profil. Ces zones induisent probablement une désaturation plus importante. En conséquence, les résistivités y sont plus élevées ($800 \Omega \cdot m$) et les chargeabilités plus faibles (≤ 3 mV/V). En résumé, la réponse des fractures néoformées est plus importante si leur densité est aussi importante.

Les chargeabilités élevées (≥ 4 mV/V) pour le reste du profil correspondent aux résistivités plus faibles en surface ($70-300 \Omega \cdot m$) au niveau de la roche saine en profondeur. Cette variation en termes de résistivité et de chargeabilité entre les différentes parties du profil peut correspondre à différents états de saturation de la roche contrôlés par les caractéristiques des fractures néoformées (densité, ouverture) ou par la présence d'hétérogénéités (de type fractures tectoniques au niveau du radier de la galerie Est). Dans une galerie ancienne, la réponse des fractures néoformées est plus forte si leur densité et leur ouverture sont importantes.

2.10.3. Hétérogénéités naturelles

2.10.3a. Fractures remplies de calcite

Le profil localisé au niveau des fractures remplies de calcite a été installé au fond de la galerie Est-96 en paroi. La profondeur d'investigation maximum atteinte était de 40 cm (dispositifs Wenner- α et Wenner-Schlumberger). L'axe des x indique la position latérale en mètre sur la paroi, l'axe des z indique la profondeur perpendiculaire à la surface de la paroi. Lors du traitement de données issues de ce profil (l'inversion), la topographie de la surface du

radier n'a pas été prise en compte. Finalement, les erreurs RMS maximum calculées pour les sections de résistivité est de 4,6 %, pour les sections de chargeabilité, elle est de 1,8 %. Les **Figures II.96** et **II.97** montrent les deux fractures tectoniques à différentes échelles. Les sections inversées marquent également la présence de ces deux fractures (cercle en noir et en rouge).

Interprétations en parallèle des sections de résistivité et de chargeabilité : fractures tectoniques remplies de calcite (mm - cm)

Les sections de résistivité et de chargeabilité permettent de détecter les fractures tectoniques remplies de calcite indépendamment de son échelle (mm - cm) (**Figures II.96 et II.97**). Ces résultats valident les réponses obtenues sur le profil au radier de la galerie Est-96 au niveau des fractures remplies de calcite (**Figures II.45**).

Les résistivités apparaissent plus élevées au niveau des fractures tectoniques. En profondeur, nous notons l'impact de ces hétérogénéités en termes d'endommagement de la roche. La roche est plus perturbée au niveau de ces fractures caractérisées par des résistivités élevées ($\geq 500 \Omega m$). Quant aux chargeabilités, les valeurs sont aussi élevées au niveau des fractures tectoniques surtout pour celles à l'échelle centimétrique (jusqu'à 120 mV/V pour le dispositif dipôle-dipôle et environ 60 mV/V pour les autres dispositifs). Afin de mettre aussi en évidence la réponse de la fracture à l'échelle millimétrique (même échelle que celles observées sur le profil longitudinal au radier de la campagne décrite en **2.6.3**), l'échelle de couleur est bornée à [20 mV/V]. Les valeurs les plus élevées au dessus de cette limite sont interpolées en noir.

Les sections de résistivité mettent en évidence l'endommagement lié à ces hétérogénéités mais quel est l'origine des anomalies de chargeabilité ? Afin de répondre à cette question, une analyse minéralogique par la méthode de DRX a été effectuée à partir des échantillons prélevés au niveau du remplissage de la fracture tectonique d'échelle centimétrique sur le profil.

Les résultats des analyses minéralogiques (DRX) indiquent que la phase la plus importante est la calcite qui se présente sous forme de phénocristaux bien développés, associée à du quartz. Dans le remplissage de la fracture tectonique, la présence locale de plages de cristaux opaques à reflets mordorés présentent toutes les caractéristiques de sulfures (pyrite ou chalcopyrite). La pyrite est significativement présente (environ 10 % en masse) et irrégulièrement distribuée le long de cette fracture.

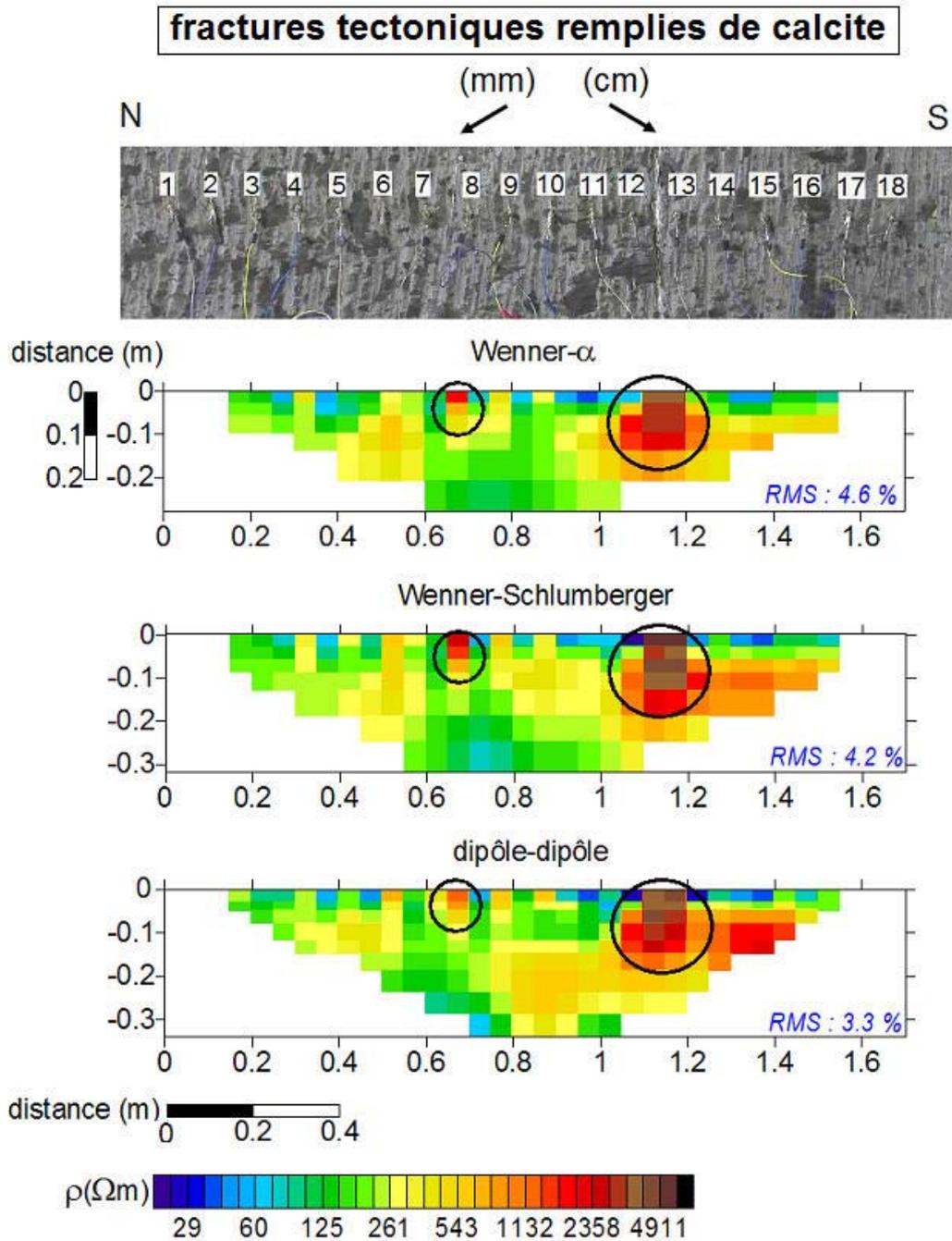


Figure II.96. En Haut : Photo du profil local « fractures tectoniques » en paroi (les numérotations correspondent aux numéros des électrodes), En bas : Sections des résistivités inversées pour les dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle sur le profil local « fractures tectoniques » au fond de la galerie Est-96 en paroi (les cercles noirs correspondent aux anomalies de résistivité au niveau des fractures tectoniques).

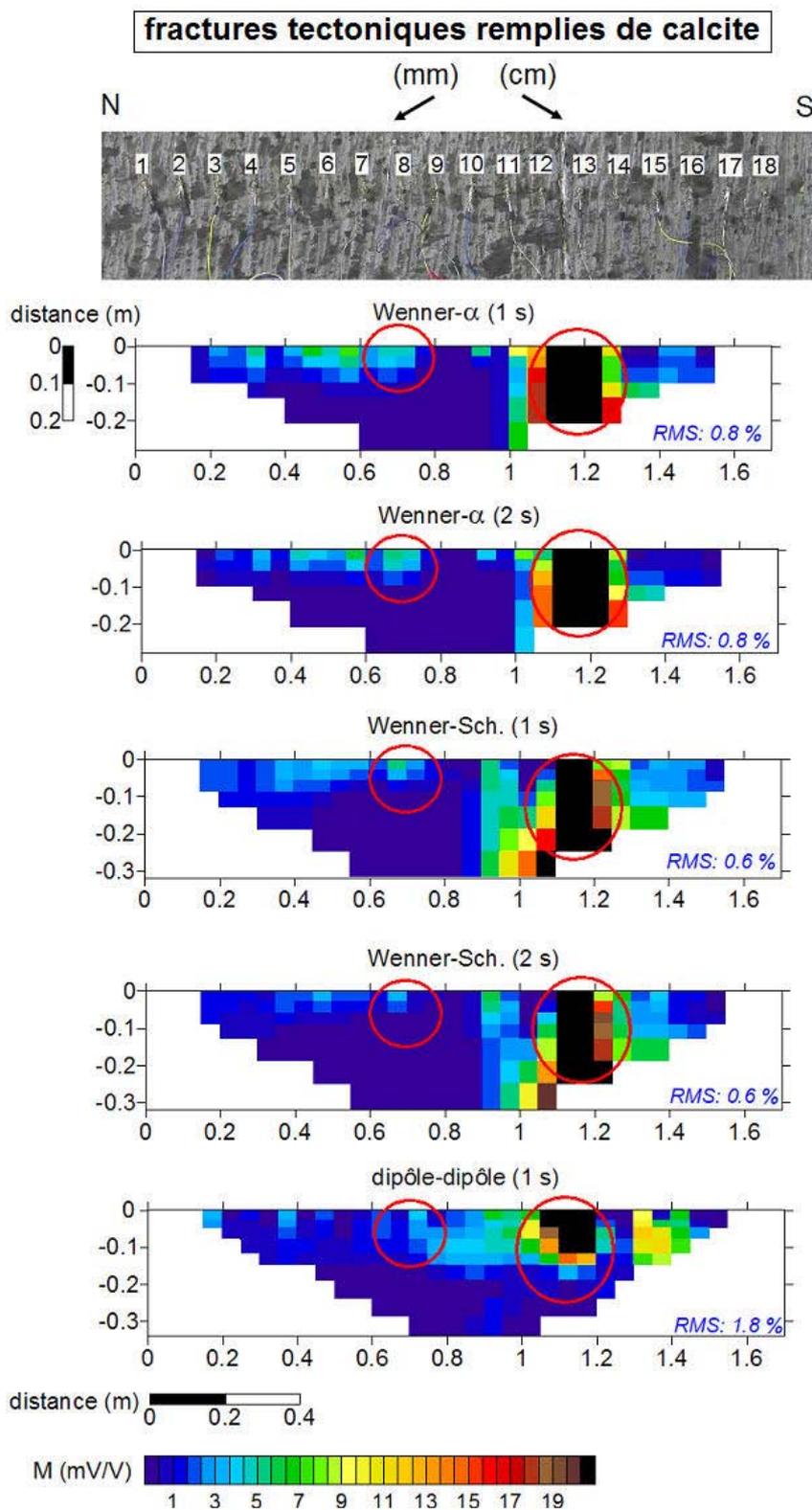


Figure II.97. **En haut** : Photo du profil local « fractures tectoniques » en paroi (numérotations correspondent aux numéros des électrodes), **En bas** : Sections de chargeabilités inversées pour les dispositifs Wenner- α (1 s, 2 s) ; Wenner-Schlumberger (1 s, 2 s) et dipôle-dipôle (1 s) sur le profil local « fractures tectoniques » au fond de la galerie Est-96 en paroi (les cercles rouges correspondent aux anomalies de chargeabilité au niveau des fractures tectoniques, échelle de couleur limitée).

Le pourcentage de 10 % de pyrite dans le remplissage de la fracture tectonique induit des réponses très élevées pour la méthode PP (chargeabilité). Loke (2001) propose un tableau (**Figure II.98**) où il a synthétisé la réponse en chargeabilité des différents types de roches et/ou en fonction de leur contenu en minéral.

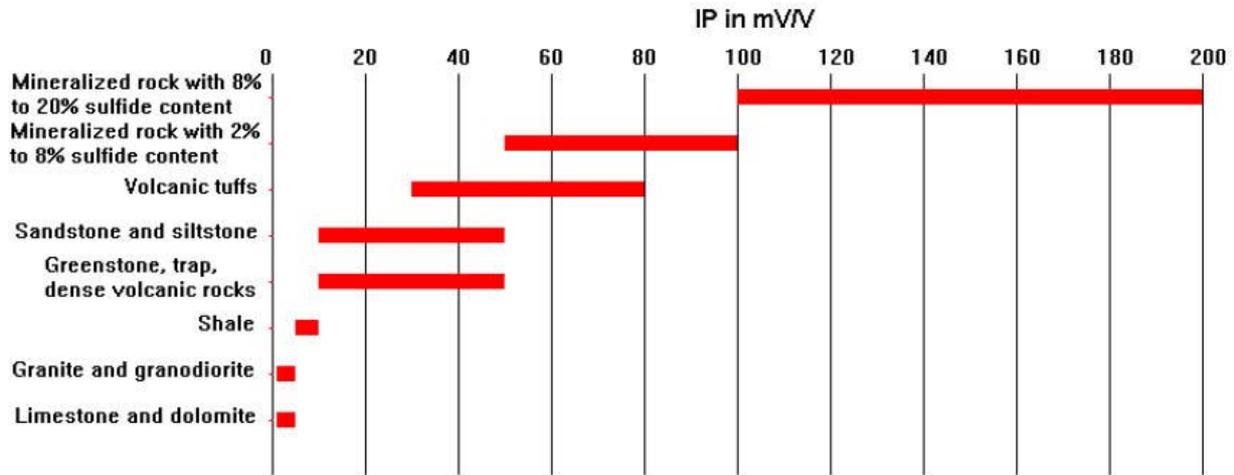


Figure II.98. Les valeurs de chargeabilités de certains roches et minéraux (Loke, 2001).

Pour le contenu en sulfure d'une roche de [2 % à 8 %], la réponse en chargeabilité varie de [50 à 100 mV/V] en fonction de sa teneur en minerai. Les sections de chargeabilité obtenues, l'analyse minéralogique et le tableau proposé par Loke (2001) semblent tous cohérents et convergent vers la même conclusion : *la réponse PP des fractures tectoniques dépend au contenu en sulfure présents dans le remplissage.*

2.10.3b. Nodule calcaires

Le profil localisé au niveau d'un nodule calcaire décimétrique a été installé dans la galerie Ouest-08 sur la paroi Sud. La profondeur d'investigation maximum atteinte était de 29 cm (dispositif Wenner-Schlumberger). L'axe des x indique la profondeur perpendiculaire à la surface de paroi (en mètre), l'axe des y indique la position verticale sur le profil (en mètre). La première électrode a été installée dans la partie la plus haute du profil depuis le radier. Lors du traitement de données issues de ce profil (l'inversion), la topographie de la surface en paroi verticale n'a pas été prise en compte. Finalement, les erreurs RMS maximum calculées pour les sections de résistivité est de 1,4 % et de 0,6 % pour les sections de chargeabilité. La **Figure II.99** indique les positions des électrodes avec leur numérotation et les positions des nodules calcaires ciblées et non ciblées. Les sections inversées marquent également les réponses liées à ces hétérogénéités (cercles en noir et en rouge).

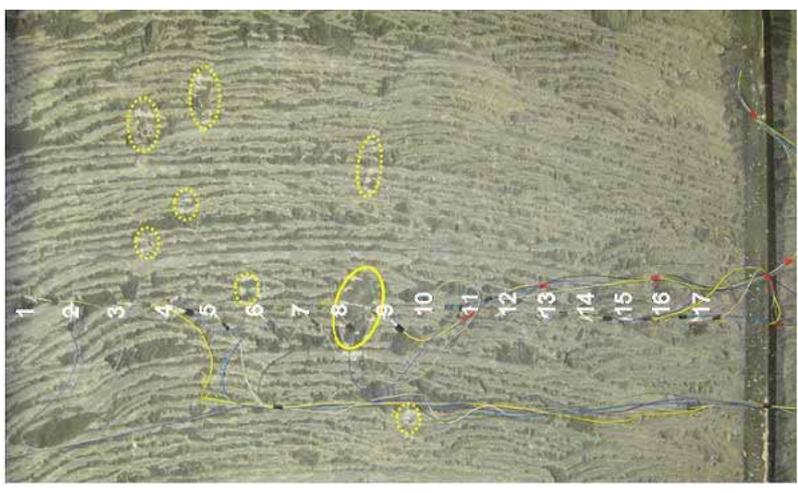
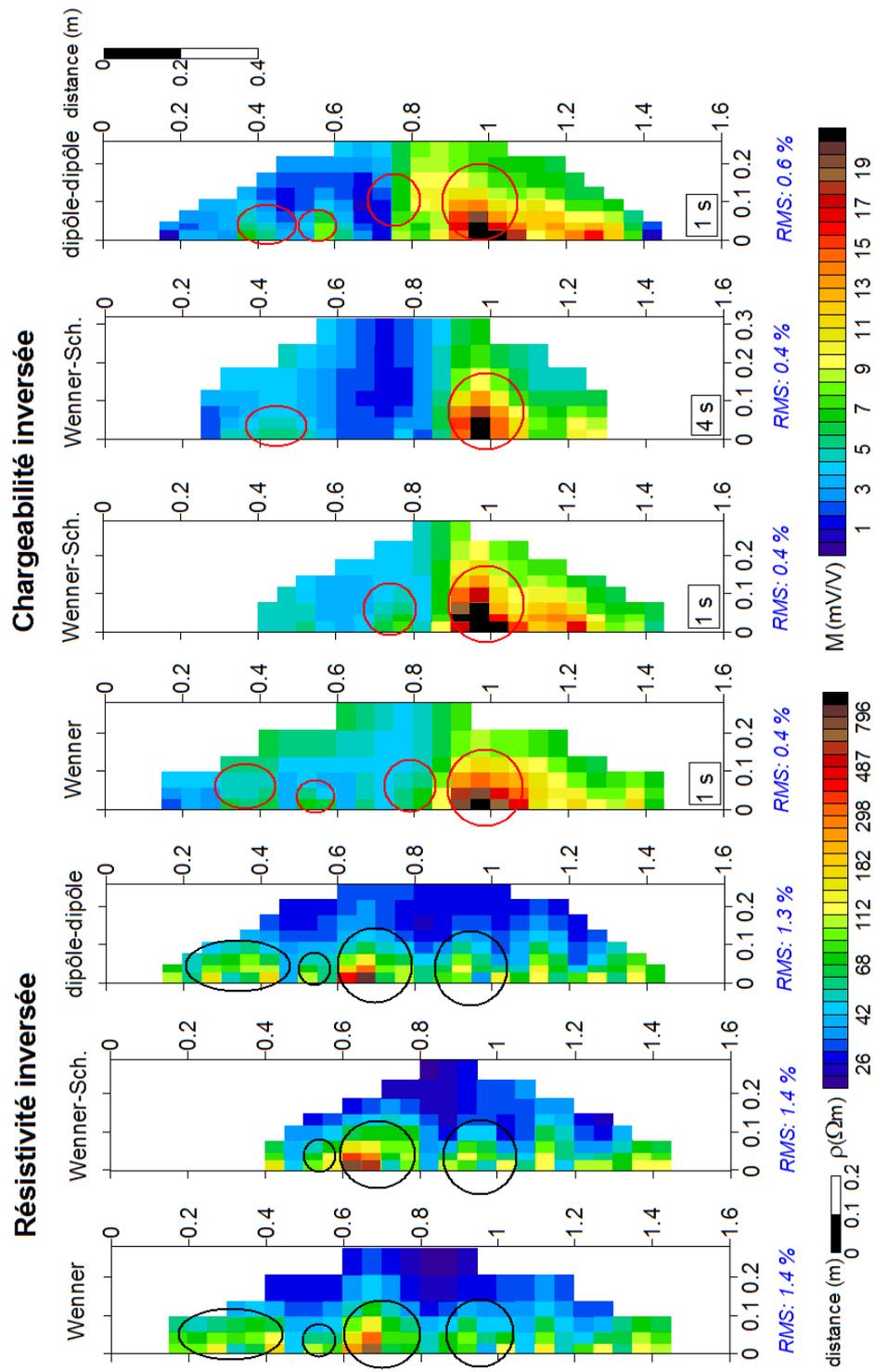


Figure II.99. A gauche : Photo du profil local « nodule calcaires » avec les indications des nodules parasites entourés en jaune (cercles pointillés) et nodule ciblé (cercle continu) (les numérotations correspondent aux numéros des électrodes), A droite : Sections de résistivité et chargeabilité inversées pour les dispositifs Wenner- α , Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle sur le profil local « nodule calcaire » dans la galerie Ouest-08 paroi sud (les cercles noirs et rouges correspondent aux anomalies au niveau des nodules).

Interprétations en parallèle des sections de résistivité et de chargeabilité : nodule calcaire

Les sections de résistivité montrent un endommagement de même ordre de grandeur en proche surface de la paroi le long du profil ($\sim 80-100 \Omega \cdot m$) sauf à $y=0,6-0,7 m$ ($\sim 180 \Omega \cdot m$). L'anomalie résistante sur les sections de résistivité inversées à $y=0,6-0,7 m$ n'est pas située suivant l'axe du nodule calcaire ($y=0,75 m$). Ceci peut être lié à la taille et à la forme (non sphérique) de l'hétérogénéité (nodule calcaire $10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$) sur l'espacement inter-électrode (10 cm). En même temps, à la vue des résultats *in situ* obtenus précédemment, les sections de résistivité ont généralement du mal à caractériser les nodules calcaires. Nous étudions alors la chargeabilité afin de clarifier l'origine de cette anomalie. Les chargeabilités ne sont pas élevées à $y=0,6-0,7 m$.

Les valeurs en chargeabilité élevées sont observées surtout à partir de $y=0,9 m$ jusqu'à la fin du profil alors que l'axe du nodule calcaire est à $y=0,75 m$. Ces anomalies sont soit liées (1) au nodule calcaire ciblé soit (2) à un autre banc de nodule calcaire invisible en profondeur dans ce secteur. Si l'origine de ces anomalies est liée au nodule calcaire ciblé, le fait de ne pas observer la position de l'anomalie sur l'axe principal du nodule est soit lié au rapport de la grandeur de l'hétérogénéité sur l'espacement inter-électrode ou soit lié à l'extension du nodule en profondeur.

En résumé, même si les positions des anomalies observées ne correspondaient pas exactement à la position de l'hétérogénéité ciblée (décalage lié à diverses raisons présentées ci-dessus), dans une zone si noduleuse, les chargeabilités élevées obtenues ($\geq 12 \text{ mV/V}$) confirment les résultats de la prospection à la galerie Nord au niveau du radier concernant les bancs noduleux (voir **section 2.7.1**).

2.11. Conclusion des prospections géoélectriques à l'échelle des hétérogénéités

Les investigations menées sur des profils localisées permettent de dégager les conclusions ci-dessous suivant les hétérogénéités mises en jeu.

Fractures de désaturation :

Les deux prospections géoélectriques (PPT et résistivité électrique) ont permis de détecter les fractures de désaturation (ouverture de 1-4 mm) en paroi des galeries récemment excavées (Ouest-08, Sud-08). Lorsqu'il s'agit de la prospection PPT, les fractures de désaturation sont mieux détectées (faibles valeurs de chargeabilité : $\approx 1,5$ mV/V) surtout pour un créneau d'injection de 4 s et avec le dispositif Wenner- α (**Figures II.91 et II.93**). Les résultats sont ainsi conformes à ceux obtenus lors des études menées à l'échelle de la galerie.

Fractures néoformées :

Concernant la prospection à l'échelle des fractures néoformées (Est-96), les sections de résistivité obtenues sont cohérentes avec ceux des études réalisées à l'échelle de la galerie. La réponse en courant continu des fractures néoformées, organisées en réseaux denses et interconnectés, montre une zone caractérisée par des résistivités élevées et des chargeabilités faibles. Cette zone semble être étendue horizontalement et verticalement. Toutefois, une fracture néoformée n'aura pas de réponse électrique individuelle, i.e. exprimée par une anomalie partielle de chargeabilité en propre (voir les résultats obtenus dans la galerie Est-96).

Fractures tectoniques remplies de calcite :

A l'échelle de l'hétérogénéité, les sections de résistivité et de chargeabilité permettent de détecter les fractures tectoniques remplies de calcite indépendamment de l'échelle de leur ouverture (mm-cm). Toutefois, la fracture tectonique possédant une ouverture centimétrique montre des ordres de grandeur de résistivité ($\geq 500 \Omega \cdot m$) et de chargeabilité (i.e. ~ 60 mV/V) bien plus élevés que ceux des autres fractures tectoniques mises en jeu. Ces structures présentent des corps électriquement isolants à l'origine des résistivités élevées. Les anomalies de chargeabilité importantes au niveau des fractures tectoniques sont expliquées par la présence de la pyrite (environ 10 %) irrégulièrement distribuée le long du remplissage calcite de ces fractures. Rappelons qu'à l'échelle de la galerie (Est-96), il n'était pas possible uniquement à partir des valeurs de résistivité, d'identifier clairement les fractures tectoniques, résistantes (électriquement), remplies de calcite et se trouvant dans l'EDZ.

Nodules calcaires :

La caractérisation géoélectriques des nodules calcaires se présentant dispersées dans la matrice argileuse dépend du rapport entre la dimension des nodules et l'espacement inter-électrode. A ce stade, les résultats à l'échelle de l'hétérogénéité ont montré une détection moins performante par rapport aux résultats à l'échelle de la galerie pour laquelle les nodules se présentaient sous la forme d'une couche. Toutefois, les chargeabilités élevées obtenues soulignent la cohérence de deux échelles de prospection.

2.12. Suivi géoélectrique de l'évolution temporelle de la zone endommagée à la galerie Est-96 (Juin 2008-Février 2009)

[Ramambaso \(2001\)](#) avait déjà suggéré que des forts contrastes d'hygrométrie ambiante induisaient des comportements différents des discontinuités (fractures/fissures) suivant leurs positions dans les galeries : (a) sur les parois verticales, les fractures préexistantes de type désaturation se ferment ou s'ouvrent suivant les variations saisonnières d'humidité de l'air alors que (b) les fractures néoformées localisées au radier ne réagissent pas aux variations d'humidité relative (HR). Ces différences de comportements (endommagement hydrique aux parois verticales, perturbation hydrique au radier) vont donc induire une composante transitoire dans le signal PP associé à l'EDZ, à l'échelle de la galerie et à une échelle de temps annuel.

L'objectif de cette étude visait donc ici à isoler cette composante transitoire. Cette étude a alors consisté à surveiller l'influence des perturbations hydriques sur les propriétés électrique intrinsèques de l'argilite entre deux instants (à 9 mois d'intervalle) par l'intermédiaire de tomographies (2D) de Polarisation Provoquée Temporelle et de résistivité électrique. Cette étude a été réalisée dans la galerie ancienne Est-96 avec une méthodologie simple. Nous avons supposé que dans cette galerie ancienne, les variations saisonnières jouaient uniquement sur le comportement de fractures préexistantes : elles n'ont pas favorisé le développement de nouvelles fractures.

Les campagnes de mesure ont été réalisées à deux périodes de l'année pour lesquelles le contraste de l'humidité ambiante est connu être important : juin (2008) et février (2009). Les acquisitions ont été réalisées en respectant le même protocole d'acquisition que celui des campagnes de mesures présentées précédemment. Rappelons que suivant ce protocole, l'installation des électrodes a été possible grâce à la réalisation de microforages : les électrodes ont donc été positionnées précisément aux mêmes endroits au cours du suivi. L'espacement entre les électrodes a été également conservé. La conservation dans le temps

de ces deux paramètres (position des électrodes et espacement inter-électrodes) a permis d'éviter des artefacts liés à la différence de positions du dispositif entre les deux périodes d'étude. L'injection de la bentonite dans ces microforages afin d'assurer le contact entre la roche et les électrodes a permis de mesurer des résistances de contact (menu Rs-check du Syscal) maximales de l'ordre de 3 k Ω en juin et de 10 k Ω en février.

Dans la suite, nous présentons dans un premier temps, les résultats expérimentaux du profil au radier suivant les deux périodes. Pour cette étude, nous avons testé deux différentes méthodes d'inversion que le logiciel de Res2dInv offre (inversion « classique » utilisée dans les investigations précédentes et d'inversion dite « time lapse »). Nous comparons ensuite les réponses obtenues avec ces deux méthodes d'inversion. A la fin du chapitre, nous présentons aussi les résultats expérimentaux du profil en arc.

2.12.1. Résultats des prospections PPT et résistivité électrique sur le profil au radier

2.12.1a. Inversion classique au radier (Res2DInv)

Les résultats de l'inversion classique effectués pour le profil au radier suivant deux périodes sont donnés sur les **Figures II.100 et II.101**. Les inversions effectuées tiennent compte de la topographie des électrodes. Les résultats présentés (dispositifs : Wenner- α et dipôle-dipôle) concernent les sections de résistivité et de chargeabilité du mois de Juin (2008), celles du mois de Février (2009) et les sections de différence. Les sections de différence permettant d'interpréter les variations de résistivité ont été calculées à partir des valeurs inversées par la formule suivante :

$$\frac{\log|\rho_{\text{février}}| - \log|\rho_{\text{juin}}|}{\log|\rho_{\text{juin}}|} \times 100 \quad \text{équation (II.6)}$$

Concernant le calcul des variations de chargeabilité, la même équation a été utilisée sans prendre le logarithme des grandeurs affichées. Les barres d'erreur maximum calculées concernant les sections de résistivité est 13,5 % (dipôle-dipôle) et 0,6 % pour les sections de chargeabilité (Wenner- α). Rappelons que l'acquisition avec le dispositif dipôle-dipôle a été effectuée sans la mesure de chargeabilité (uniquement en mode de résistivité) à cause du mauvais rapport signal/bruit.

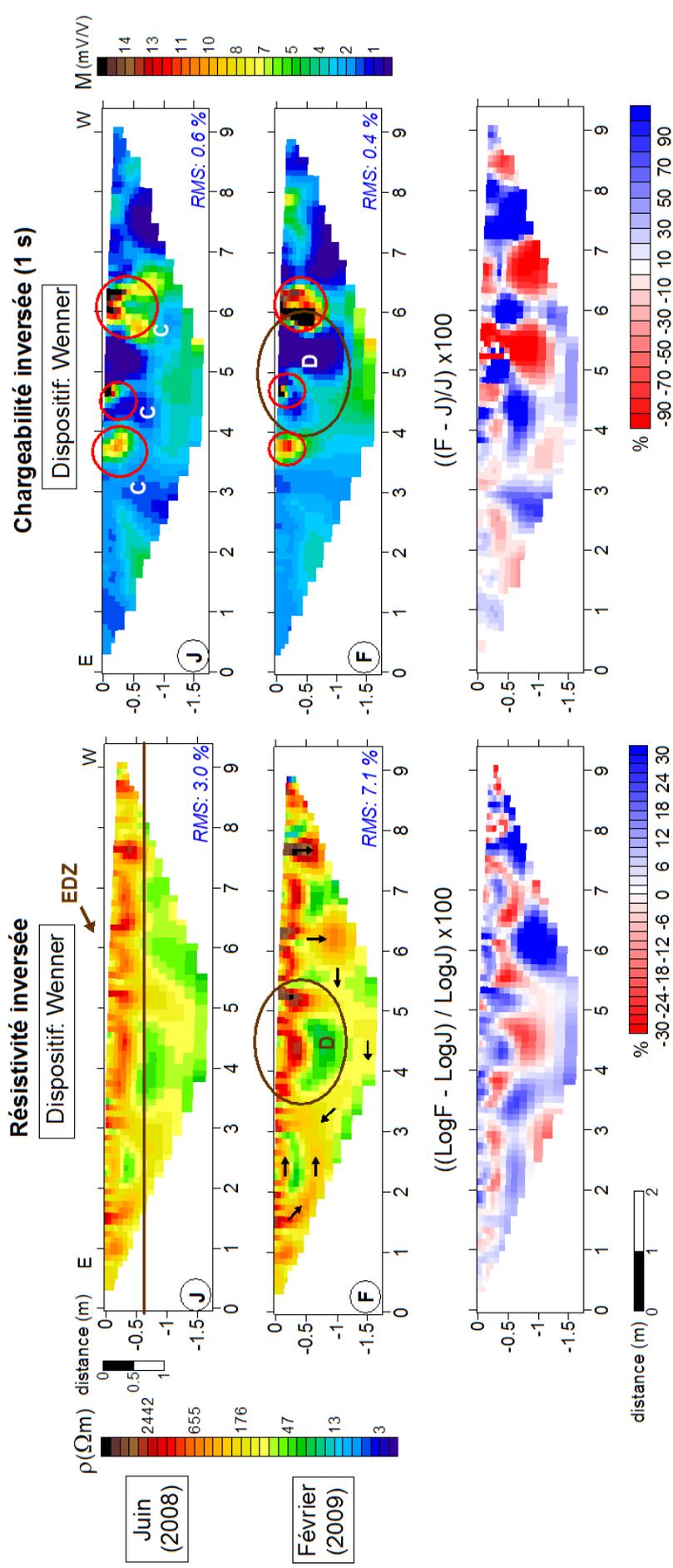


Figure II.100. Impact des variations saisonnières d'hygrométrie sur la résistivité et la chargeabilité avec le dispositif Wenner- α à partir du profil au radier dans la galerie Est-96 (2 périodes d'acquisition : Juin 2008 - Février 2009). La ligne en marron sur les sections de résistivité inversée indique la profondeur de la zone endommagée. Les cercles en marron sur les sections de résistivité et de chargeabilité désignent la désaturation de la roche (noté D). Les flèches en noir sur la section de résistivité inversée indiquent les anomalies correspondant à la minéralisation dans les fractures tectoniques remplies de calcite (noté C). Sur les sections de différence de la désaturation en février 2009. Les cercles en rouge sur les sections de chargeabilité inversée indiquent les zones où les résistivités ou chargeabilités sont plus importantes en février, le rouge indique les zones où les résistivités ou chargeabilités sont plus importantes en juin 2008.

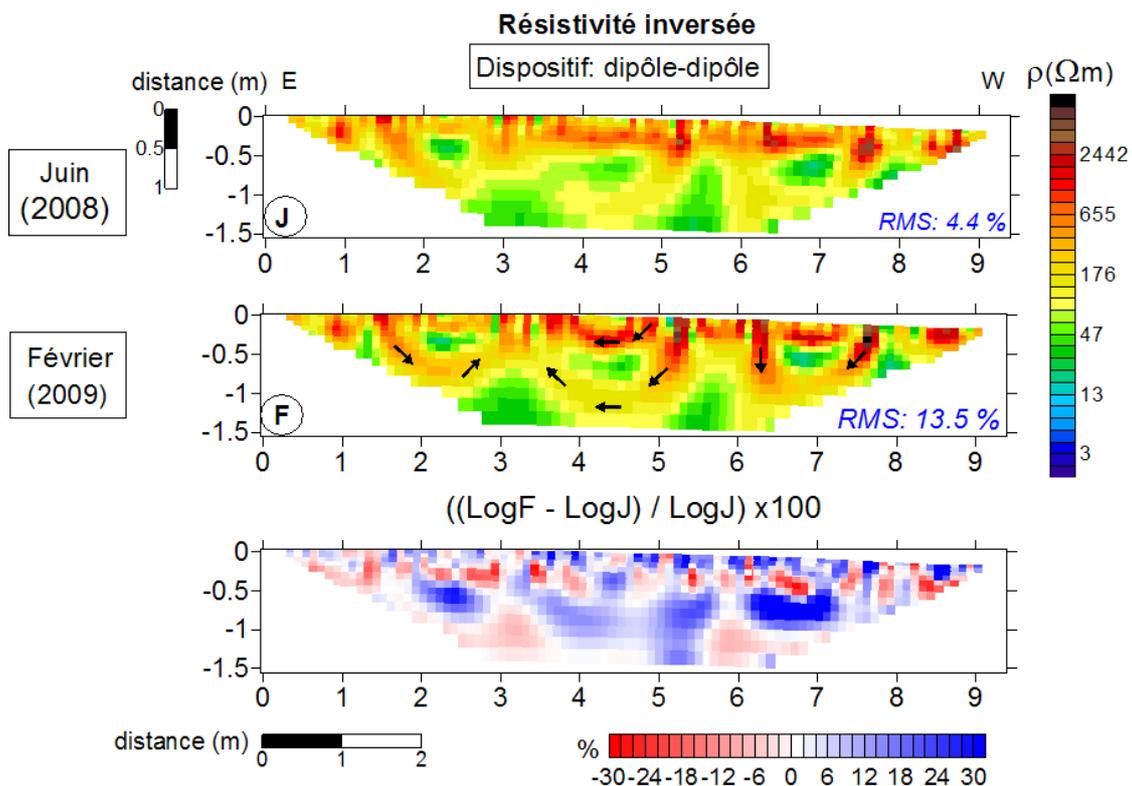


Figure II.101. Etude de l'impact des variations saisonnières d'hygrométrie sur la résistivité avec le dispositif dipôle-dipôle à partir du profil au radier de la galerie Est-96 (2 périodes d'acquisition : Juin 2008 - Février 2009).

Concernant les sections de résistivité inversée suivant les deux périodes :

Les sections de résistivité montrent des variations significatives de résistivité entre les deux périodes étudiées (période plus sèche en février par rapport à la période humide en juin). Ces variations s'organisent de manière complexe dans l'EDZ. Nous notons toutefois que les résistivités augmentent d'environ + 30 % en février dans la proche surface (les premières dizaines de cm). Une partie des variations de résistivité observées ne peuvent s'expliquer par un simple effet thermique. De juin 2008 à février 2009, la galerie Est-96 n'a vu sa température diminuer que de 4°C ce qui correspond d'après l'équation de Keller & Frischknecht (1966) à une augmentation de maximum 9 % de la résistivité en surface des parois de la galerie. Pour le reste des variations, la désaturation de la roche (perturbation hydrique) semble être le seul responsable de cette augmentation de résistivité en surface.

La complexité des variations observées en profondeur pourraient s'expliquer encore par le rôle des fractures néoformées (ouvertes à l'air de la galerie) : celles-ci vont accélérer le processus de désaturation de manière très localisée en profondeur, en formant un réseau de zones désaturées plus ou moins connectées. Les deux dispositifs (Wenner- α et dipôle-dipôle) sont capables de suivre cette évolution suivant différentes sensibilités. Les zones

conductrices (en vert) associées à des résistivités basses correspondent à une roche saturée probablement peu affectée par des fissures/fractures et le processus de désaturation associée.

Concernant les sections de chargeabilité inversée suivant les deux périodes :

Sur les sections de chargeabilité, nous retrouvons les réponses des fractures tectoniques remplies de calcite caractérisées par des chargeabilité élevées (indépendamment de la période d'acquisition). Cette réponse confirme la répétitivité de nos résultats. Les variations des chargeabilités sur le profil au radier du mois de juin à février sont beaucoup plus importantes (90 %) que les variations de résistivité (30 %).

Afin de comparer plus facilement le zonage en résistivité du mois de février et les variations de chargeabilité pour les deux périodes étudiées, nous proposons la **Figure II.102**. Sur cette figure, nous pouvons distinguer sur la section de différence les zones en rouge qui correspondent à une diminution de la chargeabilité en février. Il est intéressant de noter que ces diminutions de chargeabilité sont généralement corrélées à des zones de fortes résistivités en février, caractéristiques d'une désaturation (perturbation hydrique). Il existe ainsi une certaine cohérence spatiale des deux grandeurs physiques à suivre la désaturation. Cette observation rejoint le résultat original obtenu sur les parois verticales de la galerie Est-96 : un endommagement et/ou une perturbation hydrique associés à une désaturation induit une diminution des propriétés PP, chargeabilité et conductivité imaginaire (comparativement à celles de l'état non endommagé et/ou perturbé).

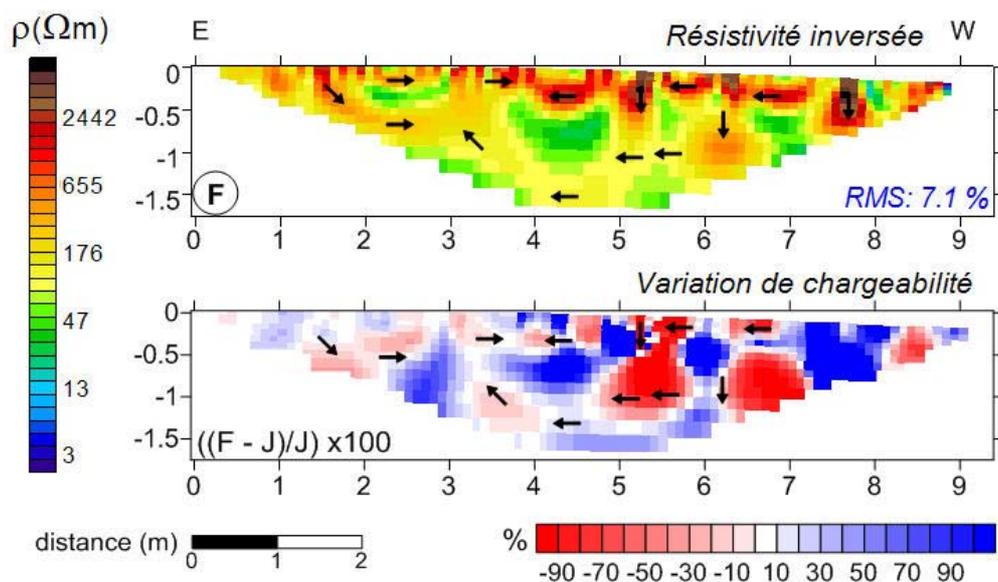


Figure II.102. Comparaison entre la section inversée de résistivité en février et la section de la variation de chargeabilité. Les zones en rouge indiquent la diminution des valeurs de chargeabilité en février. Les flèches en noir indiquent les zones désaturées probables.

2.12.1b. Inversion time lapse au radier (Res2DInv)

Afin d'étudier les résultats d'acquisition issus des prospections répétitives (à partir du même profil) et à des périodes différentes (monitoring), il existe deux méthodologies de traitement (d'inversion). La première consiste simplement à inverser les données saisonnières de manière classique comme présentées précédemment. Il s'agit tout d'abord d'effectuer l'inversion des valeurs de résistivité de juin et ensuite de celles acquises en février : ces deux inversions étant réalisées indépendamment. Ensuite la variation saisonnière des paramètres physiques de la roche (p.ex. la résistivité) est calculée à partir de l'équation II.6.

Pour le cas d'une inversion classique, il faut utiliser les mêmes paramètres d'inversion afin de respecter la même approche mathématique. Néanmoins, même si cette précaution est prise, cette approche souffre d'un inconvénient majeur : l'initialisation de deux inversions indépendantes avec Res2DInv se fait avec des modèles initiaux indépendants qui ne respectent pas nécessairement la chronologie de l'acquisition des données. Pour palier à cette difficulté, nous avons alors souvent recours à une deuxième méthode, i.e. la méthode par « time-lapse ». L'option « time-lapse », proposée par Res2DInv permet ainsi de faire une inversion de plusieurs données acquises à des périodes différentes en partant d'un même modèle initial. Dans cette section, une analyse méthodologique a été faite pour comparer l'apport de l'option « time-lapse » dans le cadre de cette étude. Pour ce travail, tous les jeux de données disponibles ont été traités. Dans les fichiers « time-lapse », il faut choisir un jeu de données comme modèle de référence. Les données issues de l'acquisition du mois de juin sont choisies comme modèle de référence car elles sont moins bruitées que celles du mois de février (période plus sèche). Lors de la préparation du fichier « time-lapse » (qui comprend les données de juin et de février), une stratégie est optée afin de contrôler l'initialisation des inversions. Cette stratégie consiste à répéter deux fois dans le fichier les données choisies comme référence (issues du mois de juin pour ce cas) et ensuite inclure les données des autres campagnes (février)⁽²⁾. Alors le logiciel démarre l'inversion à partir de la première série (les données de juin) pour un modèle de terrain homogène. Le modèle obtenu issu de la première itération de la première série est utilisé pour démarrer l'inversion de la deuxième série (toujours données de juin) et de la troisième série (données de février).

⁽²⁾ *Chiha, S., (2008) Etude d'un suivi temporel de résistivité électrique pour une couverture de sol du Nord Est Laos : Définition d'une méthodologie d'inversion, Rapport de stage, 57 p. (Encadrant : Henri Robain).*

Pour les deux méthodes d'inversion (inversion classique et inversion par « time-lapse »), les inversions sont faites :

- sans tenir compte des valeurs de chargeabilité (parce que le logiciel Res2DInv actuellement n'a pas intégré dans l'option time-lapse les données de type chargeabilité),
- en utilisant les mêmes paramètres d'inversion (**Tableau II.17**),
- en enlevant les niveaux bruités de façon à avoir exactement même échantillonnage spatial concernant les fichiers préparés pour l'inversion classique et ceux préparés pour l'inversion time-lapse. Les résultats sont présentés sur les **Figures II.103 et II.104**.

Tableau II.17. Paramètres d'inversion du profil au radier pour l'étude de deux méthodes d'inversion : inversion classique et inversion time-lapse.

Inversion method	Least-squares inversion	
Width of model cells	0.50 times the unit electrode spacing	
Finite mesh grid size	4 nodes	
Mesh refinement	Finer mesh	
Forward modelling calculation	Finite-elements (triangular elements)	
Number of iterations	4	
Include smoothing of model resistivity	----	
Limit range of model resistivity	Yes /Upper limit factor 20 (average resistivity)	
Jacobian matrix calculation	recalculated after each iteration	
Number of iteration to recalculate Jacobian matrix	4	
Fast calculation of Jacobian matrix	No	
Change layer thickness of layer		
Factor to increase layer thickness with depth	Factor to increase model depth range	
Modèles de l'inversion classique		
Wenner- α	1,10	1,0
Wenner-Schlumberger	1,10	1,0
Dipôle-Dipôle	1,10	1,0
Modèles de l'inversion time-lapse		
Wenner- α	1,10	1,0
Wenner-Schlumberger	1,10	1,0
Dipôle-Dipôle	1,10	1,0

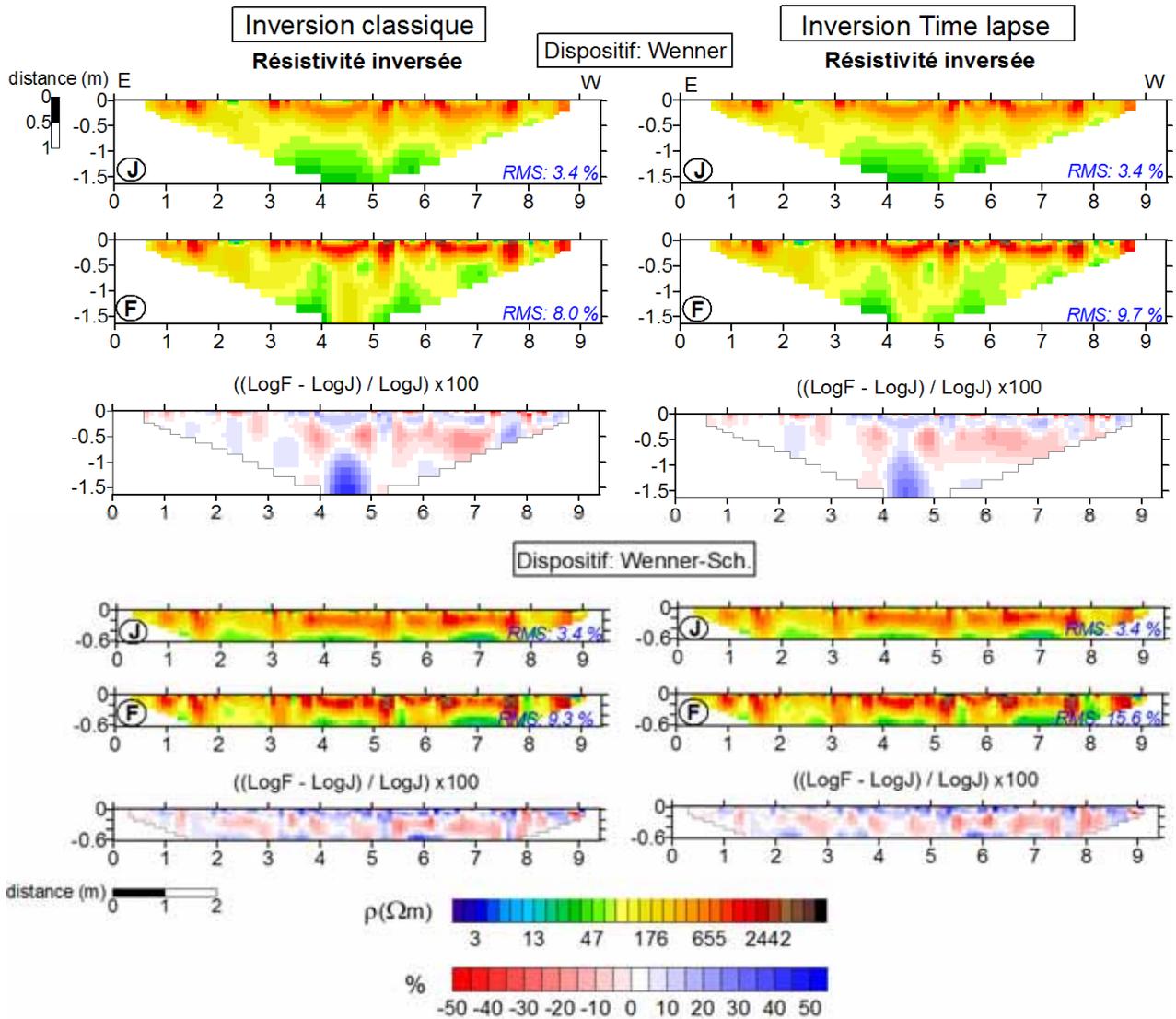


Figure II.103. Comparaison de deux méthodes d'inversion « inversion classique et inversion time-lapse » pour l'étude géoélectrique des variations saisonnières sur le profil au radier dans la galerie Est-96 (dispositifs utilisées : Wenner- α , Wenner-Schlumberger).

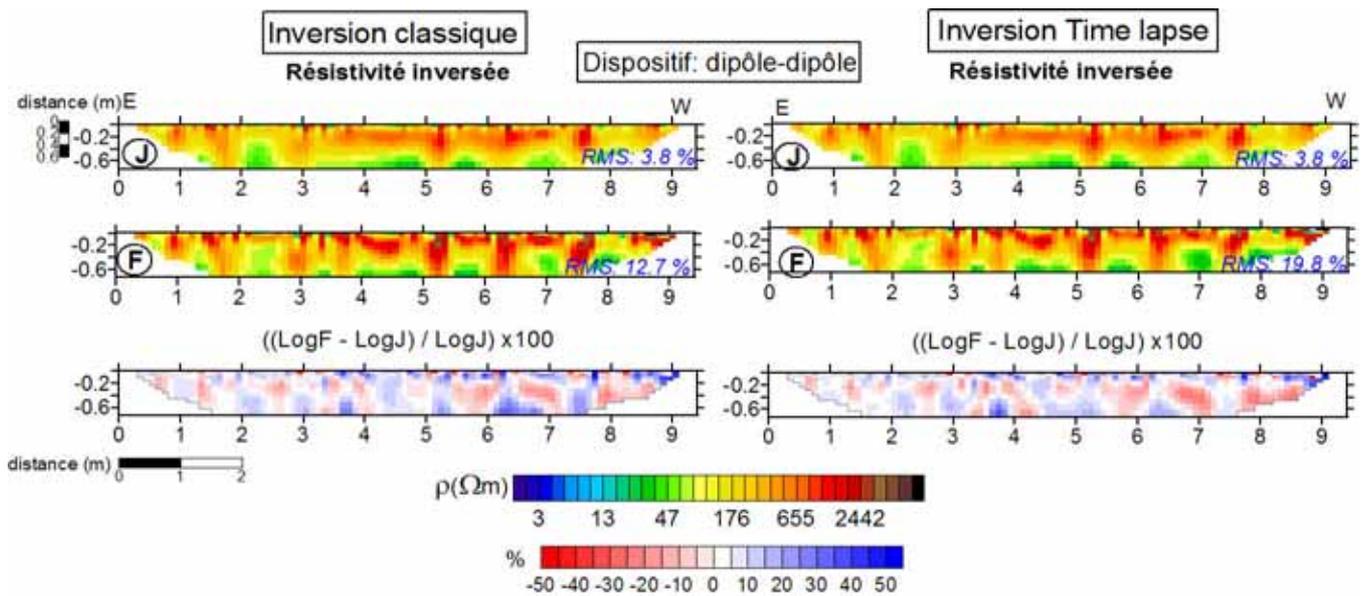


Figure II.104. Comparaison de deux méthodes d'inversion « inversion classique et inversion time-lapse » pour l'étude géoélectrique des variations saisonnières sur le profil au radier dans la galerie Est-96 (dispositif utilisé : dipôle-dipôle).

Cette étude nous permet de remarquer que les erreurs RMS calculées pour les sections de résistivité inversée issues des divers dispositifs sont plus importantes pour le cas de l'inversion avec l'option time-lapse. Ces erreurs RMS sont surtout élevées lorsque les données acquises en février sont considérées. Les sections de différence sur les **Figures II.103** et **II.104** montrent toutefois que les sections sont très comparables qualitativement pour les deux méthodes d'inversion.

2.12.2. Résultats des prospections PPT et résistivité électrique sur le profil en arc

❖ Pseudosections de résistivité et de chargeabilité

Les pseudosections du dispositif Wenner- α suivant les deux périodes d'acquisition montrent qualitativement une augmentation des résistivités au radier du profil en arc. Globalement, les variations de résistivité et de chargeabilité apparente sont au maximum de 20 % (en valeurs absolues).

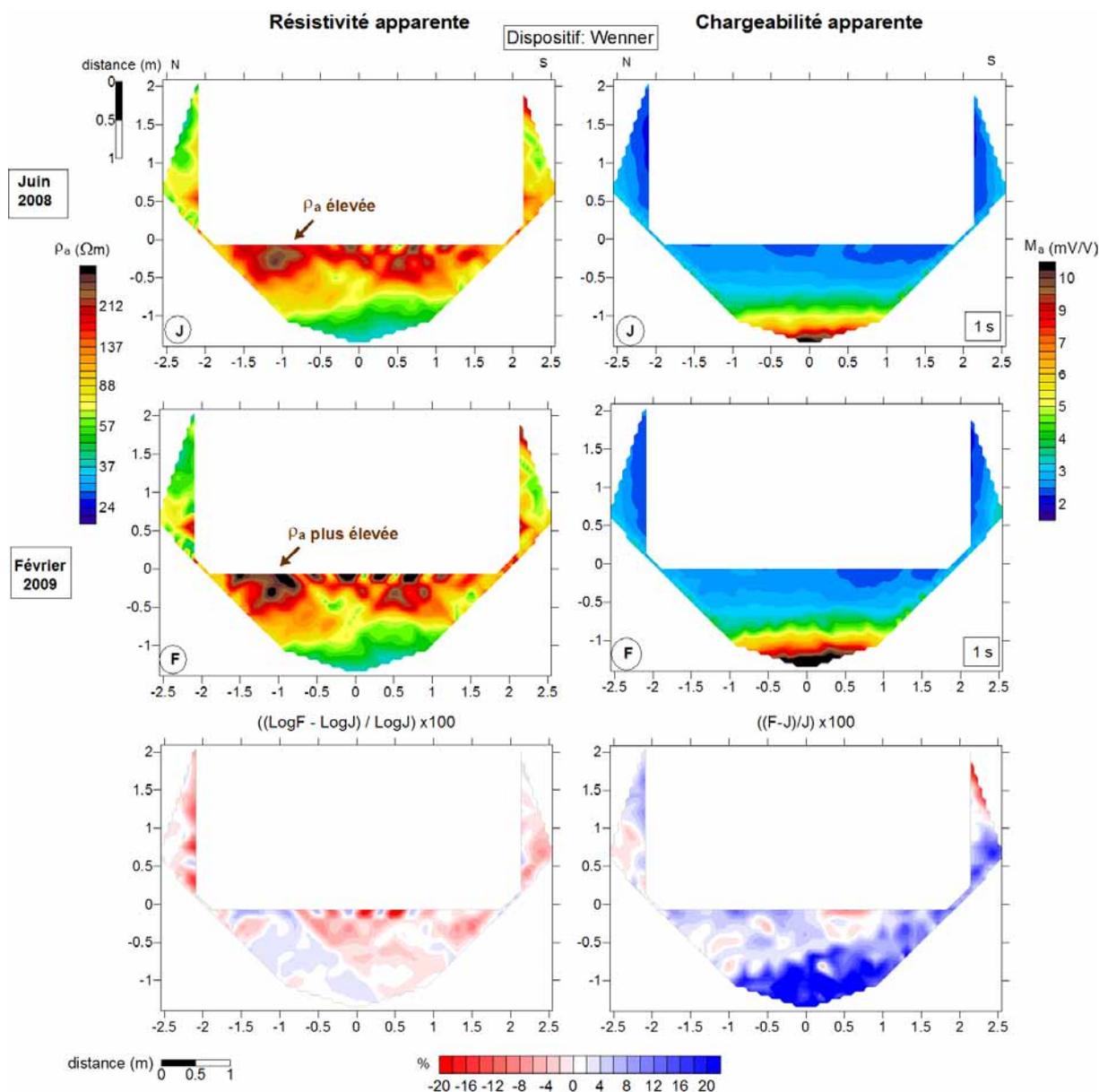


Figure II.105. Variation des résistivités et chargeabilités apparentes sur le profil en arc dans la galerie Est-96 pour les deux périodes de l'année (à 9 mois d'intervalle) : juin 2008 et février 2009 (dispositifs utilisés : Wenner- α , Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle ; créneau d'injection : 1 s). L'interpolation a été réalisée à partir du logiciel Surfer 8.0 avec un interpolateur de type « triangulation with linear interpolation ».

Nous présentons dans la suite (**Figures II.106 à II.109**) les sections de résistivité inversée suivant les deux périodes étudiées et pour les différentes parties du profil en arc (parois verticales et radier) avec la même stratégie que les acquisitions en arc menées précédemment. Les sections de différence sont également présentées pour chaque partie du profil en arc.

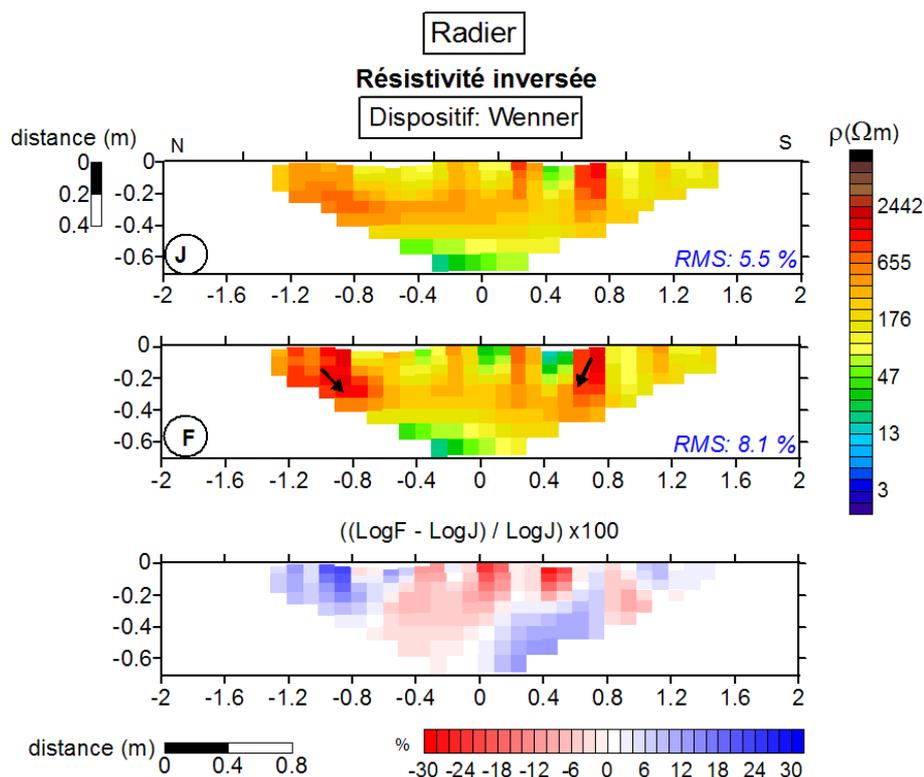


Figure II.106. Variations des résistivités inversées sur la partie au radier du profil en arc de la galerie Est-96 pour deux périodes de l'année (à 9 mois d'intervalle) : juin 2008 (J) et février 2009 (F) (*dispositif utilisé : Wenner- α*). Les flèches indiquent la direction de la désaturation probable.

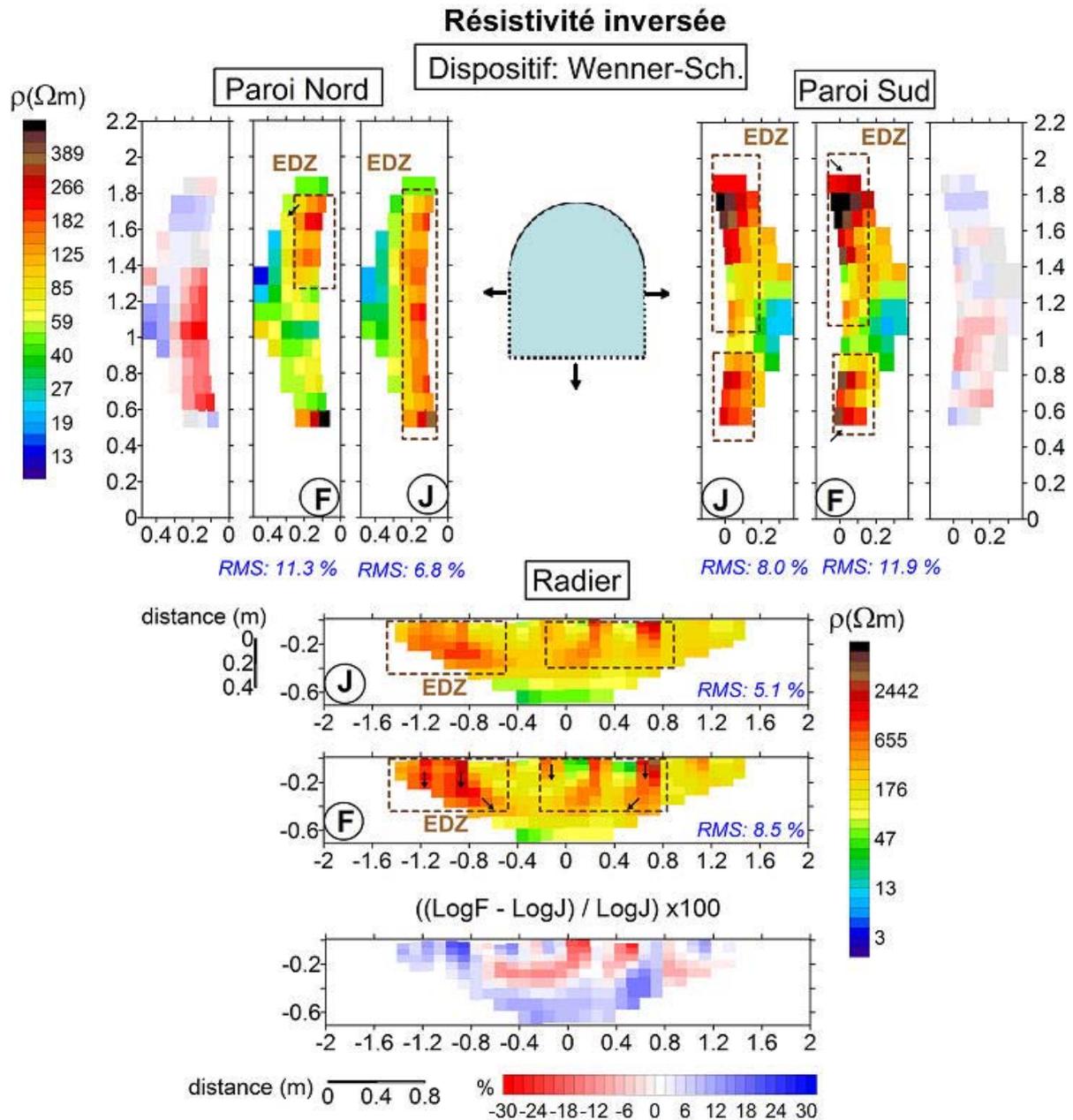


Figure II.107. Variations des résistivités inversées aux parois et au radier du profil en arc dans la galerie Est-96 pour deux périodes de l'année (à 9 mois d'intervalle) : juin 2008 (J) et février 2009 (F) (*dispositif utilisé : Wenner-Schlumberger*). Les flèches indiquent la direction de la désaturation probable.

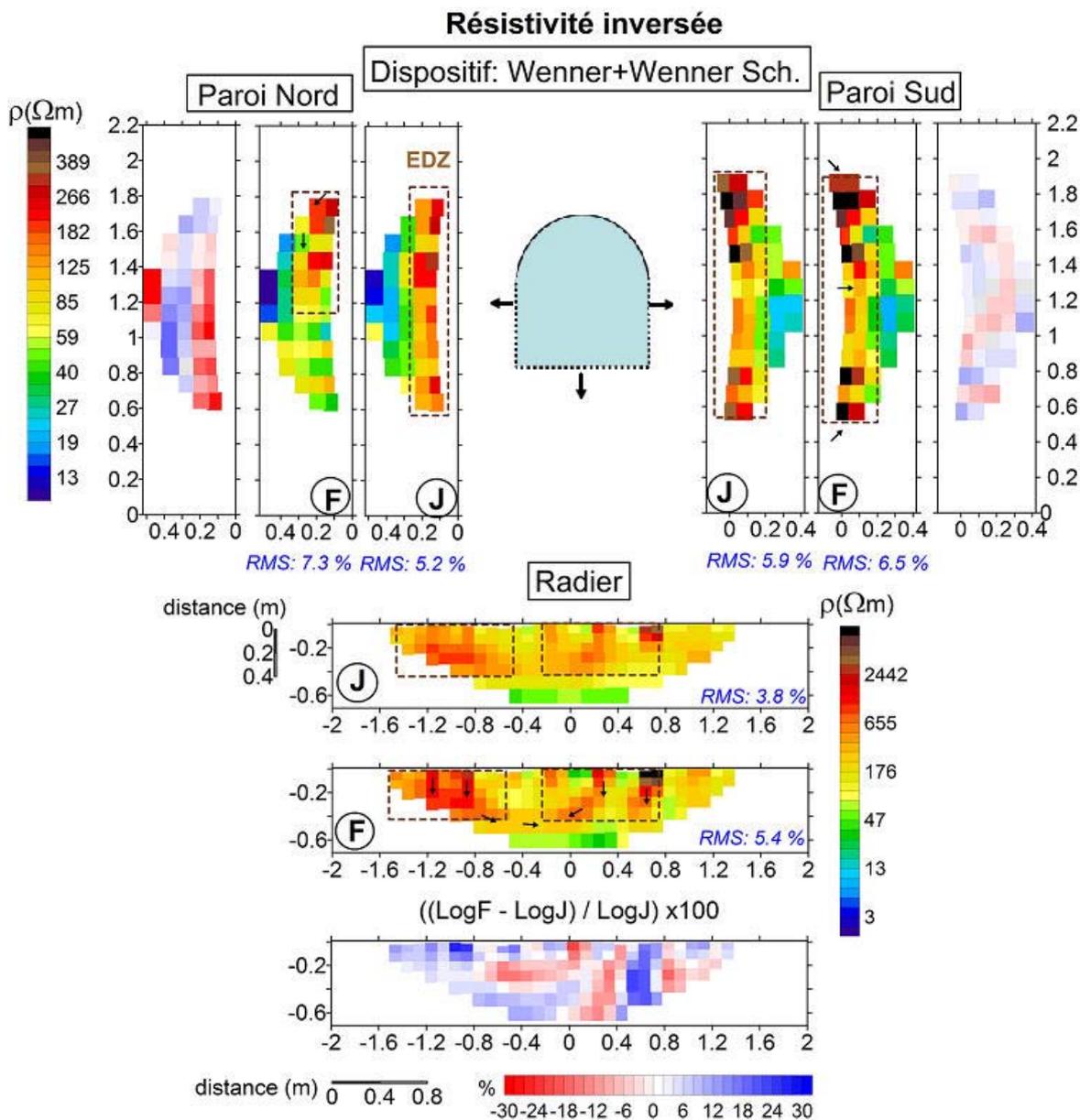


Figure II.108. Variations des résistivités inversées aux parois et au radier du profil en arc dans la galerie Est-96 pour deux périodes de l'année (à 9 mois d'intervalle) : juin 2008 (J) et février 2009 (F) (dispositif utilisé : Wenner- α et Wenner-Schlumberger). Les flèches indiquent la direction de la désaturation probable.

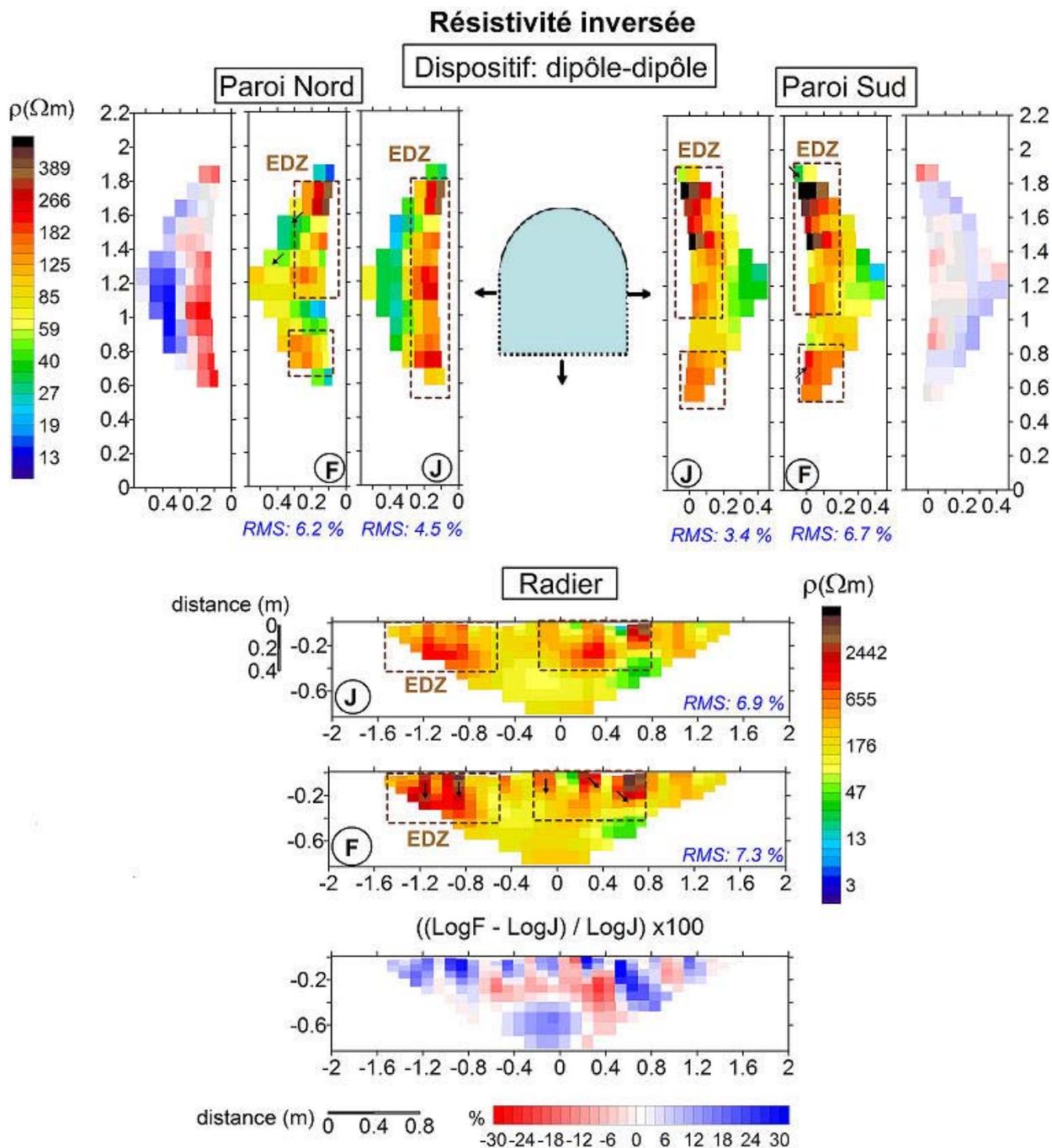


Figure II.109. Variations des résistivités inversées aux parois et au radier du profil en arc dans la galerie Est-96 pour deux périodes de l'année (à 9 mois d'intervalle) : juin 2008 (J) et février 2009 (F) (*dispositif utilisé : dipôle-dipôle*). Les flèches indiquent la direction de la désaturation probable.

Concernant les sections de résistivité pour le suivi temporel de l'EDZ :

Les variations de résistivité inversées sur l'ensemble du profil en arc est de maximum 30 % (en valeurs absolues). Les plus importantes variations suivant les deux périodes étudiées sont observées au radier du profil en arc par conséquent le radier semble subir une désaturation plus importante que les parois verticales.

Concernant les parois, la paroi Nord présente des variations de résistivité plus soulignées que la paroi Sud. En février, contrairement à ce qui était attendu, une couche de résistivités plus faibles qu'en juin est observée entre $y=0,6-1,4$ m (en rouge sur les sections de différence) sur la paroi Nord. L'ouverture de fissures encaissantes intervenant en hiver a-t-elle entraînée la fermeture de fissures préexistantes dans ce secteur et diminuée la résistivité de la roche ? Ou bien, est-ce que cette zone particulière du profil, pour une raison inconnue, aurait développée moins de fissures de désaturation (voir pas du tout) ? Il paraît difficile à ce stade d'avancer plus loin.

La désaturation ou un éventuel endommagement hydrique ne semble pas s'étendre au-delà de 60 cm de profondeur au niveau du radier. Les résultats des différents dispositifs utilisés sont cohérents entre eux et n'apportent pas d'informations complémentaires. Les résultats des sections de chargeabilité inversée suivant les deux périodes d'étude (pour les différents dispositifs électriques du profil en arc) peuvent être retrouvées sur les **Figures II.110 à II.112** suivantes.

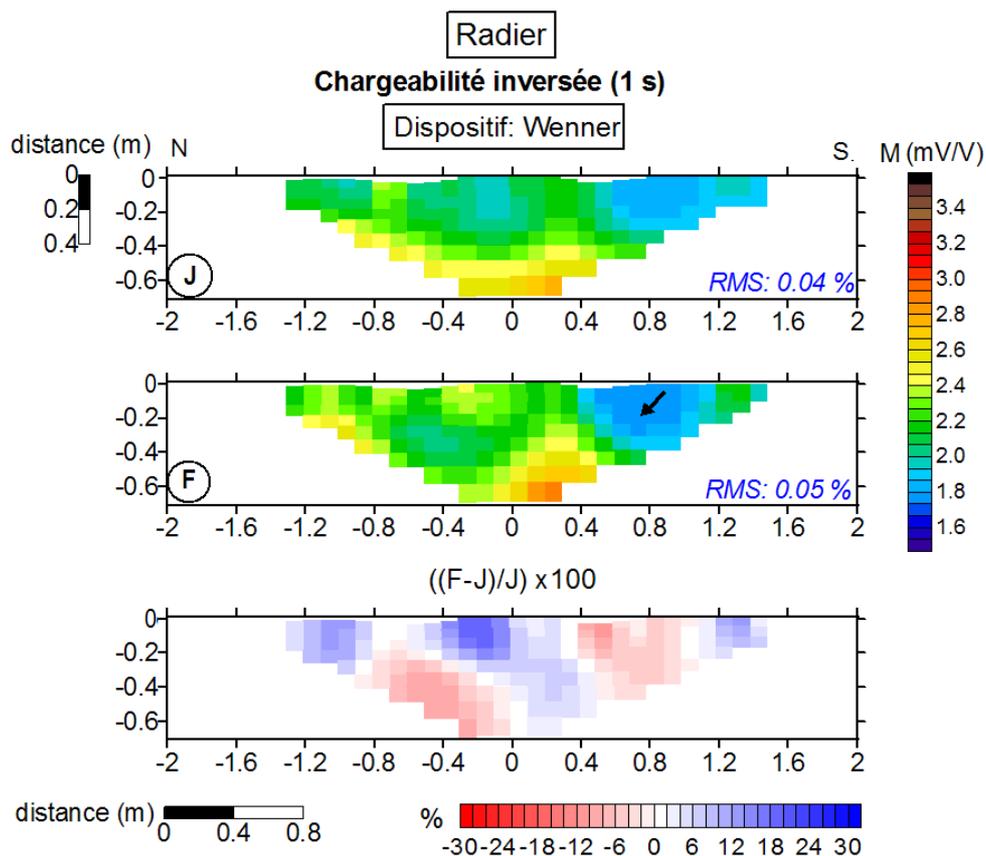


Figure II.110. Variations des chargeabilités inversées sur la partie au radier du profil en arc dans la galerie Est-96 pour deux périodes de l'année (à 9 mois d'intervalle) : juin 2008 (J) et février 2009 (F) (dispositif utilisé : Wenner- α). Les flèches indiquent la direction de la désaturation probable.

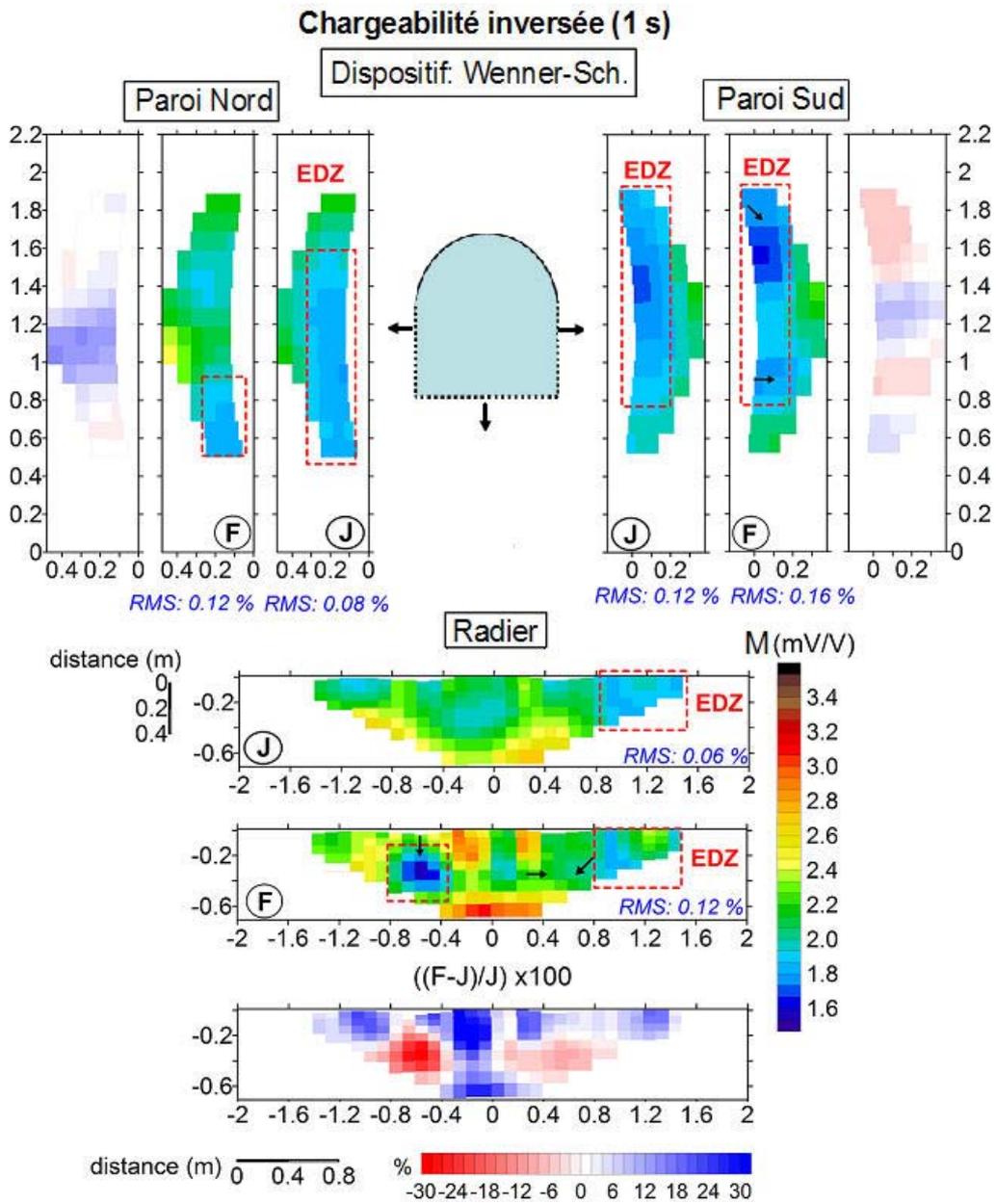


Figure II.111. Variations des chargeabilités inversées aux parois et au radier du profil en arc dans la galerie Est-96 pour deux périodes de l'année (à 9 mois d'intervalle): juin 2008 (J) et février 2009 (F) (dispositif utilisé : Wenner-Schlumberger). Les flèches indiquent la direction de la désaturation probable.

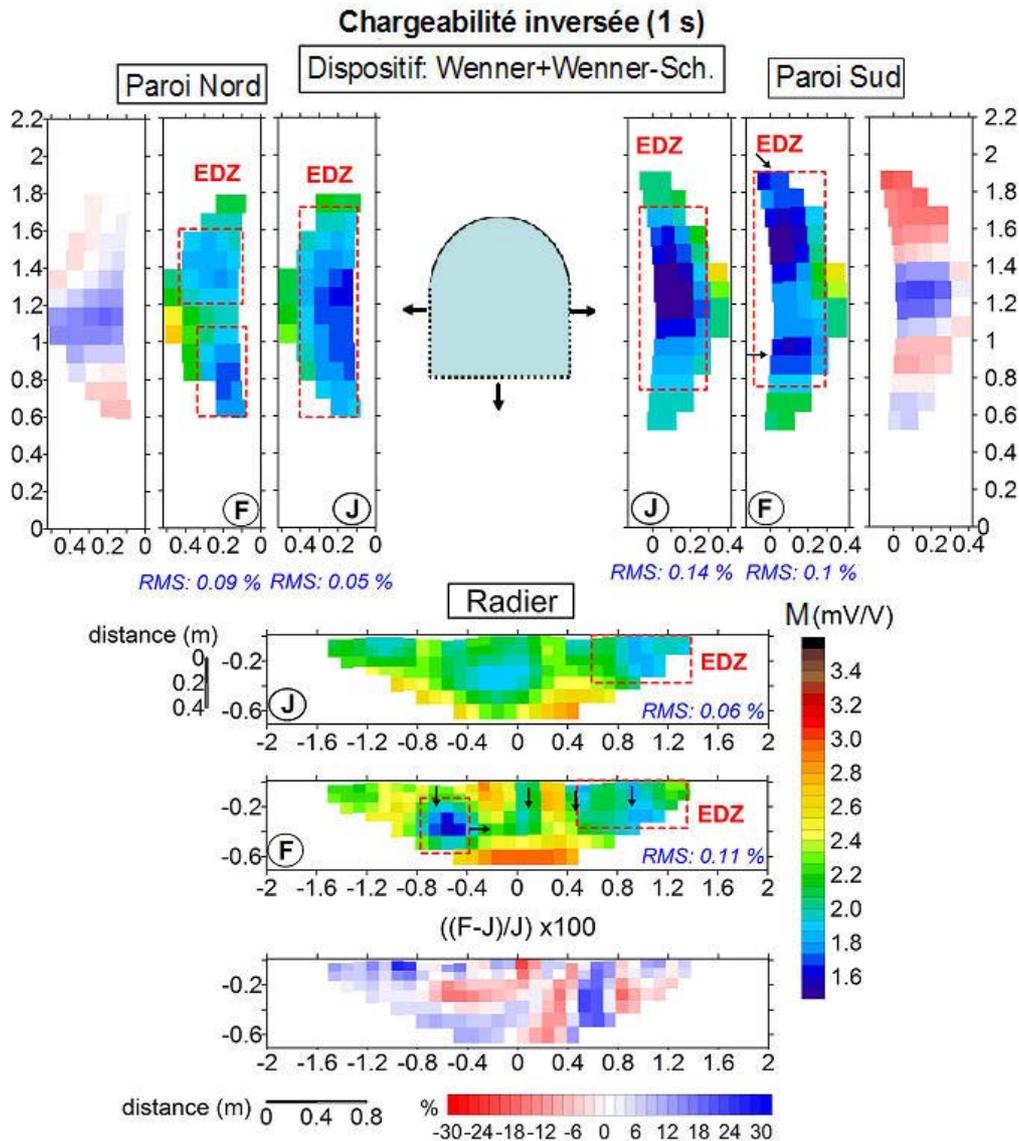


Figure II.112. Variations des chargeabilités inversées aux parois et au radier du profil en arc dans la galerie Est-96 pour deux périodes de l'année (à 9 mois d'intervalle): juin 2008 (J) et février 2009 (F) (dispositif utilisé : Wenner- α et Wenner-Schlumberger). Les flèches indiquent la direction de la désaturation probable.

Concernant les sections de chargeabilité pour le suivi temporel de l'EDZ :

Les variations de chargeabilité sont de l'ordre de 30 % au maximum similairement aux variations de résistivité. Conformément aux sections de résistivité, les variations les plus importantes de chargeabilité sont observées au radier du profil en arc. Ce constat signifie de nouveau une variation plus importante du degré de saturation (perturbation hydrique) plus élevé au niveau du radier.

En février, nous observons des variations de chargeabilité indiquant une augmentation ($\gamma=1$ m) où les sections de résistivité indiquaient une baisse de résistivité sur la paroi Nord. Est-ce que la fermeture de fracture(s), si elle a eu lieu, a permis à la roche d'éviter la perte d'eau dans cette zone (ce qui expliquerait la baisse de résistivité et l'augmentation de chargeabilité associée) ? Ou bien comme discuté précédemment, en l'absence de création de nouvelles fissures, la roche a été moins affectée dans ce secteur.

Quant à la paroi Sud, les variations de chargeabilité sont incohérentes entre deux dispositifs (Wenner-Schlumberger et Wenner- α +Wenner-Schlumberger). Le dispositif Wenner-Schlumberger présente très peu de variations (inférieures à 10 %) alors que l'inversion appliquée en associant les données des dispositifs Wenner- α et Wenner-Schlumberger indique des variations plus importantes de l'ordre de 20 %. En considérant que les sections rassemblées (avec deux dispositifs) soient plus représentatives au regard du nombre de données inversées (**Tableau II.11**), la variation spatiale des chargeabilités de la paroi Sud (section de différence, **Figure II.112**) peut être liée à l'organisation des fractures de désaturation.

2.13. Conclusion du suivi temporel

Concernant les deux profils étudiés (en arc et au radier), les variations des grandeurs électriques mesurées (résistivité et chargeabilité) suivant les deux périodes étudiées (juin 2008 et février 2009) résultent de la désaturation de la roche pouvant mener à (ou accompagnant) des perturbations hydriques au radier et un endommagement et/ou des perturbations hydriques aux parois verticales.

Le radier montre des variations des grandeurs électriques toujours plus importantes par rapport à celles mesurées sur les parois verticales. Nous expliquons cette différence de variations par une différence de durée et de surfaces d'exposition à la ventilation. Les fissures ouvertes néoformées au radier n'évoluant pas en fonction de la variation saisonnière de l'hygrométrie, elles vont subir plus longtemps la ventilation de la galerie et vont renforcer la désaturation de la roche en profondeur et donc la perturbation hydrique résultante.

Quant aux fractures de désaturation, puisqu'elles se referment en été, la désaturation en paroi est relativement ralentie et la roche est protégée de la perturbation hydrique en paroi verticale.

2.14. Conclusion sur les prospections géoélectriques menées à la station expérimentale de Tournemire

Un travail méthodologique important a permis d'appliquer avec succès la méthode PP dans trois galeries de la station expérimentale de Tournemire (galerie Est-96, galerie Nord-08 et galerie Est-03). Les résultats obtenus ont montré que les méthodes de type PP et résistivité sont efficaces pour caractériser en galerie l'amplitude et l'extension de l'EDZ. Ces méthodes électriques, avec une méthodologie spécifique que nous avons développée, ont également confirmé tout leur intérêt en présence d'un parement en béton (galerie Est-03).

Les données acquises et interprétées ont montré que l'EDZ se traduit systématiquement et pour toutes les galeries par des zones de résistivité élevées (typiquement supérieures à 100 $\Omega.m$) et le plus souvent, par des zones de faibles chargeabilités (quelques mV/V) et de faibles conductivités imaginaires. Elles ont également mis en évidence que l'organisation spatiale de l'EDZ étudiée est contrôlée par :

- L'âge de la galerie. D'après nos résultats, et à mode d'excavation égal, l'extension de l'EDZ est la plus importante pour la galerie la plus ancienne (galerie Est-96 avec une extension comprise entre 50 et 80 cm en profondeur sous le radier) et la moins importante pour la galerie la plus récente (galerie Nord-08). Cette dernière présente plutôt des endommagements localisés en surface du radier. L'EDZ pour la galerie avec radier bétonné (galerie Est-03) possède des caractéristiques intermédiaires ; elle présente une extension de l'ordre de 60 cm en profondeur (sous le radier bétonné) mais l'amplitude de son endommagement pourrait avoir toutefois été plus importante que celle de la galerie Est-96 (liée à la présence d'une faille secondaire). *Ainsi tous ces résultats soulignent que l'endommagement en paroi des galeries souterraines est un processus dynamique, i.e. qui évolue progressivement avec le temps.*
- La nature et l'orientation des fractures présentes. Les fractures néoformées *subverticales* d'origine mécanique, présentes uniquement sur les radiers, semblent avoir joué un rôle de chemins préférentiels de transport de l'air dans la roche en intensifiant ainsi la perturbation hydrique (par désaturation) du matériau. Cette action particulière de ces fractures permet ainsi d'expliquer pourquoi l'EDZ est plus développée sous le radier qu'au niveau des parois verticales comme l'attestent nos mesures. Les fractures de désaturation uniquement visibles sur les parois verticales des galeries et *subhorizontales* (parallèles aux plans stratigraphiques) sont commandées par l'hygrométrie de la galerie. Elles ont un rôle important dans l'évolution de l'EDZ des parois verticales. Ces fractures de désaturation qui peuvent

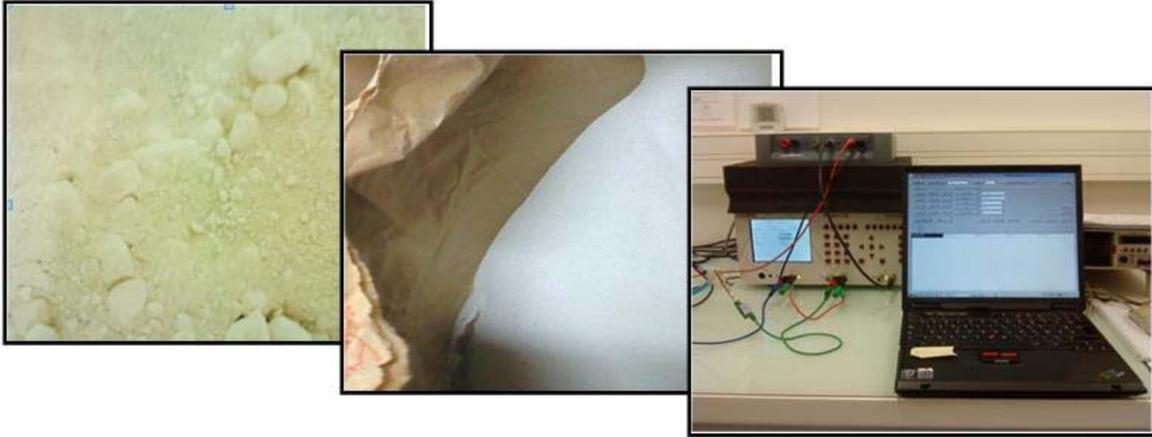
être détectées avec des petits dispositifs (espacement inter-électrodes de 10 cm) sont associées à une extension de l'endommagement dans la roche, aux parois verticales, de l'ordre de quelques décimètres.

Notre travail a également permis de montrer que la méthode PP était efficace pour la détection des hétérogénéités suivantes :

- *Les fractures tectoniques avec remplissage de pyrite* (résultat confirmé par analyse DRX et par la réalisation de petits profils localisés à l'échelle de ces fractures). Ce type d'hétérogénéités se manifeste par des valeurs élevées de résistivité et de chargeabilité.
- *Une densité élevée de fractures néoformées* (résultat confirmé par la réalisation de profils localisés à l'échelle de ces objets). Ce type d'hétérogénéités se manifeste par des valeurs élevées de résistivité et de valeurs faibles de chargeabilité. *La méthode PP permet donc de discriminer des fractures tectoniques des fractures d'origine purement mécanique* (fractures néoformées dans notre cas).
- *Les nodules calcaires* (et donc le banc associé) dans lesquels la présence de sulfures peut être attestée (résultat confirmé par analyse DRX et par la réalisation de profils localisés à l'échelle de ces nodules). Ce type d'hétérogénéité est peu visible en résistivité mais est bien mis en évidence par les mesures de chargeabilité.
- *Les zones associées à une perturbation et/ou à un endommagement hydrique*. Ces zones se traduisent par des valeurs de chargeabilité et de conductivité imaginaire plus faibles et de phase plus élevées que celles de la roche saine. Nous confirmons ainsi *in situ* les résultats antérieurs de [Cosenza et al. \(2007\)](#) ; [Ghorbani et al. \(2009\)](#) et [Jougnot et al. \(2010\)](#) obtenus au laboratoire.

Ce dernier point, original à nos yeux, mérite d'être approfondi afin de bien identifier les mécanismes de polarisation sous-jacents. Toutefois, pour avancer dans cette direction, il nous faut comprendre toute la phénoménologie PP dans le cas de milieux argileux plus simples (i.e. non perturbée d'un point de vue mécanique et hydrique). En effet, comme l'a souligné l'étude bibliographique du **chapitre 1**, cette compréhension, même pour les situations les plus simples, est loin d'être acquise aujourd'hui. Celle-ci doit passer par des expérimentations, menées au laboratoire, sur des systèmes contrôlés, comme ceux mis en jeu dans le prochain chapitre.

Caractérisation des hétérogénéités texturales et hydriques des géomatériaux argileux par la méthode de Polarisation Provoquée : Application à l'EDZ de la station expérimentale de Tournemire.



Chapitre 3. Applications au laboratoire : Propriétés électromagnétiques aux basses fréquences des échantillons argilo – sableux non-consolidés saturés

Introduction

L'objectif de cette thèse est d'étudier *in situ* les propriétés électriques et électromagnétiques aux basses fréquences d'une argilite hétérogène d'un point de vue hydrique (saturé-désaturé) et textural (phases minérales non argileuses, fissures). Néanmoins, lorsqu'il s'agit d'un milieu argileux et hétérogène, plusieurs mécanismes physiques de polarisation entrent en jeu et l'influence des différents paramètres physiques sur la réponse PP n'est pas complètement prévisible. Il est alors intéressant de mener en parallèle des mesures *in situ*, des mesures expérimentales en laboratoire à partir d'échantillons synthétiques permettant de contrôler ces paramètres. En outre comme l'a montré notre étude bibliographique, la contribution relative des différents mécanismes de polarisation mis en jeu dans un matériau argileux simple (i.e. saturé et sans hétérogénéité) est loin d'être totalement comprise.

Dans l'étude expérimentale menée en laboratoire que nous présentons dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux mesures de Polarisation Provoquée Spectrale (PPS) à partir d'échantillons argileux (i) non-consolidés et (ii) saturés en eau déminéralisée. La non-consolidation des échantillons a permis d'élaborer une mise en œuvre pratique au niveau de la préparation de ces derniers et d'approfondir les connaissances au niveau des argiles dites plastiques (argiles de surface) prévues pour les barrières des sites de stockage de surface. Les données dont nous disposons sont uniquement les réponses spectrales obtenues à partir d'échantillons en saturation complète. Nous avons fait varier la salinité de l'électrolyte afin d'étudier son influence sur les propriétés de conduction et de polarisation. La salinité de l'électrolyte a été obtenue avec du chlorure de sodium (NaCl).

Dans un premier temps, les études expérimentales ont été menées à partir d'échantillons purement argileux (100 %) saturés en eau déminéralisée. Dans un deuxième temps, la nature de l'argile a été modifiée pour étudier l'influence de la minéralogie de l'argile (*kaolinite*, *smectite*⁽¹⁾), Ensuite la saturation des échantillons a été assurée par des électrolytes de différentes concentrations. Enfin, pour étudier l'influence de l'hétérogénéité d'un échantillon argileux, la teneur volumique en argile a été modifiée (20 %, 5 %, 1 %) en introduisant un autre géomatériau dans le mélange : le sable. La littérature disponible tant à propos des résultats expérimentaux que théoriques et l'abondance de ce géomatériau ont orienté ce choix.

⁽¹⁾Dans la suite du manuscrit, au lieu d'utiliser le terme minéralogique « montmorillinite et/ou smectite » on parlera de « Bentonite » pour alléger l'écriture sauf pour les interprétations de DRX.

La première partie de ce chapitre décrit les études méthodologiques préliminaires. Ces études portent sur (1) les réponses spectrales des différents appareils de mesure à partir d'échantillons de référence (résistances pures), (2) le type de contact utilisé entre échantillon-électrode, (3) la taille de l'échantillon, (4) la relation avec la salinité de l'électrolyte, et elles s'intéressent aussi (5) à la cohérence des réponses spectrales des différents appareils de mesure à partir d'un échantillon argilo-sableux synthétique commun.

Dans la deuxième partie, nous présentons les mesures PPS réalisées à partir d'échantillons synthétiques argilo-sableux non-consolidés saturés pour une gamme de fréquences allant de [1mHz à 12kHz]. Nous nous intéressons à l'influence de la nature de l'argile, de la teneur en argile et de la salinité de l'électrolyte sur les phénomènes de conduction et de polarisation. Certains tests supplémentaires ont été aussi réalisés afin d'étudier ces caractéristiques sur un échantillon destructuré par un traitement thermique (chauffage à 150°C pendant deux jours) et après avoir modifié la taille des grains du sable utilisé (200-250 μm /300-400 μm). Nous présentons enfin les résultats des mesures expérimentales menées en laboratoire à partir des échantillons argilo-sableux non-consolidés saturés en eau déminéralisée ou salée.

3.1. Etudes méthodologiques préliminaires

Une étude approfondie en laboratoire des processus physico-chimiques dans les argiles passe tout d'abord par des mesures préliminaires des réponses spectrales des différents éléments utilisées lors des acquisitions. Ces éléments sont répartis en quatre catégories : (1) l'appareil de mesure, (2) le contact échantillon-électrode, (3) le porte-échantillon et (4) l'électrolyte.

1. Nous avons étudié le fonctionnement des différents appareils en fonction des différentes gammes de résistivité. Ces mesures sont réalisées à partir d'échantillons de référence dont des résistances pures. Ce type de mesure expérimentale à partir des échantillons de référence permet d'identifier les effets instrumentaux « parasites » intervenant dans le signal reçu dont les effets capacitifs ou inductifs. Néanmoins, l'effet inductif (couplage EM) est relativement moins important, voire négligeable, en laboratoire qu'*in situ*. En conséquence, nous nous intéressons plutôt aux probables effets capacitifs des appareils. Les appareils de mesure étudiés sont le SIP FUCHS II (SIP pour Spectral Induced Polarisation en anglais) (<http://www.radic-research.homepage.t-online.de/default.html>), le voltmètre vectoriel PSM1735 NumetriQ (<http://www.newtons4th.com/products/frequency-response-analyzers/psm1735>) et le SECR-1 (prototype développé au laboratoire UMR Sisyphé). Nous avons également procédé à des mesures sur le même échantillon synthétique avec ces trois appareils afin de comparer les réponses spectrales obtenues. Plus précisément, il s'agissait de déterminer la gamme de fréquence pour laquelle les réponses se superposaient et quelles étaient les limites basses ou hautes au-delà desquelles les réponses n'étaient plus cohérentes.
2. Pour le type de contact entre échantillon-électrolyte, nous nous sommes intéressés au couplage entre l'échantillon et le système d'acquisition donc aux « électrodes ». Un bon contact entre l'échantillon et les électrodes améliore le rapport signal/bruit. Ce volet expérimental a été mené au laboratoire du « Department of Chemical Engineering, Bioprocess Engineering Research Unit, Iron and Sulfur laboratory » à l'Université de Cape Town en Afrique du Sud dans le cadre des travaux de recherche concernant la réponse PPS menés sur des minerais de chalcocite. Cette problématique retrouve les mêmes questions méthodologiques sur la réponse PP des milieux complexes. En raison de leur performance satisfaisante à la fois *in situ* et en laboratoire, les électrodes de Cu/CuSO₄ ont été privilégiées lors de ces expériences. Les différents types de contacts comprennent (a) le contact direct des

électrodes Cu/CuSO₄ avec l'échantillon, (b) le contact assuré par une argile gonflante (bentonite) et (c) le contact assuré par une argile non-gonflante (produit commercial, noté ici « argile rouge »).

3. au niveau du porte-échantillon (de 30 cm de haut), nous présentons les réponses spectrales obtenues en fonction de la taille de l'échantillon i.e. pour trois hauteurs : 10 cm, 18 cm, 23 cm. L'échantillon utilisé lors de ces tests contenait de l'eau salée (de conductivité $\sigma_w = 0,5$ mS/cm ou $\sigma_w = 7,1$ mS/cm). Des eaux de faibles salinités ont été choisies parce que l'eau déminéralisée a une résistivité trop élevée. Cette étude a permis de valider un dispositif plus adapté en termes de hauteur de l'échantillon pour les expériences ultérieures.

3.1.1. Présentations générales des appareils de mesure

La **Figure III.1** montre les trois appareils utilisés au laboratoire.

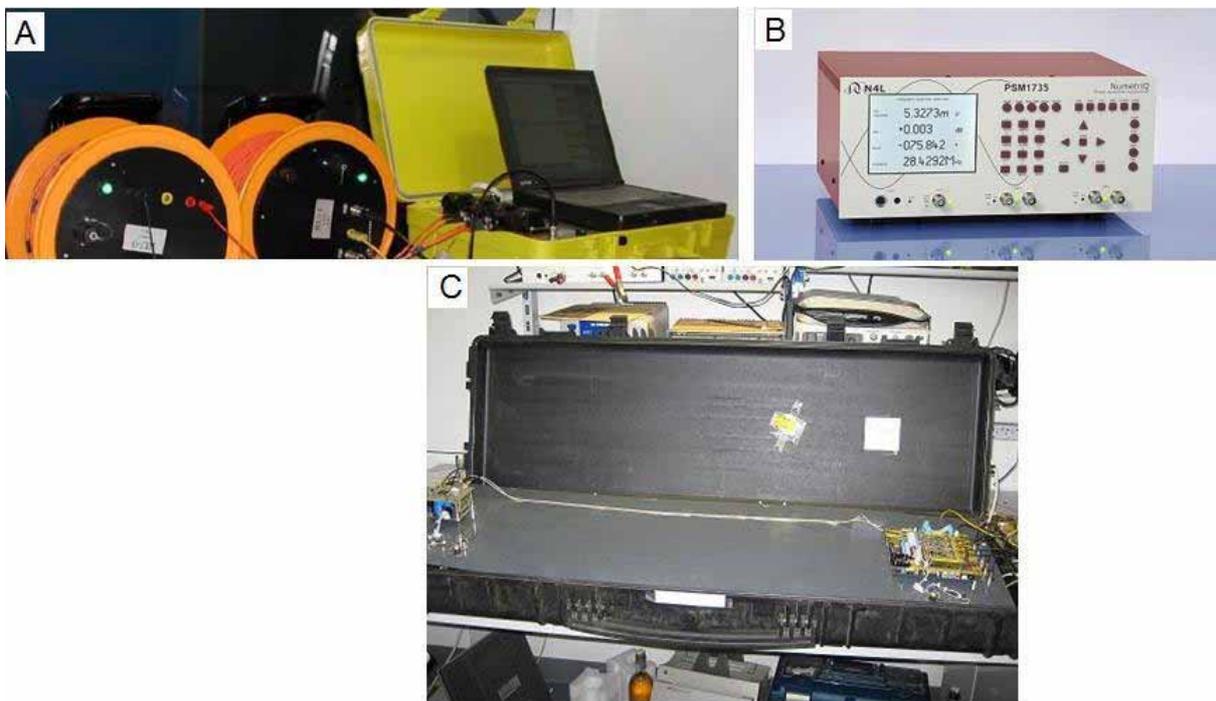


Figure III.1. Différents appareils de mesures utilisés lors des mesures en laboratoire : (A) le SIP FUCHS II, (B) le NumetriQ, (C) le SECR-1.

Le SIP FUCHS II⁽²⁾ a trois composants. Le premier composant consiste en deux types de bobines externes (*remote units*) : une bobine pour l'injection du courant alternatif (RU0) et une deuxième pour la mesure de la différence de potentiel (RU1). Le deuxième composant de l'appareil correspond au câblage. Il existe deux types de câblage : (i) en fibres optiques et (ii) coaxiaux avec prises BNC. Les câbles en fibre optique sont associés aux bobines d'injection et de mesure du potentiel. Ces types de câble tendent à réduire ou à éviter l'effet

de couplage EM entre le récepteur et l'émetteur. Ils permettent de communiquer avec l'unité de mesure (*troisième composant*). Les câbles avec BNC permettent de relier les électrodes d'injection et de mesure du potentiel aux bobines d'injection et de mesure du potentiel respectivement. Finalement, le troisième composant est l'unité de mesure elle-même (*base unit*, la boîte en jaune sur la **Figure III.1**). La mesure avec le SIP FUCHS débute par la fréquence la plus élevée : 12 kHz. Les fréquences intermédiaires jusqu'à la plus basse fréquence sont calculées à partir de la formule suivante : $12 \text{ kHz} / 2^N$. Les mesures sont répétées en fonction de la fréquence utilisée afin d'assurer un bon rapport signal/bruit. Le **Tableau III.1** présente les fréquences intermédiaires et les nombres de répétition par fréquence de mesure concernant le SIP FUCHS II.

Tableau III.1. Fréquences et répétitions des mesures utilisées par le SIP FUCHS II.

Fréquence (Hz)	Nombre de répétition
12000	32
6000	32
3000	32
1500	32
750	32
375	32
187,5	32
93,75	32
46,875	32
23,4375	32
11,71875	32
5,859375	32
2,929687	32
1,464844	32
0,732422	24
0,366211	24
0,183105	16
0,091553	22
0,045776	23
0,022888	8
0,011444	4
0,005722	4
0,002861	4
0,001431	4

Le SIP FUCHS calcule l'écart type obtenu à partir des n répétitions correspondant à chaque fréquence (le nombre n de répétition étant donné dans le **Tableau III.1**).

⁽²⁾ Pour alléger la lecture, dans la suite, on parlera du « SIP FUCHS » au lieu de SIP FUCHS II.

Dans l'appareil NumetriQ, les composants d'injection de courant et de mesure de la différence de potentiel se trouvent à l'intérieur de l'appareil puisque contrairement au SIP FUCHS, il est conçu pour les mesures en laboratoire : c'est typiquement ce type d'appareil qui est utilisé pour la spectroscopie diélectrique ou l'impédancemétrie en physico-chimie. Au niveau du câblage, les connexions se font à partir de câbles BNC. Le NumetriQ dispose de plusieurs modes d'acquisition. Nous avons utilisé le mode analyseur de réponse en fréquence (*frequency response analyser*) permettant de mesurer l'amplitude et la phase de la résistivité complexe dans chaque gamme de fréquence. Ce mode offre la possibilité de balayer toute une gamme de fréquence grâce au menu « sweep ». Il est également possible de procéder à l'acquisition à une fréquence fixe en répétant la mesure à cette fréquence le nombre de fois souhaité. La gamme de fréquence de mesure proposée par NumetriQ va de 10 μ Hz à 35 MHz. Le pas d'échantillonnage entre les fréquences est calculé suivant une échelle logarithmique lorsqu'il s'agit du mode d'acquisition « sweep » (i.e. **Tableau III.6 et III.7**).

Dans l'appareil de mesure SECR-1, prototype développé au sein du laboratoire Sisyphe, les composants responsables de l'injection de courant et de la mesure de tension se trouvent également à l'intérieur de l'appareil comme pour le NumetriQ. On a donc toujours la même configuration en termes de distance entre « émetteur-récepteur » et toutes les mesures se font *a priori* dans les mêmes conditions. La distance entre les unités d'injection et de mesure de différence de potentiel est de 1 m par conception afin de bien les isoler l'un de l'autre. Les câbles en fibre optique assurent la synchronisation de la mesure tout en limitant le couplage. A l'extérieur, les câbles BNC assurent la connexion entre l'appareil et les électrodes. Le SECR-1 permet la mesure de l'amplitude et de la phase de la résistivité complexe entre [1,86 mHz-31,25 kHz]. Le **Tableau III.2** synthétise les caractéristiques des différents appareils.

Tableau III.2. Caractéristiques techniques des différents appareils de mesure utilisés.

Caractéristique de SIP FUCHS II	
Gamme de fréquence	1,4 mHz - 12 kHz
Pas d'échantillonnage	12 kHz / 2^N (N=0, 1, 2...)
Précision de phase	+/- 1 mrad > 6 kHz +/- 0,5 mrad < 6 kHz
Maximum voltage d'entrée	± 10 V pick

Caractéristique du NumetriQ PSM1735 (analyseur de réponse en fréquence)	
Gamme de fréquence	10 μ Hz - 35 MHz
Pas d'échantillonnage	logarithmique
Précision d'amplitude	0,01 dB + 0.001 dB/kHz < 1 MHz 0,1 dB + 0.04 dB/MHz < 35 MHz
Précision de phase	0,34 mrad < 10 kHz

	0,87 mrad + 0,0017 mrad/kHz < 35 MHz
Maximum voltage d'entrée	± 10 V pick

Caractéristique du SECR-1 (prototype de résistivimètre fréquentiel)	
Gamme de fréquence	1,86 mHz – 31,25 kHz
Maximum voltage d'entrée	± 200 V pick

3.1.2. Etude au niveau des appareils de mesure : effet instrumental

L'effet instrumental a été étudié à partir d'échantillons de référence de type « résistance pure » pour une gamme de fréquence de mesure de [0,1 Hz à 12 kHz]. Les ordres de grandeurs des résistances pures sont choisis de manière à couvrir une gamme plus large que celle des échantillons (i.e. 1 Ω à 10 kΩ). Les résultats sont présentés à partir des spectres d'amplitude (Ω) et de la phase conventionnelle⁽³⁾ (*phase négative*). Une mesure spectrale à partir d'une résistance pure donne une réponse à spectre plat avec la bonne valeur d'amplitude. Le spectre de phase aussi est un spectre plat indiquant zéro comme valeur (*puisque l'échantillon est composé d'une résistance pure donc sans capacité*). Si le spectre de phase n'est pas plat, on est en face d'un effet instrumental parasite associé à l'appareil de mesure. Sur le spectre de phase, l'effet instrumental peut être observé dans les deux sens en fonction de la valeur de résistance. Soit par « *une montée* » de la courbe vers les valeurs positives, soit par « *une chute* » de la courbe vers les valeurs négatives. Nous étudions dans la suite le comportement de chaque appareil en fonction des différentes gammes de résistance. Le **Tableau III.3** ci-dessous résume les valeurs de résistances utilisées pour chaque appareil de mesure.

Tableau III.3. Gamme des résistances pures utilisées pour le SIP FUCHS, le NumetriQ et le SECR-1.

SIP FUCHS	NumetriQ	SECR-1
1 Ω	1 Ω	---
5 Ω	10 Ω	5,1 Ω
15 Ω	15 Ω	---
30 Ω	30 Ω	---
433 Ω	100 Ω , 221 Ω , 681 Ω	100 kΩ , 200 kΩ , 511 Ω
1 kΩ	1 kΩ	1 kΩ
5 kΩ	5 kΩ	---
10 kΩ	10 kΩ	---

⁽³⁾Dans la suite de manuscrit, nous nous intéressons toujours à la phase conventionnelle donc la phase négative. Pour alléger la lecture, on l'appellera simplement la phase.

Afin de faciliter la suite de la lecture, certaines valeurs dans les **Tableaux III.4-7** sont colorées en gris afin de mieux les associer aux interprétations correspondantes.

3.1.2a. SIP FUCHS II

Les **Figures III.2-3** présentent les résultats des mesures PPS effectuées par le SIP FUCHS avec des résistances pures. Les résultats affichés sur le spectre de phase (**Figure III.2**) et au **Tableau III.4** montrent des *chutes de phase* lorsqu'il s'agit des résistances faibles ($R = 1 \Omega, 5 \Omega, 15 \Omega, 30 \Omega, 433 \Omega$). Plus la valeur de la résistance mesurée est basse, moins le spectre de phase est plat donc l'effet instrumental marqué par une chute. La plus importante est obtenue pour la valeur la plus conductrice (1Ω) où le déphasage atteint [30 mrad] en valeur absolue (12 kHz). Avec la même résistance, à 93,75 Hz, cet effet est négligeable, de l'ordre de [0,4 mrad] en valeur absolue (**Tableau III.4**). Ces chutes de phase sur la réponse obtenue sont liées à un problème connu en électronique appelée « *réjection du mode commun* » (en anglais : *common mode rejection problem*). Ce problème est associé au rejet par l'amplificateur différentiel de la tension commune aux deux entrées. Nous n'allons pas le détailler techniquement, mais dans la suite, nous étudierons pour quelle gamme de résistance ce problème apparait et quelles sont les fréquences limites à respecter pour que la mesure soit peu affectée par cet effet. Cette expérience montre l'intérêt des fréquences basses (i.e. 93,75 Hz) lorsqu'il s'agit d'échantillons très conducteurs. Nous pouvons aussi conclure que 1Ω constitue la limite minimale que le SIP FUCHS peut mesurer.

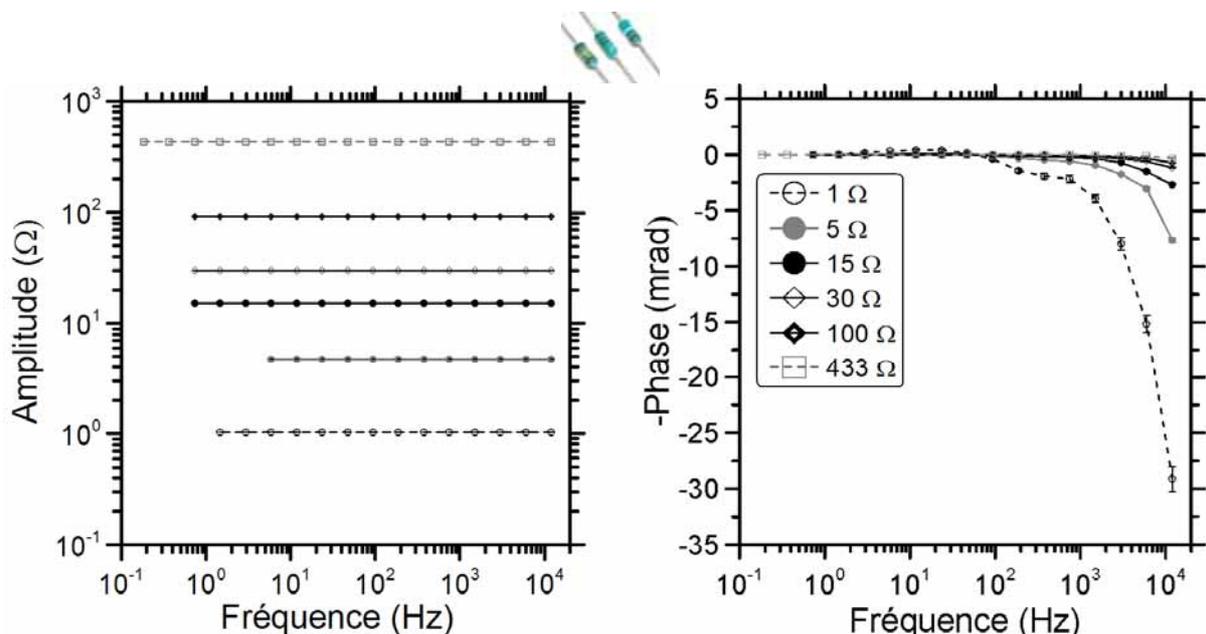


Figure III.2. Spectre de l'amplitude de résistivité complexe (Ω) et de phase (mrad) pour des résistances pures de $R = 1 \Omega, 5 \Omega, 15 \Omega, 30 \Omega, 100 \Omega, 433 \Omega$ mesurées par le SIP FUCHS (les barres d'erreur affichées sont calculées par le SIP FUCHS et elles ne sont pas significatives).

Tableau III.4. Valeurs des déphasages (mrad) obtenues à partir des mesures PPS effectuées sur des résistances pures ($R = 1 \Omega, 5 \Omega, 15 \Omega, 30 \Omega, 100 \Omega, 433 \Omega$) par le SIP FUCHS.

Fréquence (Hz)	-Phase (mrad)					
	1 Ω	5 Ω	15 Ω	30 Ω	100 Ω	433 Ω
12000	-29,13	-7,66	-2,70	-1,17	-0,73	-0,30
6000	-15,19	-3,04	-1,53	-0,59	-0,34	-0,14
3000	-7,98	-1,74	-0,72	-0,36	-0,19	-0,11
1500	-3,93	-0,93	-0,35	-0,17	-0,11	-0,05
750	-2,17	-0,59	-0,23	-0,09	-0,06	-0,02
375	-1,92	-0,47	-0,17	-0,08	-0,04	-0,01
187,5	-1,42	-0,31	-0,13	-0,06	-0,02	0,01
93,75	-0,40	-0,14	-0,07	-0,03	-0,01	0,01

Etudions maintenant la **Figure III.3** qui présente les spectres d'amplitude et de phase obtenus à partir d'une gamme de résistance plus importante.

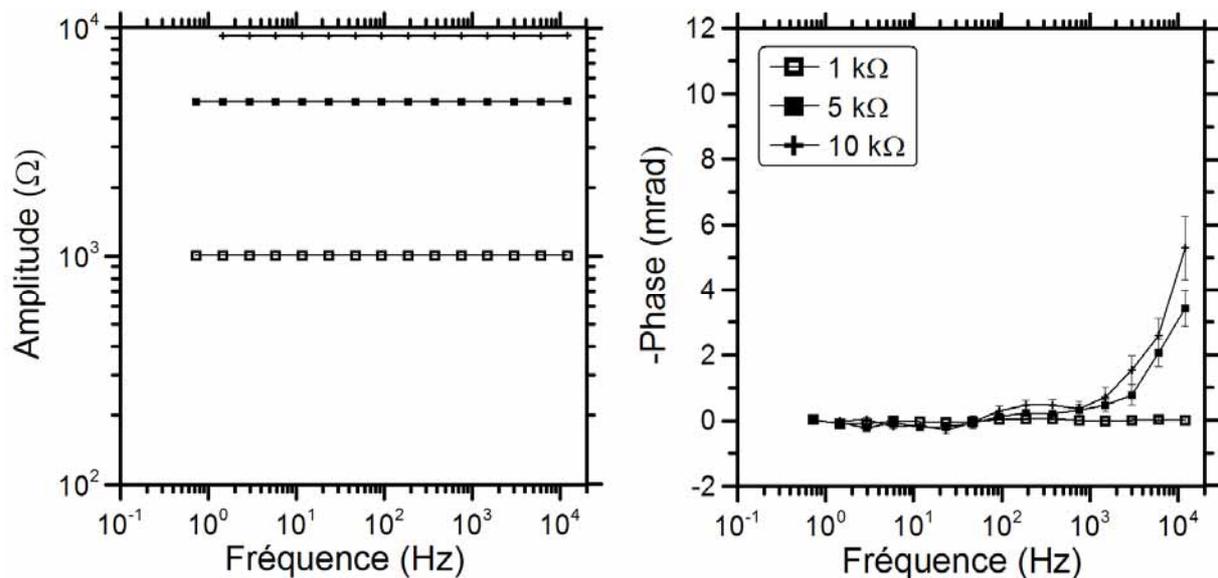


Figure III.3. Spectre de l'amplitude de résistivité complexe (Ω) et de phase (mrad) pour des résistances pures de $R = 1 \text{ k}\Omega, 5 \text{ k}\Omega, 10 \text{ k}\Omega$ mesurées par le SIP FUCHS (les barres d'erreur affichées sont calculées par le SIP FUCHS).

Lors qu'il s'agit de résistance élevée, de l'ordre du $\text{k}\Omega$ ou plus, le comportement du spectre de phase change. Nous observons *une montée* des courbes de phase. Le **Tableau III.5** synthétise les déphasages obtenus concernant les résistances pures de $R = 1 \text{ k}\Omega, 5 \text{ k}\Omega$ et $10 \text{ k}\Omega$. *La montée* des valeurs de phase la plus importante correspond à la résistance pure la plus résistante ($R = 10 \text{ k}\Omega$). Dans ce cas l'effet instrumental maximum obtenu est de [5,3 mrad] (12 kHz). *La montée* des valeurs de phase peut être expliquée par « l'effet RC » où intervient la résistance de contact (entre « électrodes-échantillon ») et la capacité d'entrée de l'appareil de mesure. Afin d'éviter ce problème, les résistances de contact doivent être limitées et la capacité d'entrée de l'appareil de mesure doit être minimale. Néanmoins, en termes d'électronique, il n'est pas évident de disposer d'appareils

de mesure à capacité très faible (elles sont souvent de l'ordre de 30 pF). En résumé, le problème de l'effet RC, fonction de la résistance de contact et de la capacité d'entrée de l'appareil, sera d'autant plus marqué que la fréquence sera élevée. En laboratoire, ni la résistivité (ou résistance) des échantillons ni les résistances de contact n'atteignent des valeurs très importantes et elles sont en général inférieures à 1 k Ω . Nous remarquons grâce au **Tableau III.5** que les déphasages obtenus pour 1 k Ω sont de l'ordre de [0,01-0,05 mrad] en valeur absolue (93,75 Hz-12 kHz) et peu gênants.

Tableau III.5. Valeurs des déphasages (mrad) obtenues à partir des mesures PPS effectuées sur des résistances pures ($R = 1 \text{ k}\Omega$, $5 \text{ k}\Omega$, $10 \text{ k}\Omega$) par le SIP FUCHS.

Fréquence (Hz)	-Phase (mrad)		
	1 k Ω	5 k Ω	10 k Ω
12000	0,01	3,43	5,29
6000	0,03	2,07	2,58
3000	0,01	0,78	1,54
1500	0,00	0,46	0,71
750	0,00	0,32	0,37
375	0,05	0,20	0,47
187,5	0,05	0,22	0,46
93,75	0,03	0,13	0,29

En conclusion, pour les résistances basses (i.e. 1 Ω), la réponse mesurée par le SIP FUCHS est affectée par l'effet instrumental lié au problème de *réjection du mode commun* qui produit un déphasage de [0,4 mrad] à 100 Hz. Ce déphasage est amplifié aux hautes fréquences. En conséquence, nous proposons de nous limiter aux basses fréquences (i.e. 100 Hz) pour les mesures expérimentales ultérieures. Les tests effectués à partir des résistances pures élevées indiquent que l'effet instrumental lié à *l'effet RC* est important lorsque la résistance mesurée est importante (i.e. 10 k Ω). En dessous de cette gamme (i.e. 1 k Ω), cet effet semble être négligeable (0,01-0,05 mrad) même à hautes fréquences.

3.1.2b. PSM1735 NumetriQ

Les **Figures III.4-5** présentent les résultats des mesures PPS effectuées grâce au NumetriQ à partir des résistances pures. Les courbes n'affichent pas de barres d'erreur du fait de l'acquisition en mode « sweep » où les barres d'erreur de mesure ne sont pas accessibles. Les mesures n'ont pas non plus été répétées plusieurs fois.

Pour les basses résistances (**Figure III.4**), nous observons que les réponses du NumetriQ sont un peu différentes de celles du SIP FUCHS dans la gamme des basses résistances (1 Ω à 221 Ω). Le signal reçu au niveau de 1 Ω , est affecté par l'effet instrumental lié à la *réjection du mode commun* comme avec le SIP FUCHS (*chutes de la phase*). Le déphasage maximum mesuré avec la résistance la plus conductrice est de [4,1

mrاد] en valeur absolue (10 kHz) (**Tableau III.6**). Les fréquences plus basses (i.e. 187,41 Hz) affichent des déphasages non affectés par cet effet avec une légère incertitude de mesure (0,12 mrad). Ceci confirme l'intérêt des basses fréquences pour les échantillons conducteurs. La *montée* de la phase, à 2016,5 Hz est de [0,29 mrad] avec la résistance de 15 Ω et elle prend la valeur maximale [0,87 mrad] avec 221 Ω (**Tableau III.6**). Ces ordres de grandeur de déphasage parasite sont acceptables en termes de performance de l'appareil.

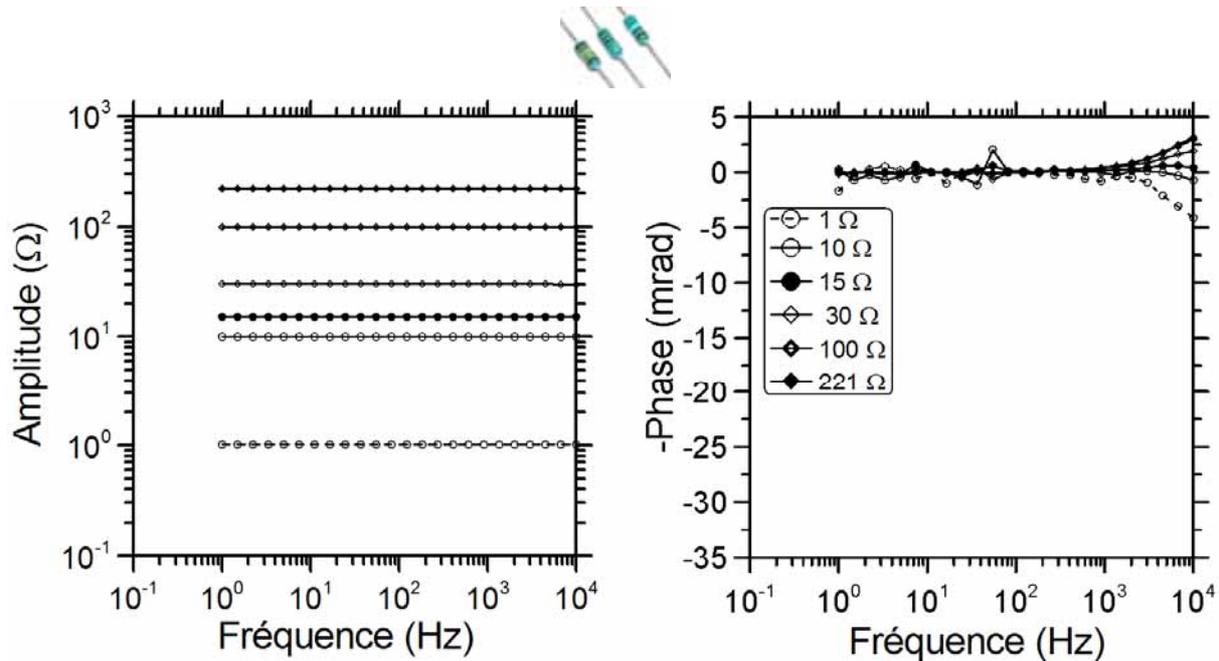


Figure III.4. Spectre de l'amplitude de résistivité complexe (Ω) et de phase (mrad) pour des résistances pures de l'ordre de $R = 1 \Omega, 10 \Omega, 15 \Omega, 30 \Omega, 100 \Omega, 221 \Omega$ mesurées par le NumetriQ.

Tableau III.6. Valeurs des phases (mrad) obtenues lors de mesures PPS effectuées sur des résistances pures ($R = 1 \Omega, 10 \Omega, 15 \Omega, 30 \Omega, 100 \Omega, 221 \Omega$) par le NumetriQ.

Fréquence (Hz)	-Phase (mrad)					
	1 Ω	10 Ω	15 Ω	30 Ω	100 Ω	221 Ω
10007	-4,10	-0,72	0,38	1,96	2,96	3,19
6704,7	-3,08	-0,27	0,59	1,62	2,38	2,48
4492,2	-2,10	0,01	0,61	1,24	1,72	1,81
3009,7	-0,89	0,12	0,42	0,87	1,21	1,27
2016,5	-0,50	0,13	0,29	0,65	0,77	0,87
1351,1	-0,33	-0,26	0,22	0,53	0,58	0,58
905,21	-0,77	0,00	0,19	0,38	0,42	0,41
606,49	-0,59	0,10	0,12	0,23	0,27	0,29
406,35	-0,25	0,06	0,12	0,15	0,21	0,19
272,25	-0,22	0,22	0,24	0,15	0,16	0,13
182,41	0,12	-0,09	0,03	-0,02	0,07	0,09
122,21	0,12	-0,07	0,13	-0,05	0,08	0,06
81,88	-0,01	0,04	0,12	-0,03	0,01	0,04

La **Figure III.5** représente les spectres d'amplitude et de phase obtenus à partir d'une gamme de résistance plus importante (681 k Ω à 10 k Ω).

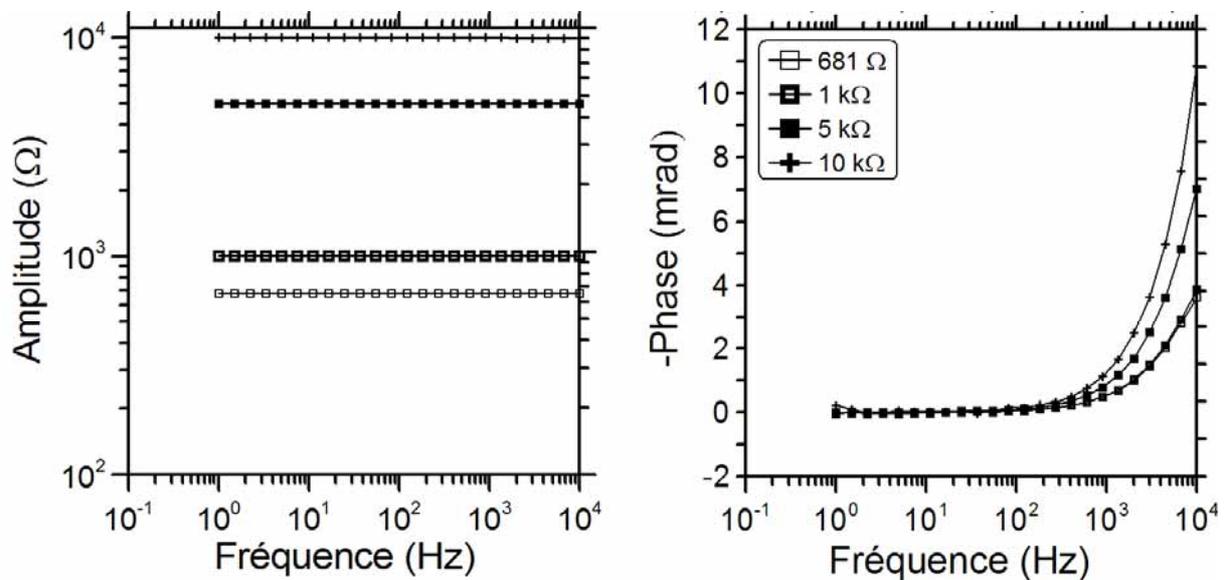


Figure III.5. Spectre d'amplitude de résistivité complexe (Ω) et de phase (mrad) pour des résistances pures de $R = 681 \Omega$, $1 \text{ k}\Omega$, $5 \text{ k}\Omega$, $10 \text{ k}\Omega$ mesurées par le NumetriQ.

Les *montées* de la phase, associées à l'*effet RC* sont plus marquées (0,99-2,49 mrad) pour des résistances élevées (681 k Ω à 10 k Ω) ; le **Tableau III.7** illustre ce résultat pour la fréquence de 2016,5 Hz.

Tableau III.7. Valeurs des phases (mrad) obtenues à partir des mesures PPS effectuées sur des résistances pures ($R = 681 \Omega$, $1 \text{ k}\Omega$, $5 \text{ k}\Omega$, $10 \text{ k}\Omega$) par le NumetriQ.

Fréquence (Hz)	-Phase (mrad)			
	681 Ω	1 k Ω	5 k Ω	10 k Ω
10007	3,62	3,87	7,02	10,86
6704,7	2,80	2,93	5,15	7,57
4492,2	2,03	2,10	3,60	5,29
3009,7	1,43	1,48	2,50	3,63
2016,5	0,99	1,01	1,67	2,49
1351,1	0,69	0,69	1,18	1,65
905,21	0,49	0,48	0,78	1,12
606,49	0,32	0,32	0,53	0,75
406,35	0,22	0,22	0,34	0,48
272,25	0,15	0,14	0,23	0,31
182,41	0,10	0,10	0,14	0,24
122,21	0,07	0,06	0,11	0,16
81,88	0,04	0,05	0,08	0,14

Rappelons que nous nous limitons à 1 k Ω . Dans ce cas, l'incertitude de mesure pour la résistance de 1 k Ω est de l'ordre de 1 mrad en valeur absolue (à 2016,5 Hz).

3.1.2c. SECR-1

Le résistivimètre fréquentiel prototype « SECR-1 » a été utilisé avec des résistances de 5,1 Ω à 1 k Ω . Les mesures spectrales ont été effectuées, l'une des électrodes d'injection étant connectée en série avec une résistance de 2 k Ω afin de limiter la densité du courant injectée. Les résultats montrent des spectres tout plats sans aucune indication d'un effet parasite (**Figure III.6**).

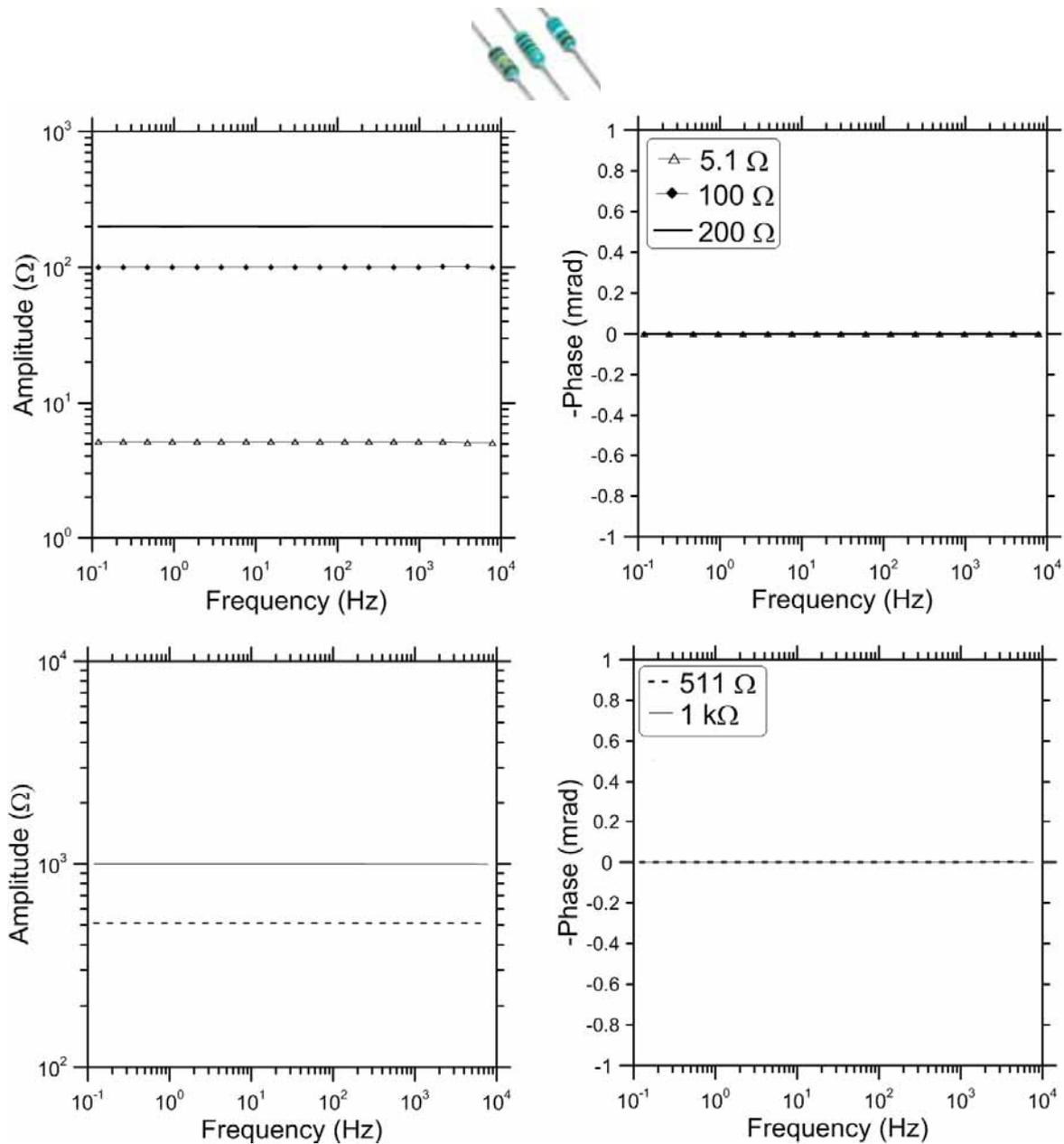


Figure III.6. Spectre d'amplitude de la résistivité complexe (Ω) et de phase (mrad) pour des résistances pures de $R = 5,1 \Omega$, 100Ω , 200Ω , 511Ω , $1 \text{ k}\Omega$ avec le SECR-1 (mesures effectuées lorsqu'une des électrodes d'injection était connectée en série avec une résistance de $2 \text{ k}\Omega$ pour le contrôle de la densité du courant injectée).

De faibles variations de déphasage peuvent être constatées à partir du **Tableau III.8**. Néanmoins, même si ces mesures indiquent un comportement satisfaisant au niveau de l'appareil, les mesures ultérieures ont été réalisées en parallèle avec un autre appareil de mesure pour toujours vérifier la cohérence entre les différents appareils. Nous présentons les résultats de cette étude à la **section 3.1.5**.

Tableau III.8. Valeurs des phases (mrad) obtenues à partir des mesures PPS effectuées sur des résistances pures ($R = 5,1 \Omega$, 100Ω , 200Ω , 511Ω , $1 \text{ k}\Omega$) avec le SECR-1.

Fréquence (Hz)	-Phase (mrad)				
	5,1 Ω	100 Ω	200 Ω	511 Ω	1 k Ω
7812,5	0,000197	0,000171	0,000158	0,000205	0,000216
3906,25	0,000104	0,00073	0,00082	0,00092	0,00091
1953,12	0,00048	0,00039	0,0004	0,00051	0,00053
976,56	0,00025	0,00021	0,00022	0,00025	0,00024
488,28	0,00013	0,00011	0,00012	0,00012	0,00011
244,14	0,0006	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004
122,7	0,0004	0,0003	0,0003	0,0001	0,0001
61,35	0,0002	0,0002	0,0002	0	0,0002

En conclusion, nous avons étudié le comportement spectral de trois appareils de mesure disponibles au laboratoire Sisyphé. Cette étude avait pour objectif de connaître la réponse propre des appareils et de pouvoir en tenir compte lors des mesures en laboratoire à partir d'échantillons argilo-sableux. Le fonctionnement du prototype SECR-1 s'est avéré satisfaisant. Nous présentons sur la **Figure III.7** une synthèse où nous comparons uniquement le SIP FUCHS et le NumetriQ.

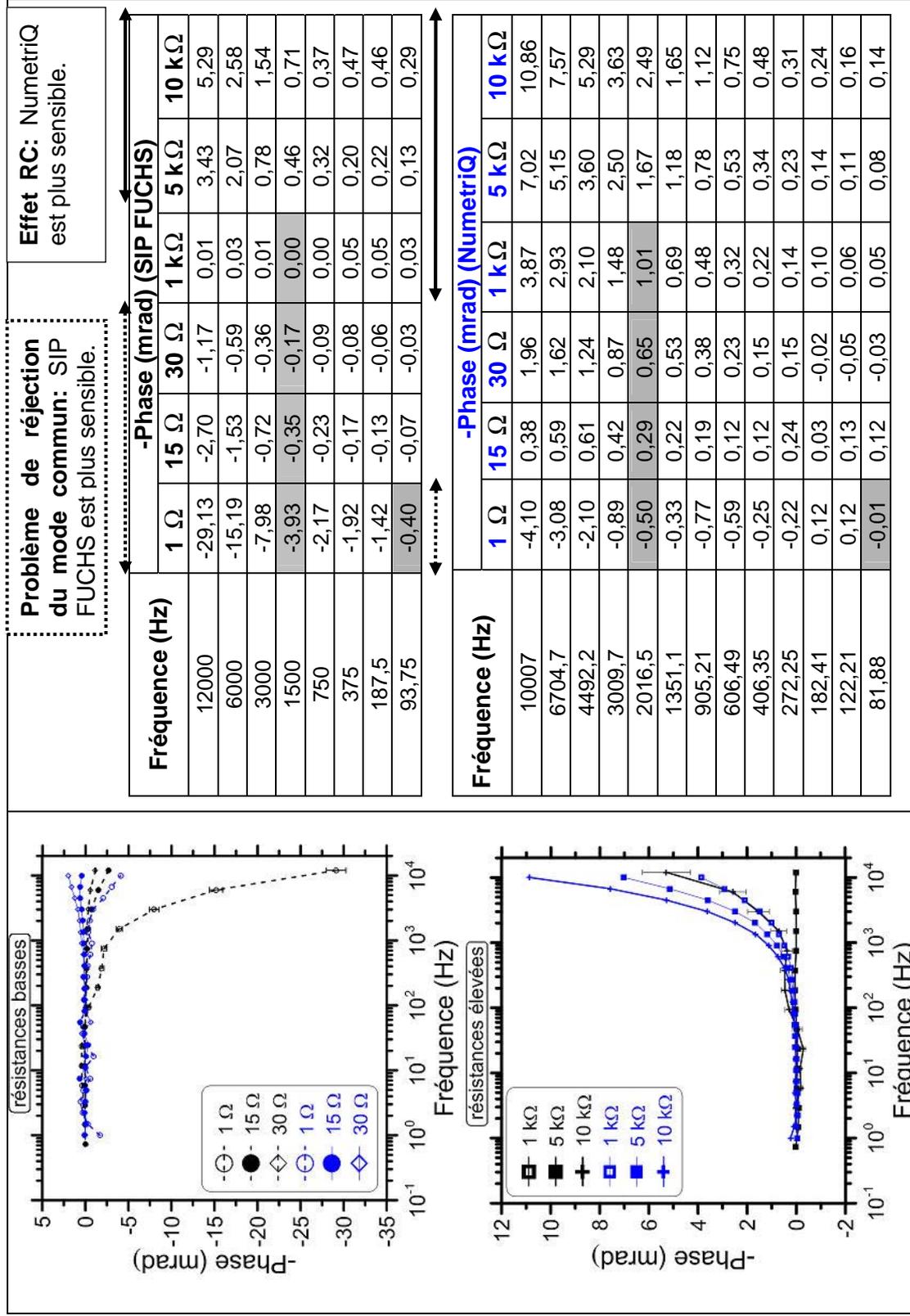


Figure III.7. Comparaison des deux appareils de mesure « SIP FUCHS » et « NumetriQ » en fonction des résistances utilisées (à gauche : spectre de phase (mrad), à droite : tableaux des déphasages correspondants).

Ce travail méthodologique a permis de dégager les points suivants :

- Lors qu'il s'agit des résistances basses (1Ω), la réponse des deux appareils de mesure montre une perturbation liée au problème de *rejection du mode commun*. Cette perturbation est plus significative pour le SIP FUCHS (surtout avec la résistance la plus basse : 1Ω). Nous proposons de nous en tenir aux fréquences basses ($\leq 93,75$ Hz) relativement moins affectées pour les échantillons conducteurs.
- En considérant des résistances basses de l'ordre de 15Ω , 30Ω et en optant pour une fréquence maximale de 1500 Hz (ou $2016,5$ Hz pour le NumetriQ), il est possible d'éviter et/ou réduire les effets instrumentaux quelque soit l'appareil utilisé. L'erreur de phase dans ce cas est de l'ordre de maximum $[0,65 \text{ mrad}]$ en valeur absolue que l'on peut considérer comme négligeable par rapport aux déphasages qui seront mesurés sur des mélanges artificiels argilo-sableux (**Figure III.7**).
- Pour les résistances élevées ($1 \text{ k}\Omega$, $5 \text{ k}\Omega$, $10 \text{ k}\Omega$), un effet instrumental intervient dans la réponse mesurée. Cet effet est dominant quand la résistance est importante et surtout à partir de $2016,5$ Hz. Le NumetriQ montre une sensibilité plus importante à cette réponse parasite dite *effet RC* que le SIP FUCHS. Cependant, les échantillons d'étude (mélanges argilo-sableux) ne correspondent pas à des résistances importantes ($R < 1 \text{ k}\Omega$), et même à $1 \text{ k}\Omega$, l'erreur reste limitée à $[1 \text{ mrad}]$ ($2016,5$ Hz) ce que nous pouvons considérer comme acceptable.

3.1.3. Etude au niveau du contact : échantillon-électrode (SECR-1)

En plus de la résistivité de l'échantillon étudié, il faut aussi tenir compte du contact assuré entre l'échantillon et les électrodes de mesure. Cette caractéristique contrôle la qualité de signal donc le rapport signal/bruit. Afin d'étudier l'influence des différents contacts entre échantillon-électrodes, nous avons réalisé trois mesures PPS successives à partir d'un échantillon de minerais de chalcocite. Cet échantillon est bien adapté à l'étude du signal reçu dans des conditions difficiles : (i) milieu conducteur et (ii) grossier où le contact est difficile à bien assurer. Nous avons testé trois différents cas de mesure : à partir d'un contact (a) direct des électrodes avec l'échantillon, (b) assuré par une argile gonflante (bentonite) et (c) assuré par une argile non-gonflante (l'« argile rouge » citée plus haut). Nous gardons les électrodes de Cu/CuSO_4 lors de ces expériences. La présentation des différents cas de mesure peut être trouvée sur la **Figure III.8**.

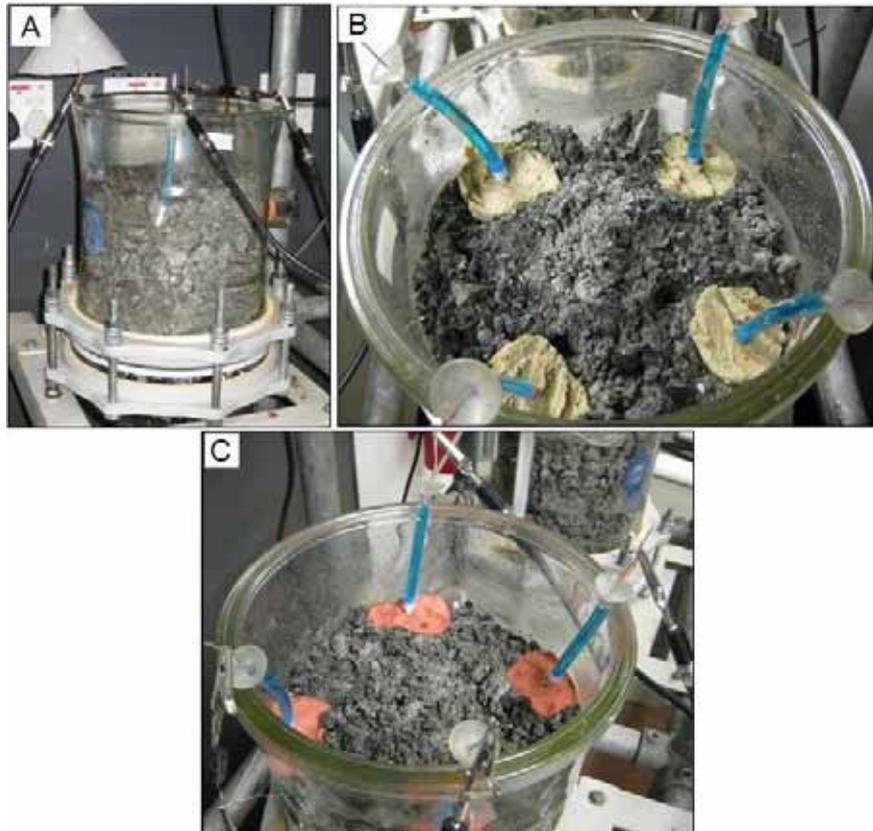


Figure III.8. Etude des différents contacts « échantillon-électrode » (A) contact direct, (B) contact à partir de la bentonite, (C) contact à partir d'une argile non-gonflante (argile rouge).

Nous présentons sur la **Figure III.9** les résultats de l'étude expérimentale avec les spectres d'amplitude et de phase. Elle permet d'observer que dans un milieu conducteur et grossier la mesure acquise à partir d'un contact direct entre échantillon-électrode conduit à une réponse instable. Les réponses des mesures acquises à l'aide d'un géomatériau placé entre l'échantillon et chaque électrode permettent d'obtenir des signaux répétitifs dont le rapport signal/bruit est meilleur que dans le cas du contact direct.

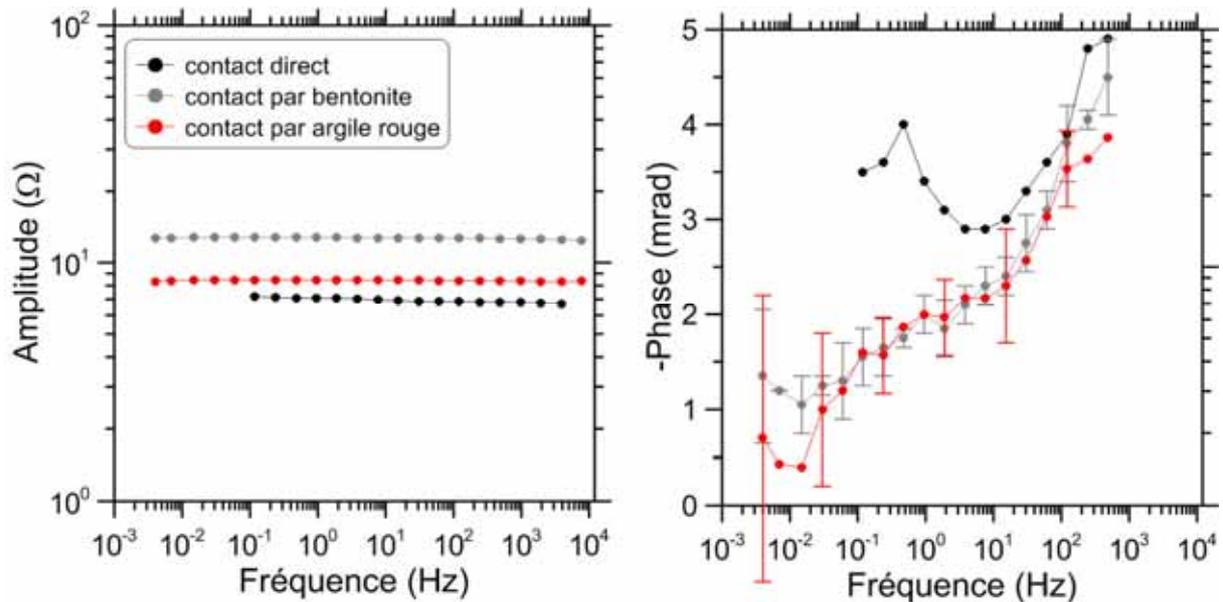


Figure III.9. Spectres d'amplitude et de phase des mesures PPS acquises à partir d'un contact (a) direct électrode-échantillon, (b) assuré par une argile gonflante (bentonite) et (c) assuré par une argile non-gonflante (argile rouge).

Néanmoins, lorsque l'argile rouge est utilisée, les erreurs, définies à partir de la dispersion de trois mesures par cas d'étude, sont beaucoup plus importantes que lors de l'utilisation de la bentonite, qui semble la mieux adaptée pour l'acquisition à la fois en laboratoire à partir du sol gravier et *in situ* à partir de la roche.

3.1.4. Etude du porte-échantillon (SIP FUCHS II)

Le travail expérimental mené au niveau du porte-échantillon comporte deux volets principaux. Le premier consiste à définir une hauteur optimale d'un mélange argilo-sableux dans le porte-échantillon à partir des mesures PPS. Cette étude de sensibilité est nécessaire pour définir une hauteur d'échantillon pour laquelle la réponse parasite liée au couplage du dispositif de mesure « porte-échantillon-échantillon » est la moins importante. Le deuxième volet vise à déterminer le coefficient géométrique (k) associée au porte-échantillon utilisé. En général, la formule empirique qui permet de calculer ce coefficient (**équation I.5**) est valable à condition qu'il s'agisse d'un positionnement des électrodes sur une interface plane (demi-espace infini). Lors qu'il s'agit de mesures en laboratoire, la position des électrodes de mesure est, sur une surface cylindrique, gouvernée par la géométrie du porte-échantillon utilisé. En conséquence, cette géométrie nécessite un calcul plus élaboré. Pour le faire, nous nous sommes basés sur la méthode des éléments finis. Nous abordons dans un premier temps, les caractéristiques du porte-échantillon et le premier volet expérimental concernant la réponse du dispositif en fonction de la dimension de l'échantillon. Dans un deuxième

temps, nous présentons le calcul théorique du coefficient géométrique qui permet de définir les vraies valeurs de résistivité des échantillons préparés.

3.1.4a. Influence de la hauteur de l'échantillon

L'étude de la réponse propre du dispositif utilisé (porte-échantillon-échantillon) a été menée en se basant à un échantillon de référence dont on peut contrôler les propriétés électriques. Par conséquent, nous avons avantage à utiliser de l'eau salée. Les échantillons de l'eau salée sont préparés à partir de l'eau déminéralisée en ajoutant du chlorure de sodium (NaCl) ce qui abouti aux conductivités suivantes : $\sigma_{\omega} = 0,5$ mS/cm et $\sigma_{\omega} = 7,1$ mS/cm. Les valeurs de conductivité de l'électrolyte préparée ont été déterminées grâce au conductivimètre Multi 340i WTW. Les hauteurs des échantillons d'eau salée adoptées étaient $h = 10$ cm, 18 cm, 23 cm.

Le porte-échantillon utilisé est un récipient cylindrique en PVC (**Figure III.10**) de 30 cm de hauteur et 19 cm de diamètre. Le porte-échantillon fut percé par quatre trous servant à placer les électrodes régulièrement espacés sur un cercle à 5 cm au dessus du fond. Les caractéristiques géométriques du porte-échantillon et les hauteurs de remplissage sont données sur la **Figure III.10**.

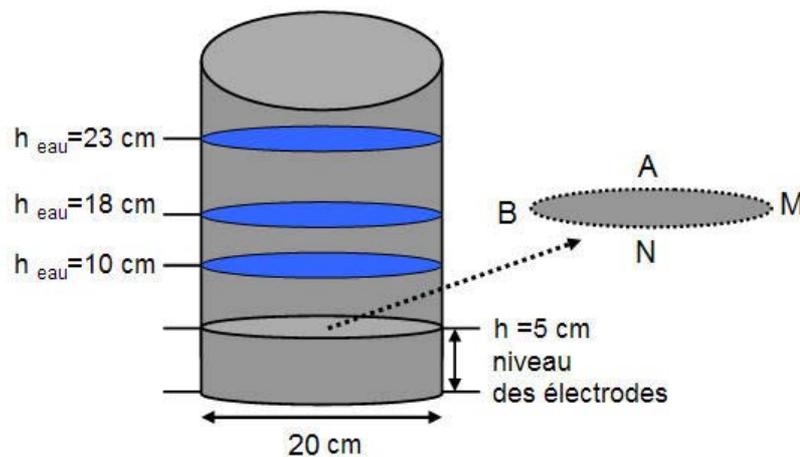


Figure III.10. Schéma du porte-échantillon cylindrique avec les hauteurs d'échantillons mesurées (A, B : électrodes d'injection ; M, N : électrodes de potentiel) (sans échelle).

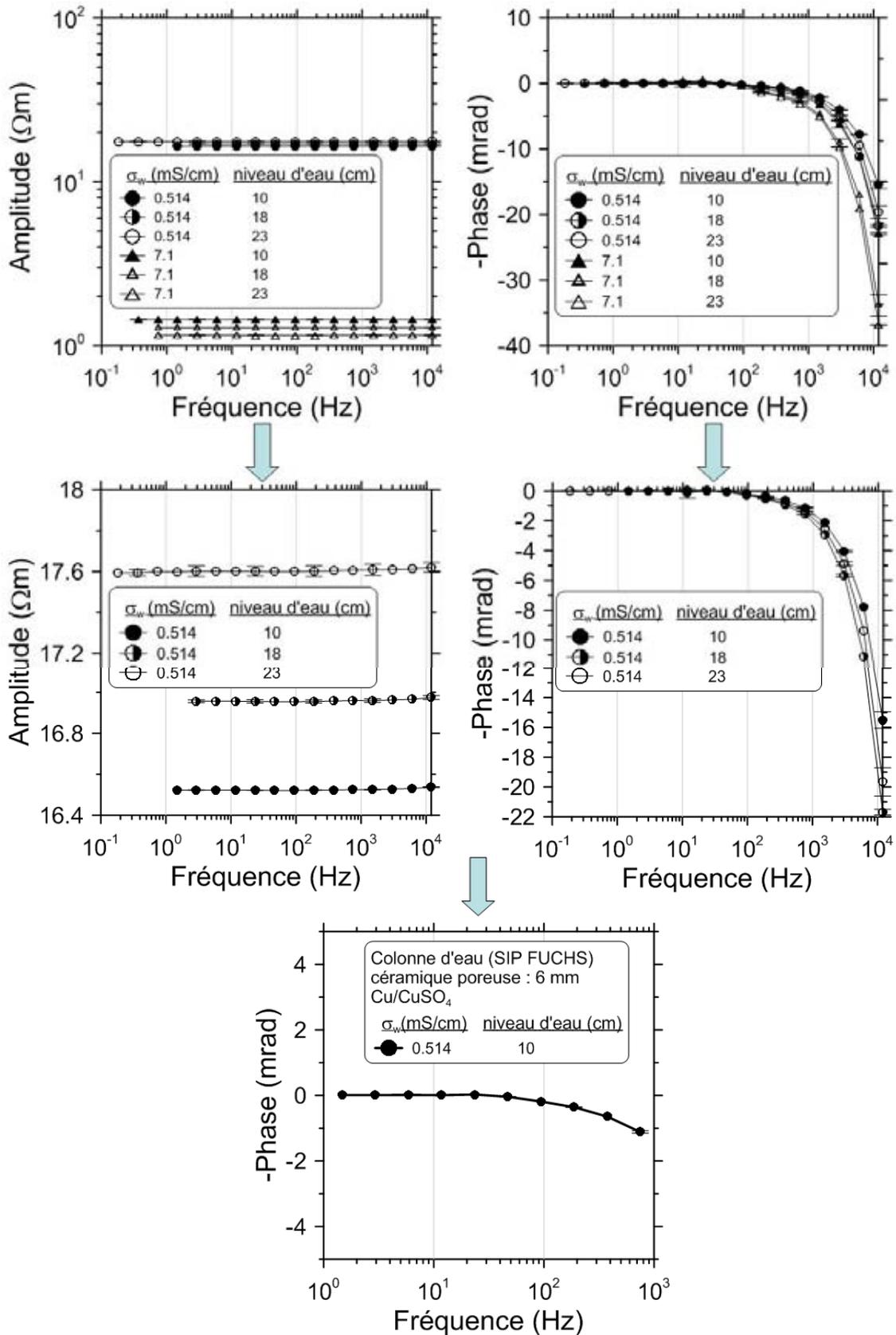


Figure III.11. Spectre d'amplitude ($\Omega.m$) et de phase (mrad) de l'échantillon d'eau pour différents niveaux ($h = 10$ cm, 18 cm, 23 cm) et salinités ($\sigma_w = 0,514$ mS/cm, 7,1 mS/cm). Les barres d'erreur affichées sont calculées par le SIP FUCHS (mesures A. Ghorbani).

Avec le SIP FUCHS, une gamme de fréquence de [0,1 Hz à 12 kHz] a été utilisée avec des électrodes impolarisables de type Cu/CuSO₄. La **Figure III.11** montre les spectres d'amplitude ($\Omega.m$) et de phase (mrad) pour trois hauteurs de remplissage ($h = 10$ cm, 18 cm, 23 cm) et deux gammes de conductivité ($\sigma_w = 0,514$ mS/cm, 7,1 mS/cm). Les déphasages obtenus à 750 Hz (2 mesures) lors de cette expérience peuvent être retrouvés sur le **Tableau III.9**.

Tableau III.9. Déphasages mesurés pour l'échantillon d'eau avec différents remplissages et conductivités à $f = 750$ Hz.

Conductivité d'eau (mS/cm)	Hauteur d'eau (cm)	-Phase (mrad)	Erreur (mrad) $ mes1 - mes2 $
0,514	10	-1,13	0,0359
0,514	18	-1,55	0,0109
0,514	23	-1,34	0,0055
7,1	10	-1,77	0,110
7,1	18	-2,65	0,035
7,1	23	-3,02	0,0743

Les résultats du **Tableau III.9** indiquent pour les deux conductivités un minimum de déphasage quand la hauteur d'eau est de 10 cm (1,13 mrad ou 1,77 mrad selon la salinité). Cette étude de sensibilité a permis de déterminer la hauteur des échantillons dans le porte-échantillon pour laquelle les effets parasites liés au dispositif sont minimum.

3.1.4b. Calcul du coefficient géométrique

Le calcul du coefficient géométrique a été réalisé à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics version 3.5a. Ce logiciel permet une modélisation en 1D, 2D ou 3D par la méthode des éléments finis. Le calcul du coefficient géométrique du porte-échantillon correspond à une géométrie 3D. La géométrie du dispositif, **Figure III.12.**, est reconstruite sous l'interface graphique du logiciel.

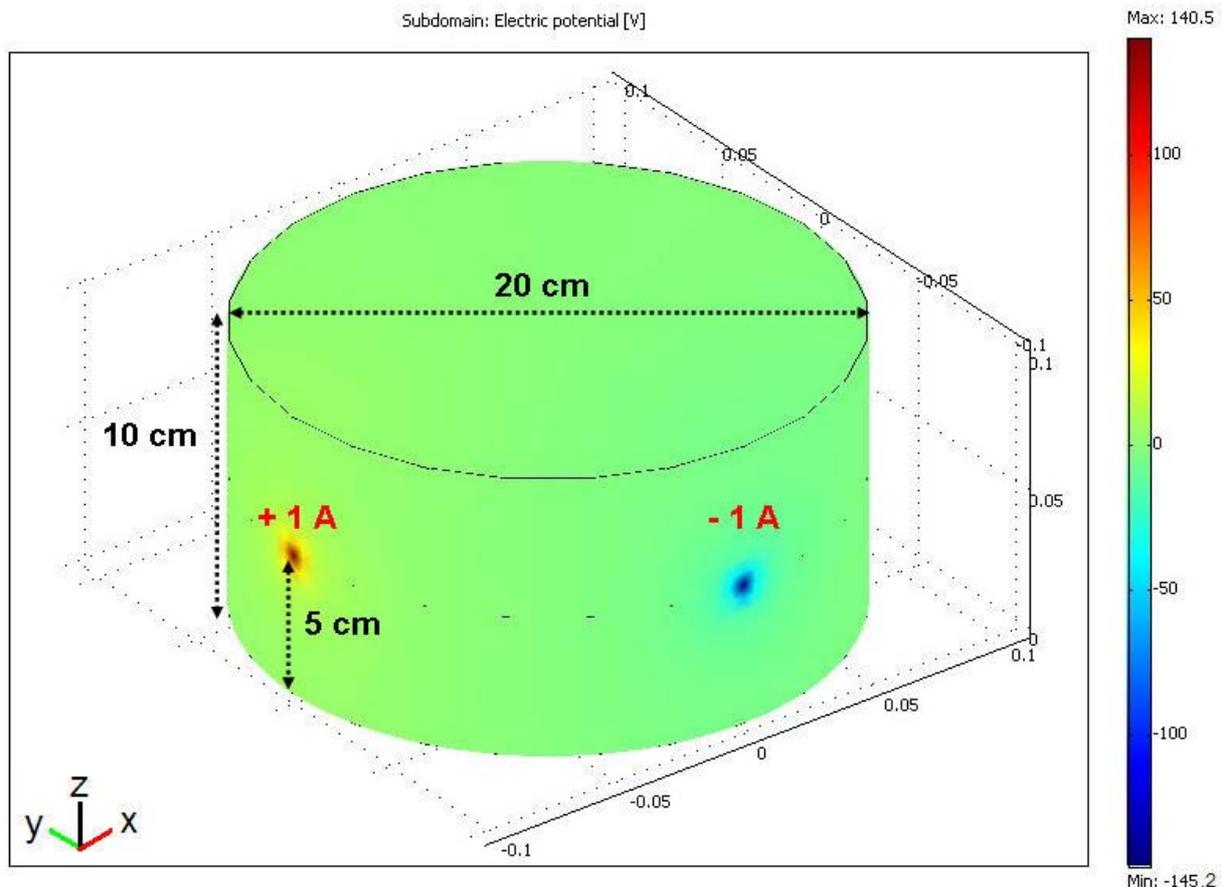


Figure III.12. Modèle 3D construit à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics pour le calcul du coefficient géométrique du porte-échantillon utilisé lors des mesures en laboratoire.

Le modèle fait intervenir deux cylindres superposés d'une hauteur de 5 cm chacun et d'un diamètre de 20 cm. La surface d'intersection entre les deux cylindres a été ultérieurement supprimée lors de la construction de la géométrie. La première étape du calcul direct consiste à déterminer les caractéristiques de l'échantillon (de 10 cm haut) et les conditions aux limites, le coefficient géométrique ($k = \rho I / \Delta V$) d'un système échantillon-dispositif dépendant de la géométrie et non des propriétés intrinsèques de l'échantillon. Afin de simplifier les calculs, nous considérerons un matériau de résistivité uniforme $\rho = 1 \Omega \cdot m$. Nous avons imposé deux sources d'injection ponctuelles d'intensité +1 A et -1 A. Ces sources sont placées à 5 cm de haut au niveau du plan d'intersection de deux cylindres, elles correspondent aux électrodes d'injection (A et B, **Figure III.12**). L'échantillon étant laissé à l'air lors des mesures, nous avons imposé une condition d'isolation électrique autour de l'échantillon. La résolution numérique est réalisée en considérant un échantillon de 10 cm de haut à partir du module « *Electromagnetics* → *Conductive DC media* ». Ce module résout l'équation de Poisson pour la distribution du potentiel électrique.

$$-\nabla(\sigma\nabla V - J^e) = Q_j \quad \text{équation (III.1)}$$

où σ désigne la conductivité électrique (S/m) ($\sigma = 1/\rho$ ici $\sigma = 1$ S/m), J^e la densité du courant externe (A/m^2) et Q_j la source du courant (A/m^3). Lors de ce calcul, un maillage triangulaire plus raffiné par rapport à celui proposé par défaut a été utilisé afin d'obtenir le résultat le plus précis possible. Finalement, nous nous intéressons à la différence de potentiel calculée au niveau des points placés en face des points source de courant. Ces deux points correspondent aux positions des électrodes de mesure de potentiel. Connaissant le courant injecté I , la différence de potentiel calculé ΔV et la résistivité du milieu ρ (que nous avons choisie égale à $1 \Omega \cdot m$), nous avons pu déterminer le coefficient géométrique du porte-échantillon, il vaut $k = 0,45$ m. Cette valeur a été confirmée par une mesure expérimentale menée avec le porte-échantillon concerné et de l'eau salée de conductivité connue à l'aide de SIP FUCHS. Le résultat expérimental est cohérent avec le résultat de la modélisation.

3.1.5. Etude des appareils de mesure à partir d'un échantillon commun

La **section 3.1.2** a analysé le comportement des différents appareils de mesure avec des résistances pures : basses et élevées (1Ω à $10 \text{ k}\Omega$). Après avoir étudié les différents comportements des appareils de mesure à partir d'une gamme de résistance et de fréquence, il est intéressant de mener des expériences en parallèle avec deux appareils de mesure à partir d'un échantillon commun afin d'observer directement la cohérence des réponses des appareils. Elle permet ainsi d'étudier la répétitivité des mesures et de déterminer la gamme de fréquence pour laquelle les réponses se superposent. Nous contrôlons tout d'abord (a) l'homogénéité des mélanges (*de différentes teneurs en argile*) à partir des différents appareils de mesure, ensuite, nous comparons (b) les réponses des appareils en fonction des mélanges argileux de différentes minéralogies, finalement, nous présentons une comparaison (c) des réponses obtenues à partir d'échantillons argilo-sableux saturés par des électrolytes de différentes salinités.

Nous procédons aux mesures immédiatement après la fabrication des échantillons argilo-(sableux) et une fois qu'elles étaient terminées avec le premier appareil, une deuxième série de mesure a été lancée avec l'autre appareil sur le même échantillon. Lors de ces deux séries de mesure, la position des électrodes Cu/CuSO₄ n'a pas été modifiée. Par conséquent, nous avons considéré que les conditions de mesures étaient les mêmes en termes de résistances de contact, de température et d'humidité. Ce constat n'était plus

valable lorsqu'il s'agissait de la comparaison des réponses en fonction de temps (par exemple pour une expérience durant deux jours). Dans ce cas là, à la fin du premier jour de mesure, les électrodes impolarisables furent enlevées pour éviter une pollution de l'échantillon par une probable diffusion de la solution des électrodes. Une fois les électrodes enlevées les échantillons ont été hermétiquement enfermés et le deuxième jour, en utilisant les volumes du mélange à l'intérieur des bords du porte-échantillon une bonne résistance de contact a été à nouveau assurée. Toutefois, nous ne pouvons pas considérer que cette résistance de contact fut strictement la même qu'au premier jour de mesure. La différence fut cependant négligeable et ne s'est pas exprimée d'une manière significative sur les résultats obtenus.

3.1.5a. Deux teneurs extrêmes en argile (100 % et 1 %) et contrôle de l'homogénéité du mélange (SIP FUCHS II)

Nous présentons tout d'abord l'étude de l'homogénéité des mélanges de différentes teneurs en argile avec le SIP FUCHS. Pour cette étude, nous avons choisi deux teneurs volumiques extrêmes : 100 % et 1 %. Il s'agit d'échantillons argilo-sableux saturés en eau déminéralisée et préparés à la fois à partir de la Kaolinite N° 1 et de la Bentonite N° 1. Le contrôle de l'homogénéité des mélanges préparés a été investigué par rotation de 45° des mesures quatre points (**Figure III.13**).

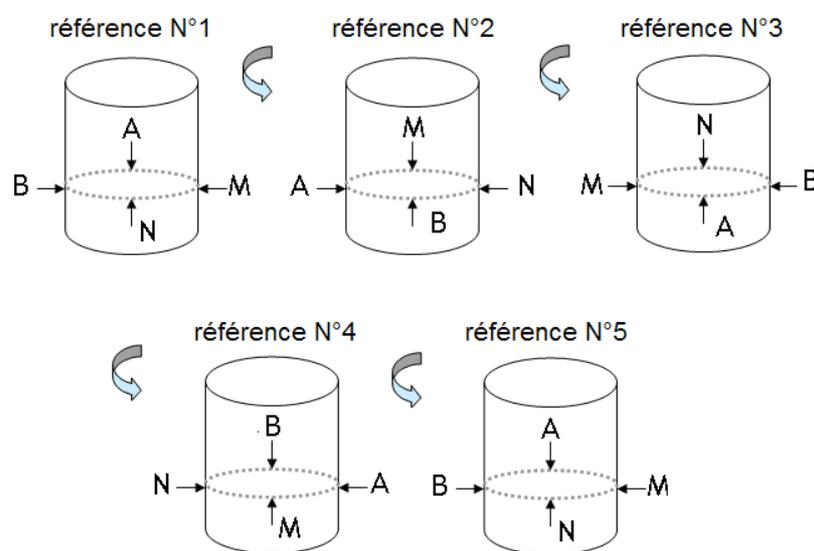


Figure III.13. Stratégie de mesure pour le contrôle de l'homogénéité de l'échantillon synthétique préparé.

Les **Figures III.14-15** représentent la répétitivité des mesures et permettent de juger de l'homogénéité des mélanges préparés. L'interprétation s'appuie sur les spectres d'amplitude ($\Omega \cdot m$) et de phase (mrad). Les barres d'erreur utilisées sont celles affichées par

le SIP FUCHS où l'erreur est représentée par l'écart type calculé à partir des répétitions effectuées par fréquence (**Tableau III.1**).

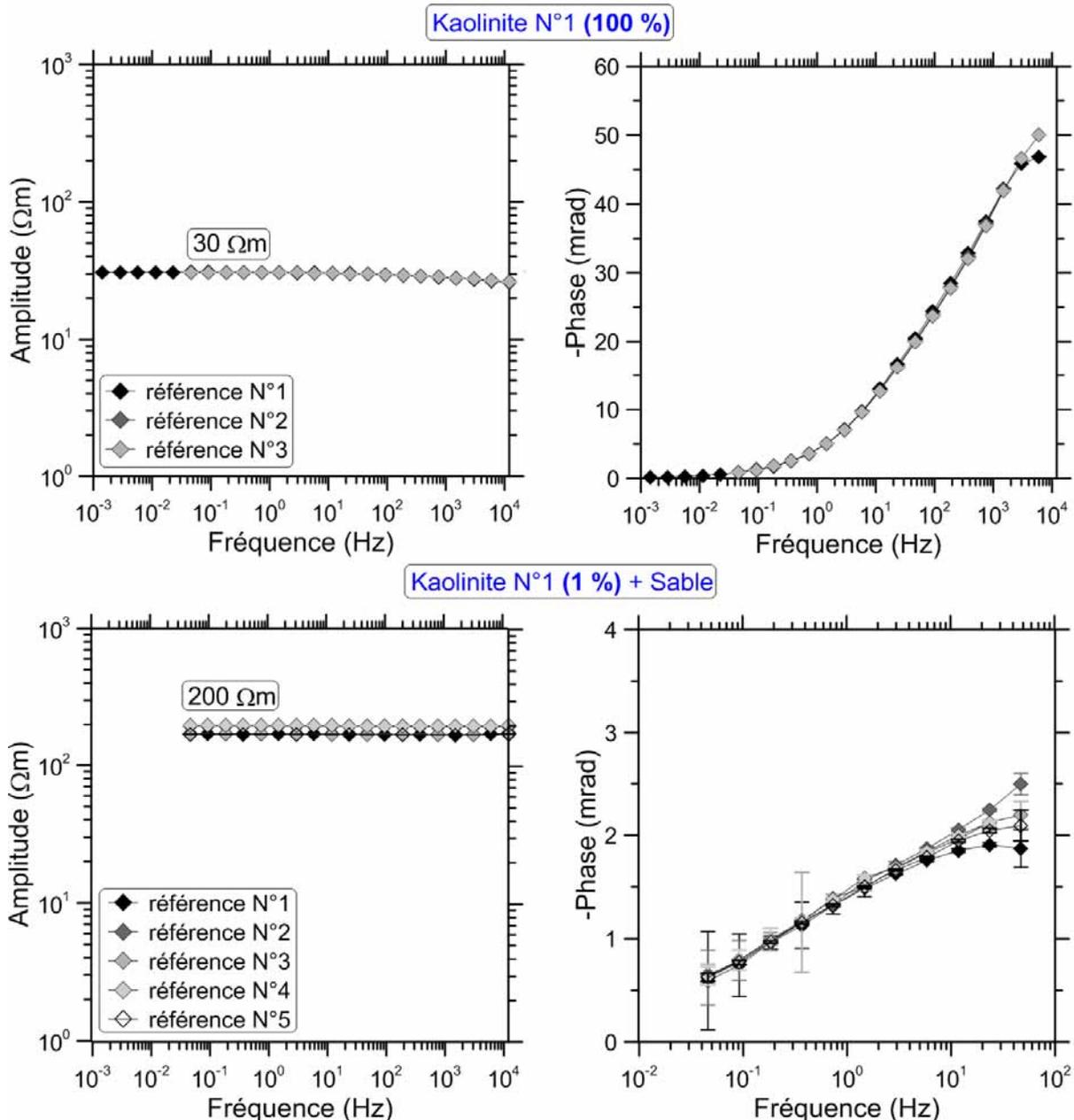


Figure III.14. Contrôle de l'homogénéité des mélanges de deux teneurs extrêmes en argile (100 % et 1 %) de type kaolinite à partir du SIP FUCHS (saturation en eau déminéralisée).

La **Figure III.14** montre que l'homogénéité du mélange est assurée d'une manière satisfaisante pour les mesures effectuées à partir de l'échantillon de Kaolinite (N° 1) 100 % argileux. Cette interprétation se fonde sur la répétitivité des réponses du SIP FUCHS. Lorsqu'il s'agit de l'échantillon 1 % argileux (Kaolinite N° 1, **Figure III.14**), les réponses sont légèrement dispersées à partir 100 Hz. Toutefois, cette dispersion semble être liée aux faibles déphasages obtenus (< 3 mrad) en présence de faible quantité d'argile. En résumé, quelque soit la quantité d'argile de type Kaolinite dans le mélange, les réponses spectrales

sont répétitives et indiquent l'homogénéité des mélanges pour 1 % et 100 % de teneur en argile. Nous étudions maintenant l'homogénéité des échantillons préparés à partir de la Bentonite N° 1 pour deux teneurs extrêmes : 100 % et 1 % (**Figure III.15**). Pour l'échantillon 100 % argileux (Bentonite N° 1, **Figure III.15**), le contrôle de l'homogénéité à partir du SIP FUCHS paraît plus délicat du fait des faibles valeurs de déphasage (± 1 mrad) et de la résistivité ($2 \Omega \cdot m$) de l'échantillon. Ces ordres de grandeurs sont à la limite de la sensibilité de l'appareil. En conséquence, la sensibilité de l'appareil nous empêche de commenter la répétitivité des mesures donc l'homogénéité du mélange. Toutefois, l'échantillon 1 % argileux (Bentonite N° 1, **Figure III.15**) offre une bonne répétitivité des mesures. Cet échantillon présente une résistivité de $[30-40 \Omega \cdot m]$ et des déphasages faibles sur toute la gamme de fréquence ($\leq 3,5$ mrad). En général, à l'aide de SIP FUCHS, nous pouvons constater l'homogénéité des mélanges préparés à partir d'une répétitivité satisfaisante des mesures.

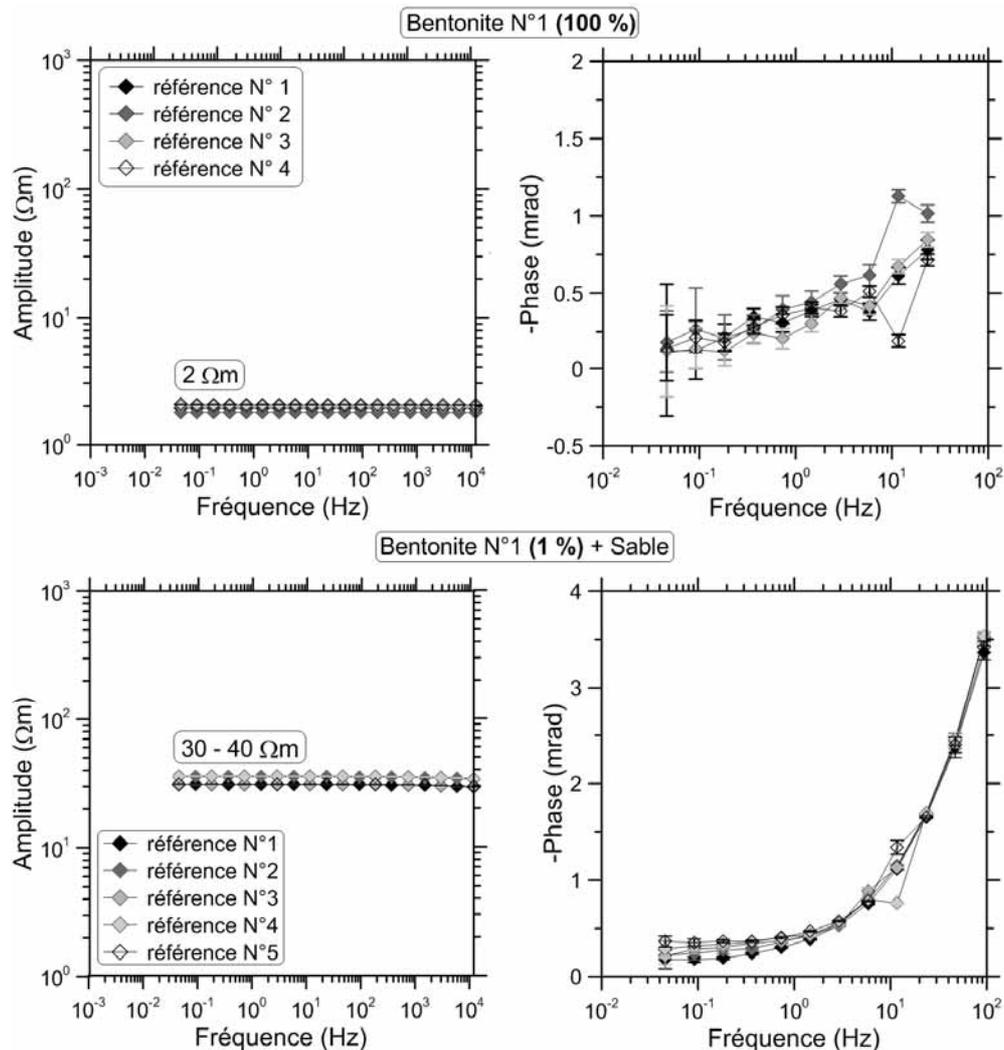


Figure III.15. Contrôle de l'homogénéité des mélanges pour deux teneurs extrêmes en argile (100 % et 1 %) de type bentonite avec le SIP FUCHS (saturation en eau déminéralisée).

3.1.5b. Différentes teneurs en argile (100 %, 20 %, 5 %, 1 %) et contrôle de l'homogénéité du mélange (NumetriQ-SECR-1)

Le contrôle de l'homogénéité d'un mélange pour différentes teneurs en argile est analysé, ici, par une approche comparative entre le NumetriQ et le SECR-1. Nous utilisons uniquement les échantillons argilo-(sableux) de type Kaolinite N° 2 saturée en eau déminéralisée pour présenter ce travail. Afin d'alléger le texte, seuls les spectres de phase pour différentes teneurs en argile sont reportés sur la **Figure III.16**. Toutefois, la résistivité moyenne de l'échantillon sur toute la gamme de fréquence est notée sur les graphiques. Les mesures sont acquises suivant deux et cinq positions avec le NumetriQ et le SECR-1 respectivement. La gamme de fréquence des mesures spectrales acquises avec le NumetriQ est beaucoup plus importante (de 0,01 Hz à 12000 Hz) que celle du SECR-1 (de 0,24 Hz à 7812,5 Hz). L'acquisition avec le NumetriQ est réalisée manuellement fréquence par fréquence en respectant le nombre d'acquisition/fréquence (**Tableau III.1**) et la fréquence choisie suit celle du SIP FUCHS. Ce mode d'acquisition permet d'améliorer le rapport signal/bruit par rapport au mode « sweep ». Grâce au mode d'acquisition adopté avec le NumetriQ, nous avons accès à l'ensemble des données par fréquence facilitant ainsi le calcul de la moyenne et de l'écart type pour l'affichage de la valeur et de l'erreur à chaque fréquence. Cette stratégie d'acquisition et la détermination de la valeur et de l'erreur à partir du NumetriQ est respectée dans la suite lors de toutes les mesures expérimentales. Quant au SECR-1, l'acquisition est répétée deux fois par position et ces deux mesures sont moyennées pour l'affichage des valeurs de phases finales.

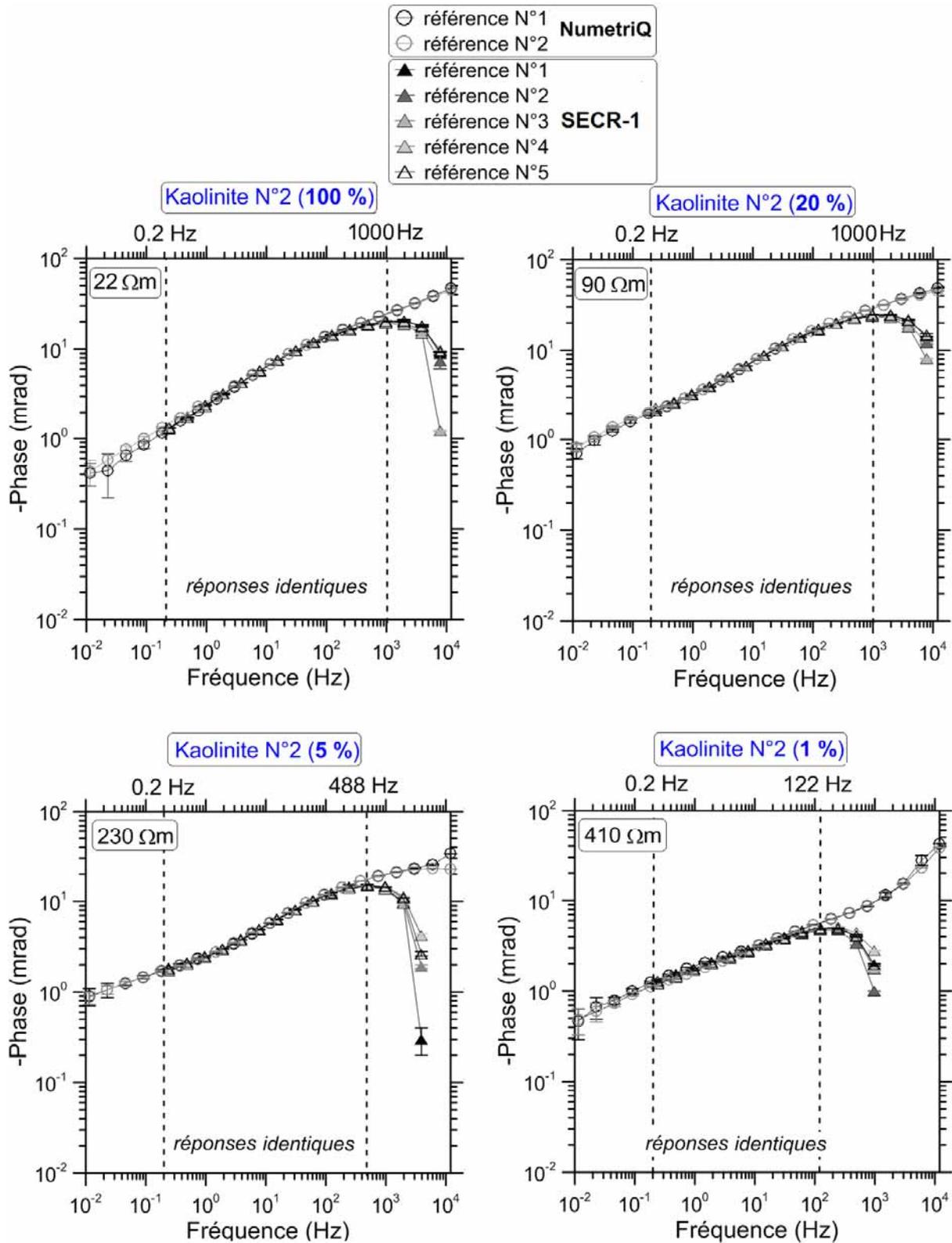


Figure III.16. Contrôle de l'homogénéité des mélanges de différents teneurs en argile (100 %, 20 %, 5 %, 1 %) de type Kaolinite à partir du NumetriQ et du SECR-1 (saturation en eau déminéralisée).

Les réponses des appareils sont identiques entre [0,2 et 1000 Hz] lorsqu'il s'agit d'échantillons de teneur en argile de 100 % et de 20 % (**Figure III.16**). Au-delà de 1000 Hz, nous remarquons sur le SECR-1 des *chutes* de phase contrairement au NumetriQ. Cet effet parasite du SECR-1 intervient d'une manière répétitive à chaque acquisition et il affecte l'ensemble des spectres de phase des échantillons de différentes teneurs. Les *chutes* commencent à partir d'une fréquence plus basse lorsque la teneur en argile diminue. Finalement, pour un échantillon de 1 % de teneur en argile, la bande de superposition des réponses spectrales de deux appareils se rétrécit de [0,2 Hz à 122 Hz]. En conclusion, les mesures des deux appareils se présentent comme répétitives pour chaque position malgré des effets parasites systématiques lorsqu'il s'agit du SECR-1.

3.1.5c. Différentes minéralogies (SIP FUCHS-NumetriQ)

Précédemment, nous avons cherché à vérifier l'homogénéité des mélanges préparés, avec des mesures obtenues par différents appareils et pour différentes teneurs en argile. La répétitivité des mesures a permis de justifier de l'homogénéité et également de révéler les capacités des appareils de mesure à caractériser cette homogénéité. Dans cette section, nous avons pour objectif de comparer les réponses de deux appareils de mesure à partir des échantillons constitués d'argile de différentes minéralogies : Kaolinite et Bentonite. Nous disposons d'échantillons argilo-sableux possédant 20 % d'argile en teneur de différentes minéralogies pour lesquels les mesures du SIP FUCHS et du NumetriQ ont été réalisées en parallèle. La gamme de fréquences étudiée allait de 1 mHz à 12 kHz. Les échantillons ont été saturés en eau déminéralisée. L'acquisition a été répétée pendant deux jours. Les **Figures III.17** et **III.18** présentent la comparaison à partir des mélanges argileux respectivement de type kaolinite et bentonite. Pour cette étude, nous présentons les spectres de phase obtenus le premier et le deuxième jour et une synthèse incluant le spectre d'amplitude et de phase rassemblant les réponses des deux jours.

La **Figure III.17** indique que les réponses du SIP FUCHS et du NumetriQ pour un mélange argileux de 20 % de type kaolinite sont identiques pour la gamme de fréquence allant de [0,02 Hz à 1000 Hz]. En dessous de 0,02 Hz, les réponses sont légèrement différentes dans la marge d'erreur. Au-delà de 1000 Hz, les courbes de phase divergent à cause des *chutes* de phase intervenant lors de l'utilisation du SIP FUCHS. Ce comportement de l'appareil, est maintenant bien connu par toutes les études méthodologiques préliminaires (**voir section 3.1.2a**). La superposition des réponses obtenues dans la bande de fréquence indiquée se retrouve le deuxième jour. Les réponses des appareils sont répétitives d'un jour à l'autre.

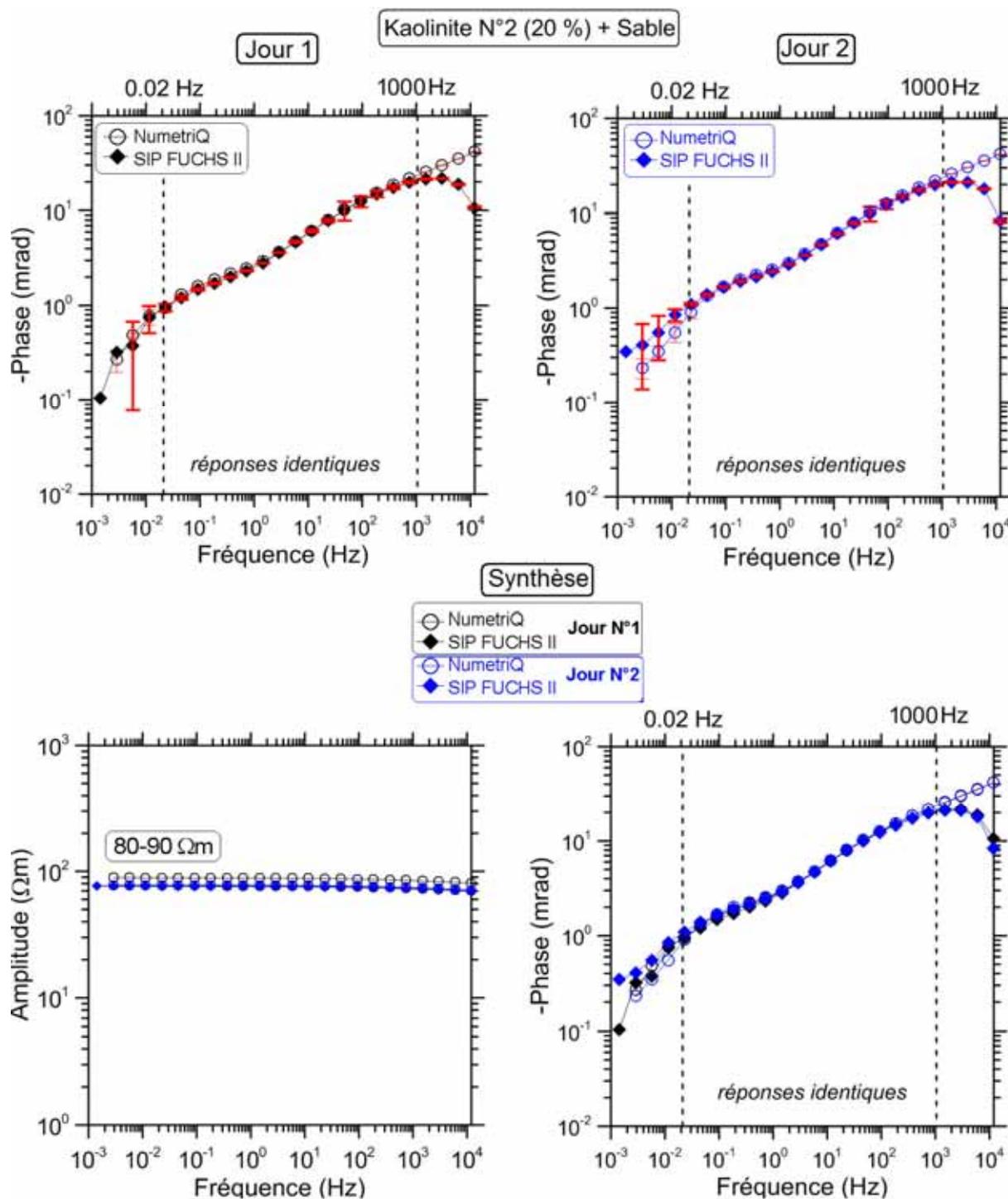


Figure III.17. Comparaison des réponses spectrales du SIP FUCHS et du NumetriQ sur deux jours successifs à partir d'un échantillon argileux de type kaolinite (saturation en eau déminéralisée).

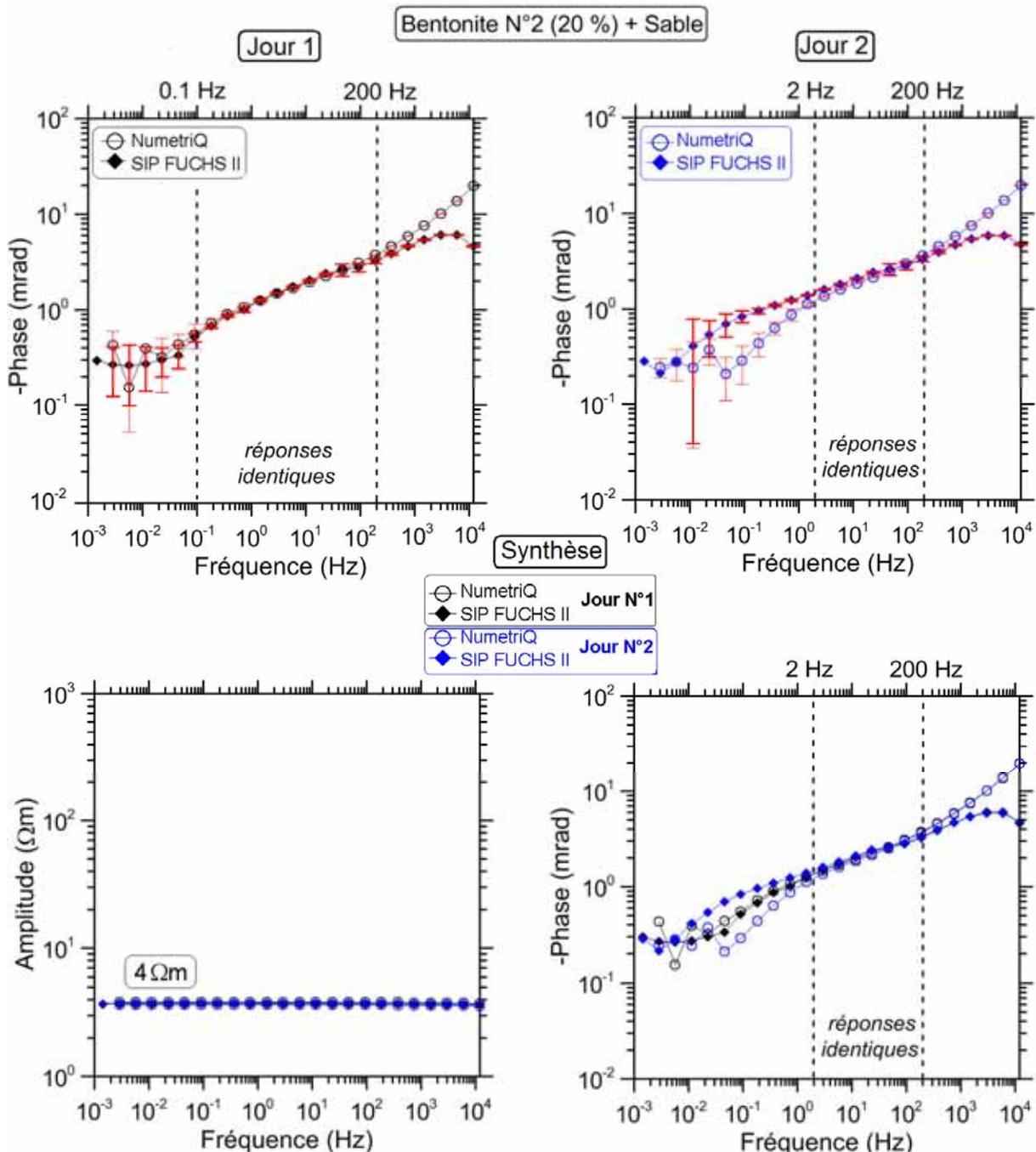


Figure III.18. Comparaison des réponses spectrales du SIP FUCHS et du NumetriQ entre deux jours successifs à partir d'un échantillon argileux de type Bentonite (saturation en eau déminéralisée).

Lors qu'il s'agit d'un mélange argileux de 20 % de type bentonite, les réponses du SIP FUCHS et du NumetriQ sont identiques entre [0,1 Hz à 200 Hz] au premier jour de mesure (**Figure III.18**). Au deuxième jour, la gamme de fréquence pour laquelle les réponses sont identiques se rétrécit de [2 Hz à 200 Hz]. En dessous de 2 Hz, nous observons des incertitudes de mesure. Ces types d'ambiguïtés aux basses fréquences peuvent apparaître lorsqu'existent des problèmes liés à une mauvaise résistance de contact, à la polarisation

des électrodes ou à la sensibilité des appareils surtout pour des gammes de résistivité faible (i.e. $4 \Omega.m$). Au dessus de 200 Hz, les *chutes* de phase du SIP FUCHS induisent de nouveau une divergence entre les deux réponses.

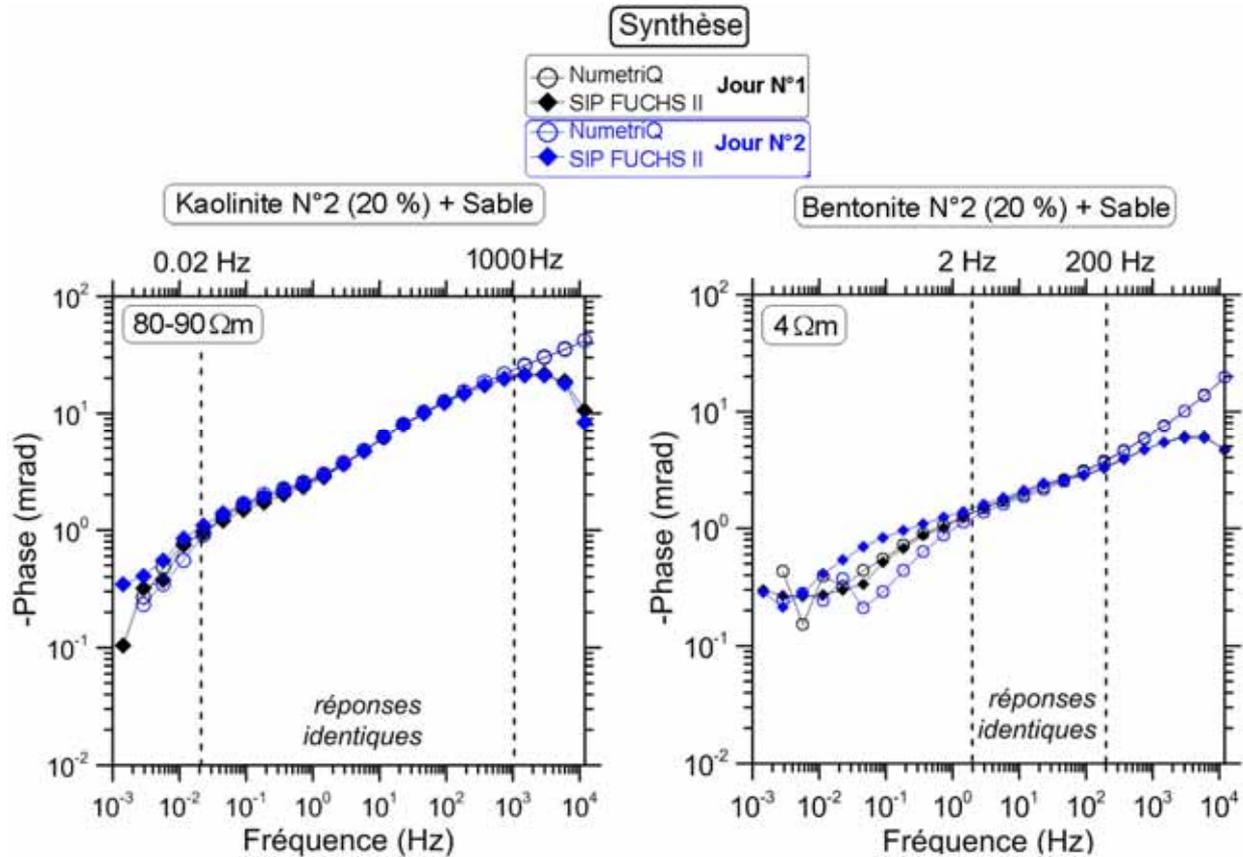


Figure III.19. Comparaison des réponses spectrales du SIP FUCHS et du NumetriQ à partir d'échantillons argilo-sableux saturés en eau déminéralisée (il s'agit de deux différentes argiles : Kaolinite & Bentonite).

En conclusion, la **Figure III.19** permet de synthétiser cette étude de comparaison des réponses spectrales des appareils réalisée à partir de différents mélanges argileux. Nous constatons que la gamme de fréquence de superposition des réponses est plus limitée (2 - 200 Hz) pour un mélange argileux de type bentonite que pour un mélange argileux de type kaolinite (0,02 - 1000 Hz) lorsque la teneur volumique en argile est de 20 %. Indépendamment du type d'argile utilisé, le SIP FUCHS présente des *chutes* de phase à hautes fréquences. Avec un échantillon conducteur ($4 \Omega.m$), la fréquence maximale, pour laquelle les réponses se superposent diminue vers les basses fréquences et la fréquence minimale pour laquelle les réponses se superposent, augmente vers les hautes fréquences (**Figure III.19**). En dessous de la fréquence minimale de superposition ($\leq 0,02$ Hz ou ≤ 2 Hz) nous observons que les réponses spectrales du mélange avec kaolinite sont beaucoup plus stables et répétitives sur deux jours.

3.1.5d. Différentes salinités d'électrolyte (SIP FUCHS et NumetriQ)

La saturation d'un mélange à partir d'un électrolyte salé a une influence sur la résistivité de l'échantillon étudié. Nous avons vu que les réponses spectrales des appareils de mesure et leur cohérence dépendaient à la fois de la teneur en argile et de la minéralogie (**sections 3.1.5abc**). En fonction des résultats acquis à la suite de ces études, nous avons visé à étudier les réponses PPS à partir d'un échantillon argilo-sableux préparé avec de la bentonite. Nous avons fixé une teneur optimale pour laquelle lorsqu'on saturait les échantillons par des électrolytes de différentes salinités, la résistivité de l'échantillon restait au dessus de la sensibilité des appareils. Nous avons pour objectif de contrôler la cohérence des réponses à partir d'un mélange avec de la bentonite saturée à des salinités d'électrolyte variées. La teneur en argile des mélanges choisie pour cette étude correspond à 5 % en volume. Les mesures ont duré deux jours. La saturation des mélanges a été assurée à partir d'eau déminéralisée et d'électrolyte de conductivités : $\sigma_{\omega} = 0,1824 \text{ mS/cm}$, et $1,8093 \text{ mS/cm}$. Les résistivités complexes moyennées sur la fréquence sont de l'ordre de [6-9 $\Omega.m$]. Les **Figures III.20-21** présentent les spectres de phase (mrad) aux premier et deuxième jours, des échantillons argilo-sableux saturés par des électrolytes de différentes salinités.

Le premier jour, l'échantillon saturé en eau déminéralisé présente une gamme de fréquence limitée où les réponses des appareils sont identiques (3 - 1000 Hz). Le mélange saturé par un électrolyte de salinité $\sigma_{\omega} = 0,1824 \text{ mS/cm}$ a montré une cohérence sur une gamme de fréquence légèrement plus importante (0,05 - 1000 Hz). Au-delà, lorsque la conductivité de l'électrolyte augmenta d'un facteur 10, la bande de fréquences de superposition des réponses se réduisit à (0,1 - 1000 Hz).

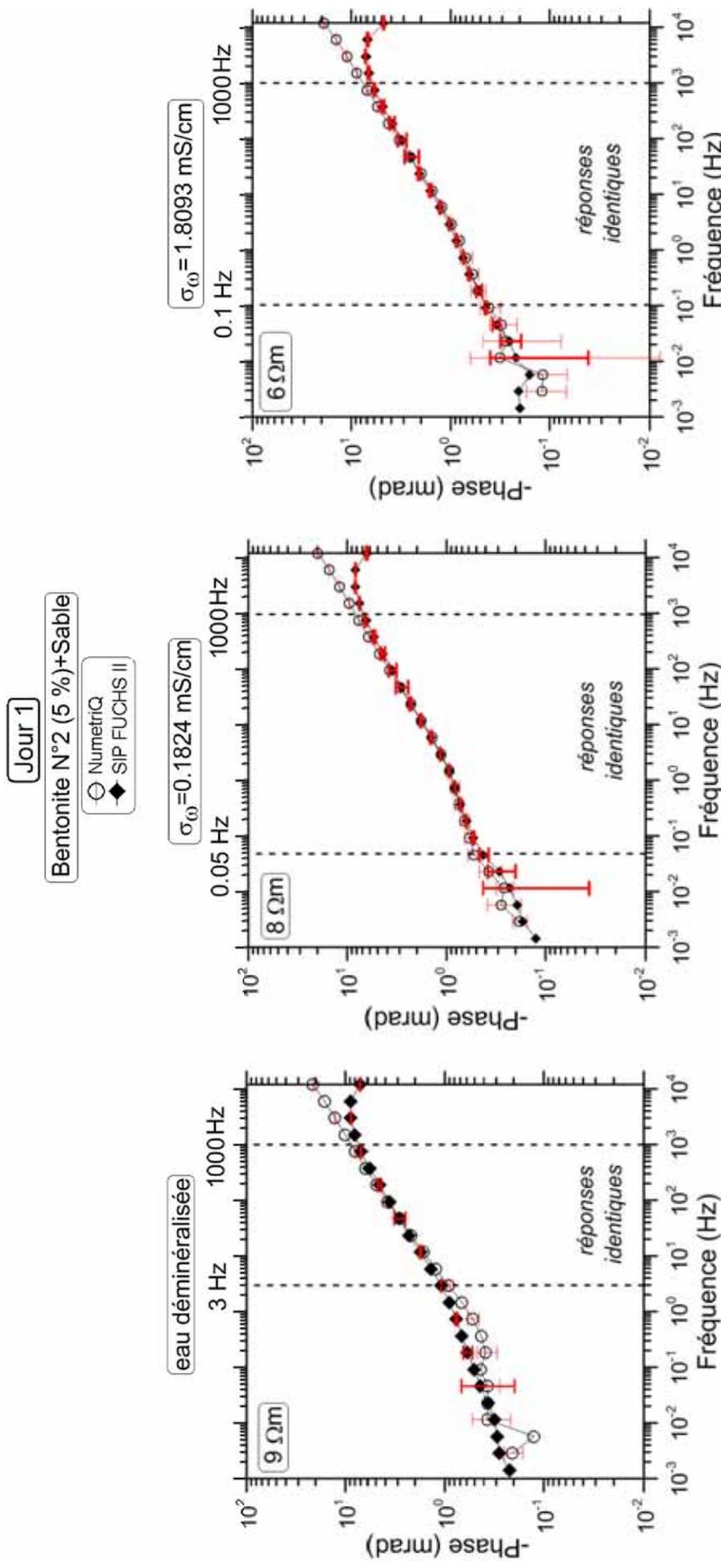


Figure III.20. Etude des réponses spectrales SIP FUCHS et NumetriQ en fonction des électrolytes saturant les échantillons argilo-sableux le premier jour (eau déminéralisée, puis en électrolytes de conductivité : $\sigma_{\omega} = 0,1824 \text{ mS/cm}$, $1,8093 \text{ mS/cm}$).

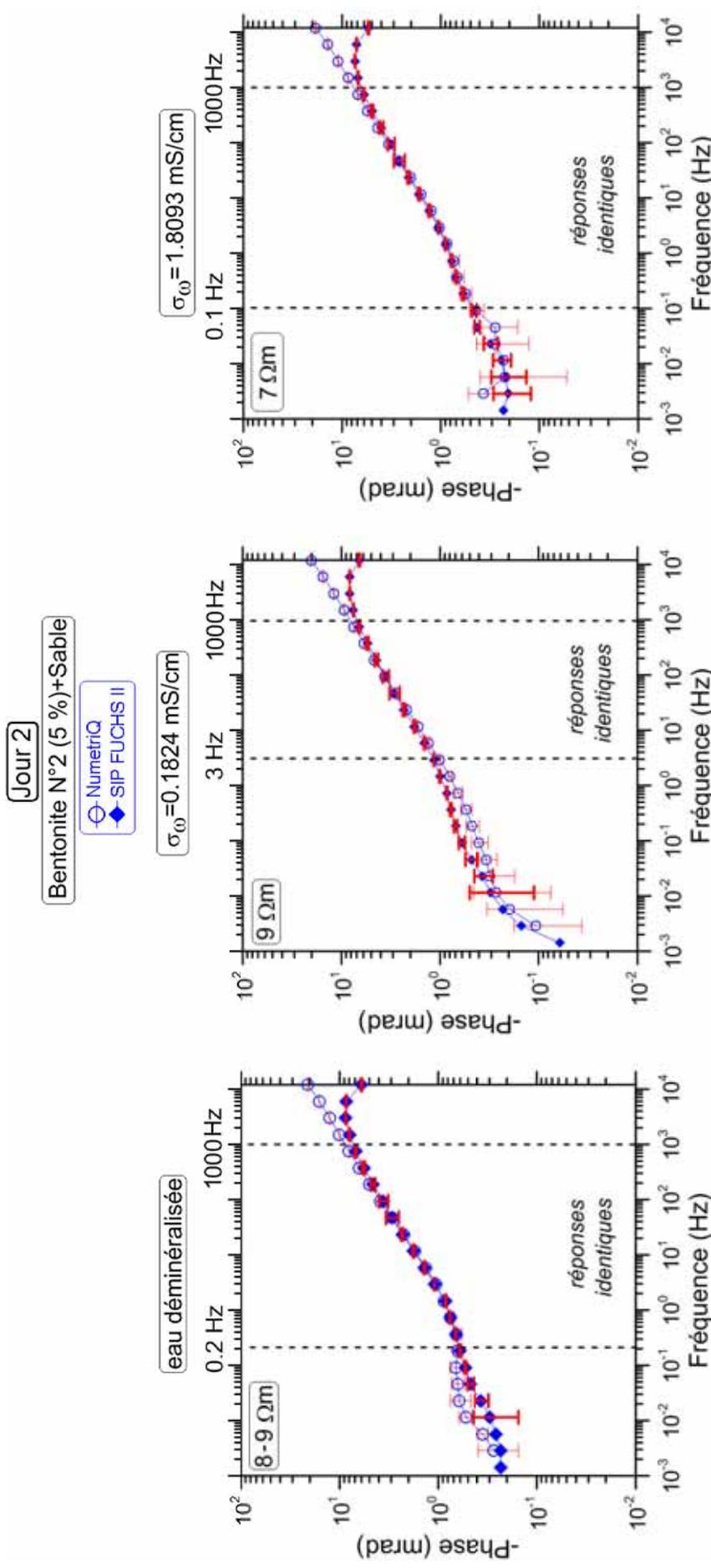


Figure III.21. Etude des réponses spectrales SIP FUCHS et NumetriQ en fonction des électrolytes saturant les échantillons argilo-sableux le premier jour (eau déminéralisée, puis en électrolytes de conductivité : $\sigma_{\omega} = 0,1824 \text{ mS/cm}$, $1,8093 \text{ mS/cm}$).

Étudions maintenant les résultats de l'expérience du deuxième jour (**Figure III.21**). La variation de la bande de fréquence de superposition des réponses des différents appareils concerne uniquement les échantillons saturés en eau déminéralisée et en électrolyte de conductivité $\sigma_{\omega} = 0,1824 \text{ mS/cm}$. La réponse de l'échantillon saturé en eau déminéralisée semble plus stable au deuxième jour où les résistances de contact des électrodes ont été mieux assurées. Nous observons la superposition des réponses des appareils à partir d'une fréquence minimale plus basse (0,2 Hz) que le premier jour. Toutefois, concernant l'échantillon de conductivité $\sigma_{\omega} = 0,1824 \text{ mS/cm}$, la bande de fréquence où les réponses se superposent est réduite, la fréquence minimale étant décalée vers les hautes fréquences.

En conclusion, il n'est pas évident de généraliser la cohérence des réponses en fonction de la salinité de l'électrolyte à cause des variations non systématiques de la bande de fréquence où les réponses se superposent. Néanmoins, la cohérence des réponses obtenues à partir de l'échantillon saturé avec électrolyte la plus salée ($\sigma_{\omega} = 1,8093 \text{ mS/cm}$) est la même les deux jours.

3.1.6. Synthèse et conclusion

Dans cette section, nous avons étudié les réponses instrumentales des appareils de mesure, les réponses des différents types de contact « échantillon-électrode », l'influence de la dimension de l'échantillon et la cohérence des réponses instrumentales à partir d'un échantillon commun en fonction des différents teneurs et de la minéralogie d'argile ainsi que de la salinité d'électrolyte. Les résultats de ces études méthodologiques préliminaires révèlent les points suivants qui vont guider le volet expérimental en laboratoire ultérieur.

Concernant l'étude menée à partir des résistances pures (1 Ω à 10 k Ω), deux difficultés ont été observées dans les réponses instrumentales. Le problème de « *réjection du mode commun* » intervient pour des résistances basses (i.e. 1 Ω). Le problème de l'*effet RC* intervient pour les résistances élevées (i.e. > 1 k Ω). L'effet RC est dépendant de la fréquence de mesure, de la résistance de contact et aussi de la capacité d'entrée de l'appareil de mesure (avec une relation linéaire). L'appareil SIP FUCHS est plus sensible au problème de « *réjection du mode commun* » alors que le NumetriQ est plutôt sensible à l'*effet RC*. Afin d'éviter et/ou réduire l'influence de ces deux problèmes liées aux appareillages, nous privilégierons :

- les fréquences basses (i.e. 93,75 Hz ou 187,41 Hz) pour des échantillons conducteurs (1 Ω).
- pour des échantillons plus résistants (< 1 k Ω), les fréquences plus hautes (i.e. 1500 Hz ou 2016,5 Hz).

- Cependant, quelque soient l'appareil de mesure et la résistance de l'échantillon, (dans la limite des fréquences concernées) le déphasage lié à ces éventuels problèmes sera au maximum de l'ordre de $\pm 1 \text{ mrad}$ d'erreur ce qui reste raisonnable.

Concernant l'étude menée au niveau du contact échantillon-électrode, nous avons observé qu'en présence d'un milieu conducteur (10Ω) et grossier, le contact direct entre échantillon et électrode n'est pas une bonne solution. Afin d'assurer un bon rapport signal/bruit, il est nécessaire de passer par un géomatériau intermédiaire entre l'échantillon et l'électrode. Cette technique permet d'obtenir des signaux répétitifs. Néanmoins, ce constat dépend des propriétés du géomatériau étudiée. Pour des mesures sur échantillon argilo-sableux on est en présence d'un matériau à grains fins. Nous n'aurons donc pas de besoin *a priori* d'intermédiaire entre l'échantillon et les électrodes. Toutefois, la résistance de contact sera toujours un paramètre important à respecter lors des mesures.

Concernant l'étude du porte-échantillon, lorsque la hauteur de l'échantillon est de 10 cm dans le porte-échantillon (30 cm de hauteur, électrodes à 5 cm de hauteur), les déphasages obtenus ont été les moins élevés. Dans la suite, nous adopterons 10 cm d'hauteur pour tous les mélanges.

Concernant l'étude des appareils à partir d'un échantillon commun, les trois appareils de mesure ont montré généralement des réponses répétitives permettant une validation croisée des appareils et confirmant aussi l'homogénéité des mélanges préparés. Néanmoins, la répétitivité des mesures avec le SIP FUCHS est légèrement affectée par la sensibilité de l'appareil à la résistivité de l'échantillon qui est fonction de sa teneur en argile (i.e. 1% induisant de très faibles déphasages). Indépendamment de la teneur en argile, le NumetriQ n'a pas montré de problème au niveau de la répétitivité. Quant au SECR-1, les réponses obtenues ont été répétitives mais systématiquement affectées par l'effet instrumental (chute de phase) à partir de 1000 Hz pour les teneurs élevées en argile 100% et 20% (Kaolinite). Lorsque la teneur en argile (1%) diminue les chutes se manifestent à partir d'une fréquence plus basse (i.e., 122 Hz). Dans ce cas, nous proposons :

- dans un premier temps, de multiplier le nombre de mesures acquises afin d'améliorer le rapport signal/bruit (avec le SIP FUCHS),
- dans un deuxième temps, de limiter la gamme d'acquisition lors de l'emploi du SECR-1.

La cohérence des réponses instrumentales (SIP FUCHS et NumetriQ) pour des échantillons argilo-sableux préparés avec deux argiles différentes (20% , Bentonite,

Kaolinite) a montré que la bande de fréquence de superposition des réponses est plus limitée (1 - 200 Hz) avec une argile de type bentonite qu'avec une argile de type kaolinite (0,02 - 1000 Hz). Ceci est lié à la sensibilité du SIP FUCHS plus élevée lorsqu'il s'agit d'échantillons plus conducteurs comme la bentonite.

Enfin, nous avons étudié la cohérence de réponses instrumentales (SIP FUCHS-NumetriQ) et leur stabilité dans le temps avec des échantillons saturés (bentonite, 5 %) par des électrolytes de différentes salinités. Nous concluons qu'il n'est pas évident d'établir un comportement général du fait des variations non systématiques de la bande de fréquence de superposition d'un jour à l'autre. Néanmoins, la bande de fréquence de superposition de l'échantillon saturé en électrolyte plus concentrée ($\sigma_{\omega} = 1,8093$ mS/cm) est indépendante de la durée d'acquisition. Ce résultat est important.

- Rappelons aussi l'intérêt d'une multiplication du nombre de mesure sur un échantillon, que nous proposons plutôt de réaliser sur un nombre de jours limité.

En conclusion, nous avons présenté les études méthodologiques préliminaires menées en laboratoire avec les appareils de mesure dont nous disposons. Il aurait pu être plus intéressant de mener des mesures parallèles avec les trois appareils à partir d'un échantillon commun pour approfondir la comparaison. Malheureusement, ceux-ci n'étaient pas disponibles tous au même moment.

3.2. Matériaux et protocole expérimental

3.2.1. Définition des matériaux utilisées

Les échantillons synthétiques ont été préparés à partir de trois composants : (i) des argiles en poudre de différentes minéralogies : kaolinite et bentonite, (ii) du sable et (iii) l'électrolyte. Le choix des minéraux argileux a pour but d'évaluer l'influence de la minéralogie de ces géomatériaux sur les mesures électromagnétiques aux basses fréquences. La saturation des échantillons a été assurée dans un premier temps avec de l'eau déminéralisée, dans un deuxième temps avec de l'eau salée préparée à partir du chlorure de sodium (NaCl). Les matériaux utilisés sont classés de la manière suivante : **(a) Kaolinite N° 1, (b) Kaolinite N°2, (c) Bentonite N°1, (d) Bentonite N°2, (e) Sable Fontainebleau, (d) Electrolyte**. Lors des études de caractérisation, nous avons observé de légères différences de propriétés physiques entre les argiles utilisées que nous avons par conséquent numérotées. Pour mieux caractériser les constituants des échantillons une série d'études

minéralogiques, petrophysiques et physico-chimiques a été réalisée sur les constituants eux-mêmes et sur le mélange après préparation.

1. *Mise en étuve* : détermination de la porosité et de la teneur en eau massique (à partir des échantillons préparés),
2. *Diffraction des rayons X (DRX)* : détermination de la minéralogie (à partir des poudres d'argiles et du sable),
3. *Méthode de Brunauer, Emmett et Teller (BET)* : détermination de la surface spécifique (à partir des poudres d'argiles),
4. *Pycnomètre* : détermination de la densité des grains (à partir des poudres d'argiles),
5. *Granulométrie laser* : détermination de la distribution des tailles de grains (à partir des poudres d'argiles),
6. *Capacité d'échange cationique (CEC)* : détermination des propriétés physico-chimiques (à partir des poudres d'argiles).

Ces diverses méthodes de caractérisation ont été réalisées dans les laboratoires suivants : (1) Laboratoire UMR Sisyphe (UMPC), (2) Laboratoire de géologie du Muséum National d'Histoire Naturelle, (3,4) Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), (5) INRA Orléans, (6) SARL Etudes Recherches Matériaux (ERM) à Poitiers. Nous présentons les résultats de trois principales méthodes de caractérisation, nécessaires lors des interprétations ultérieures.

Diffractions des rayons X : Quatre échantillons d'argiles en poudre (*Kaolinite N° 1,2 ; Bentonite N° 1,2*) et trois échantillons de sable ont été fournis afin de déterminer la minéralogie et les impuretés présentes dans ces échantillons. Les analyses de DRX ont été réalisées en deux étapes. Dans un premier temps, l'échantillon brut ; dans un deuxième temps, la fraction argileuse ($<2 \mu\text{m}$) ont été étudiées. La diffractométrie-X des échantillons bruts a été effectuée sur un diffractomètre Siemens D500 (40 kV, 30 mA avec une anticathode en cuivre : rayonnement K alpha Cu). L'intervalle angulaire a été balayé entre 2 et $64^\circ 2\theta$ Cu K α avec un pas de $0,02^\circ$ pour un temps de comptage de 2 s par pas. Les estimations semi-quantitatives (qualitatives) des différents minéraux des échantillons bruts ont été faites grâce au logiciel EVA©, et à la base de données PDF2 de l'ICDD (International Centre for Diffraction Data) qui donne les valeurs I/Icor des principaux minéraux (Bartier & Blanc-Valleron, 2009)⁽⁴⁾.

⁽⁴⁾ Bartier, D., & Blanc-Valleron, M., (2009) Rapport de la caractérisation par diffraction des rayons X, Ref commande : I30 / 11017750, 26 Mars 2009.

Pour l'étude de la fraction argileuse ($< 2 \mu\text{m}$), la technique de préparation des échantillons utilisée au Département d'Histoire de la Terre, CNRS-UMR 5143 « Paléobiodiversité et Paléoenvironnements est décrite en détail par [Holtzappel \(1985\)](#)⁽⁵⁾. Les dépôts obtenus sont analysés à l'aide d'un diffractomètre Siemens de type D500, muni d'une anticathode de cuivre. Les diffractogrammes sont enregistrés entre 2° et $40^\circ 2\theta$ Cu K α avec un pas de $0,02^\circ$, un temps de comptage de 4 s par pas. L'analyse diffractométrique de la fraction argileuse est basée sur la comparaison de trois diffractogrammes sur les pâtes (**annexe A5**):

- un essai à l'état naturel (N en vert) ;
- un essai sur une pâte saturée à l'éthylène glycol pendant 12 h sous vide afin de provoquer le gonflement de certains minéraux argileux (G en bleu) ;
- un essai sur une pâte chauffée à 490°C pendant 2h ; ce traitement provoque la destruction de la kaolinite et la déshydratation des minéraux smectitiques (C en rouge).

L'interprétation des diffractogrammes permet d'évaluer qualitativement et semi quantitativement la fraction argileuse. L'analyse qualitative se fonde sur la position des pics sur l'essai naturel et leurs modifications sur les essais glycolés et chauffés (déplacement et variation d'intensité). L'analyse semi-quantitative consiste à estimer l'abondance relative des minéraux argileux. Cette estimation, dont la marge d'erreur est de $\pm 5\%$, se fonde sur la hauteur des pics par rapport au bruit de fond stabilisé de l'essai glycolé ([Holtzappel, 1985](#)). Les diffractogrammes de la fraction argileuse des échantillons d'argiles et ceux des sables utilisées (analyses à partir des échantillons bruts) peuvent être trouvés en **annexe A5**. Les résultats de l'analyse minéralogique au niveau des différents échantillons de sables étudiées ont montré que les sables étaient peu différents, composés quasi exclusivement de quartz. On a retrouvé le même type d'impuretés d'un échantillon à l'autre (**annexe A5**). Les interprétations sur les échantillons d'argiles sont résumées aux **Tableaux III.10-11** où les résultats des autres analyses sur ces échantillons sont également introduits.

Méthode de Brunauer, Emmett et Teller (BET) : L'analyse de la surface spécifique a été effectuée par l'adsorption d'azote à l'aide du modèle BET sur l'appareil COULTER SA3100. Les échantillons analysés au cours de cette expérimentation correspondent uniquement aux argiles (*Kaolinite N^{1,2} et Bentonite N^{1,2} en forme de poudre*). Un dégazage (pendant 900 minutes à une température 150°C) est appliqué afin d'évacuer le contenu des pores de l'échantillon (air, eau) avant la réalisation des mesures.

⁽⁵⁾[Holtzappel, T., \(1985\)](#) *Les minéraux argileux : préparation, analyse diffractométrique et détermination*. Soc. Géol. Nord, Publ. 12, 136 pp.

Les surfaces spécifiques (m^2/g) obtenues par cette expérience sur les argiles sont résumées sur les **Tableaux III.10-11**. La *Bentonite N° 1* a montré une surface spécifique plus importante que les autres argiles.

Capacité d'échange cationique (CEC) : La CEC de l'échantillon a été mesurée selon la méthode de Jackson (1964)⁽⁶⁾ (acétate d'ammonium). Les particules argileuses possèdent une charge électrique négative (qui se décompose en charges liées à la structure « les charges permanentes » et en charges liées à la surface des cristaux « les charges variables ») qui se manifeste essentiellement lorsque ces particules sont en suspension dans l'eau. Les minéraux argileux ont donc la propriété d'adsorber de façon réversible des cations (H^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , Al^{3+}). Cette charge est dépendante (entre autres) du pH. La capacité d'échange cationique est égale au nombre de milliéquivalents grammes de cations susceptibles d'être adsorbés de façon réversible par 100 g de matériau argileux (sec à 105 °C) à pH 7.

Son expression est donc donnée en milliéquivalents pour 100 g de matériau (meq/100 g) ou en centimoles de charge par kg de matériau (c.moles.kg⁻¹). Elle correspond à la somme des charges variables et des charges permanentes (Bétin & Bouchet, 2009)⁽⁷⁾. L'objectif de la méthode est la mesure de la quantité d'ions échangeables d'un matériau dans des conditions données. Le principe de la méthode est basé sur une libération des cations échangeables par une solution d'acétate d'ammonium puis sur l'évaluation de la quantité des ions ammonium retenus par l'argile par distillation type Kjeldahl contre de la magnésie. Le protocole est établi à partir de la méthodologie définie par Jackson. Les résultats sont donnés sur les **Tableaux III.10-11**. Selon ces tableaux, les ordres de grandeurs des C.E.C. mesurées sont en accord avec les minéralogies supposées au vu des appellations des quatre échantillons. L'échantillon de la *Bentonite N° 2* est remarqué par une capacité d'échange cationique beaucoup plus importante que les autres échantillons.

⁽⁶⁾ Jackson, M.L., (1964) Soil chemical analysis, Prentice Hall Inc., New Jersey, USA. (3^{ème} édition).

⁽⁷⁾ Bétin, N., & Bouchet, A., (2009) Rapport des résultats de mesure de la CEC sur cinq échantillons d'argile, ERM 09 094 NBE 162 (AFF 09-115 ; lot référencé 09-077).

Tableau III.10. Analyses (1) DRX effectuées à partir des échantillons bruts et de la fraction argileuse, (2) BET et (3) CEC des échantillons de Kaolinite (N°1 et N°2) en poudre .

1. Diffraction des rayons X	Kaolinite N°1	Kaolinite N°2
<i>Echantillon brut</i>	La kaolinite est dominante, accompagnée d'un peu de muscovite (et/ou d'illite), de quartz et d'un feldspath potassique de type microcline.	La kaolinite est dominante, accompagnée d'un peu de muscovite (et/ou d'illite) et de quartz.
<i>Comparaison entre kaolinites à partir de l'analyse des échantillons bruts</i>	Les kaolinites analysées sont peu différentes, l'échantillon Kaolinite N° 2 semble toutefois un peu plus pur.	
<i>Fraction argileuse</i>	La fraction < 2 µm est très largement dominée par de la kaolinite (80 %) , les 20 % restant sont à attribuer pour 5 % à de la muscovite et à de l'illite (épaulement du pic vers les petits angles correspondant à la présence d'illite), le solde de 15 % à de la smectite (pic très large centré vers 14 Å au naturel, gonflement à 16,9 Å au glycol et écrasement à 10 Å au chauffage).	la fraction < 2 µm est très largement dominée par de la kaolinite (95 %) , les 5 % restant sont à attribuer à de la muscovite et à de l'illite (épaulement du pic vers les petits angles correspondant à la présence d'illite).
<i>Comparaison entre kaolinites à partir de la fraction argileuse</i>	L'échantillon Kaolinite N°1 montre quand à lui la présence de smectites	
2. Surface spécifique (m²/g)	9.4	12.6
3. CEC (meq/100 g)	~ 0.0	~ 0.0

Tableau III.11. Analyses (1) DRX effectuées à partir des échantillons bruts et de la fraction argileuse, (2) BET et (3) CEC des échantillons de Bentonite (N°1 et N°2) en poudre .

1. Diffraction des rayons X	Bentonite N°1	Bentonite N°2
<i>Echantillon brut</i>	L'échantillon n'est pas pur, composé de smectite alumineuse de type beidellite avec beaucoup d'opale plus ou moins bien cristallisée, du quartz, un peu de kaolinite et un peu de feldspath de type sanidine.	L'échantillon n'est pas pur, composé de smectite alumineuse de type beidellite avec beaucoup d'opale plus ou moins bien cristallisée, du quartz, du gypse, un peu de feldspath de type sanidine.
<i>Comparaison entre bentonites à partir de l'analyse des échantillons bruts</i>	Les bentonites analysées semblent correspondre à du matériel de même type (mélange beidellite + opale + quartz + feldspath + diverses impuretés). Qualitativement, ils diffèrent principalement par la plus grande abondance de la kaolinite dans l'échantillon N° 1 et par la plus grande abondance du gypse et du quartz dans l'échantillon N°2.	
<i>Fraction argileuse</i>	La fraction < 2 µm est très largement dominée par de la smectite (95 %) et de la kaolinite (5 %) . La smectite est une smectite sodique soit une Na-Montmorillonite avec 1 couche d'eau soit une beidellite.	La fraction < 2 µm est très largement dominée par de la smectite (95 %) et de la kaolinite (5 %) . On note la présence importante de silice biogénique de type cristobalite, de quartz et de feldspath potassique. La smectite est une smectite calci-sodique très certainement du type Ca-Na-Montmorillonite.
<i>Comparaison entre bentonites à partir de la fraction argileuse</i>	La fraction < 2 µm des deux échantillons de bentonite présentent à la fois des similitudes mais également des différences. La chimie de ces deux smectites semblerait être différente. Par ailleurs, il est possible de noter la présence dans les deux échantillons de cristobalite et de quartz + K feldspaths dans l'échantillon N°2.	
2. Surface spécifique (m²/g)	30.9	27.65
3. CEC (meq/100 g)	34	44.2

En conclusion, ces analyses ont permis de connaître les propriétés physiques des matériaux envisagés et vont permettre ultérieurement d'approfondir les interprétations. Nous présentons maintenant le protocole de détermination des constituants d'un mélange artificiel utilisé pour les mesures en laboratoire.

3.2.2. Détermination quantitative des constituants d'un mélange fabriqué

La détermination quantitative des constituants d'un mélange se base sur les tests expérimentaux réalisés sur de faibles quantités d'échantillon. Ceci a pour objectif de vérifier la saturation du mélange (présence des phases solide et liquide uniquement) préparé et d'estimer sa porosité.

- Cas des mélanges « argile + eau » :

Les quantités fixes utilisées pour le mélange à petite échelle sont : $V_{eau} = 100 \text{ cm}^3$ d'eau et $V_{argile} = 100 \text{ cm}^3$ d'argile (ou parfois 50 cm^3 de chacune des phases). La connaissance des densités théoriques en grain de l'argile ρ_{argile} permet de définir la masse d'argile nécessaire M_{argile} . Une fois le mélange test préparé, nous vérifions si les quantités initiales sont suffisantes pour une bonne saturation (présence d'une couche de molécule d'eau à la surface de l'échantillon). Si c'est le cas, la masse totale M_{totale} et le volume total V_{total} étant connus (à partir du bécher) nous pouvons définir la masse volumique de l'échantillon test (M_{total}/V_{total}). Ces mesures facilitent le calcul de la porosité (ϕ) à l'aide de la formule suivante :

$$\phi = \frac{V_{eau}}{V_{total}} = \frac{M_{eau}}{M_{totale}} = \frac{M_{eau}}{M_{totale}} \times \rho_{total} \quad \text{équation (III.2)}$$

$$\rho_{total}$$

Une fois toutes ces grandeurs définies, la détermination des quantités du mélange à grand échelle est aisée. Ce mélange aura un volume dans le porte-échantillon fixé limité à 10 cm d hauteur (**voir section 3.1.4a**). D'après la dimension du porte-échantillon, l'échantillon remplissant une hauteur de 10 cm correspond à un volume égale à $V \sim 2833,8 \text{ cm}^3$. Connaissant la masse volumique de l'échantillon-test et le volume total fixé de l'échantillon, nous pouvons calculer sa masse totale. La masse de l'eau est alors calculée par la formule précédente, la masse d'argile à utiliser alors est accessible par simple soustraction.

- Cas des mélanges « argile + sable + eau » :

Nous estimons un pourcentage volumique de la porosité, sachant que l'échantillon est saturé. Prenons pour exemple d'un mélange bentonite (1 %) + sable saturé en eau déminéralisée. Considérons que :

- l'eau occupera 40 % du volume total
- la phase solide 60 % du volume total avec 1 % de bentonite et 99 % de sable

Le volume total étant connu et fixe ($\sim 2833,8 \text{ cm}^3$), le volume d'eau (donc la masse d'eau) et le volume de la phase solide sont déterminés. Connaissant les volumes des phases solides et à l'aide des densités de grain volumique du sable ($2,65 \text{ g/cm}^3$) et de l'argile (bentonite : $2,77 \text{ g/cm}^3$, kaolinite : $2,6 \text{ g/cm}^3$), disponibles dans la littérature, nous arrivons à calculer les masses nécessaires. Afin de vérifier la porosité estimée précédemment, l'expérience est réitérée avec un échantillon-test pour un volume plus faible ($50\text{-}100 \text{ cm}^3$).

3.2.3. Protocole de mesure

Une fois les quantités des constituants du mélange déterminées, les mélanges ont été préparés en deux temps. Dans un premier temps, la phase solide (argile+sable) a été mélangée à sec à partir d'un mixeur électrique. Dans un deuxième temps, l'eau déminéralisée a été ajoutée progressivement au mélange solide directement dans le porte-échantillon (colonne) cylindrique en PVC (**Figure III.10**). Pour les électrolytes concentrés, le chlorure de sodium (NaCl) a été directement ajouté à l'eau déminéralisée. Une mesure de conductivité électrique a été réalisée avant l'ajout de la solution à la phase solide à l'aide des conductivimètres disponibles (Multi 340i WTW).

Une fois le mélange préparé dans le porte-échantillon, quatre électrodes impolarisables de Cu/CuSO_4 (avec une solution saturée), deux pour l'injection de courant et deux pour la mesure de différence de potentiel, ont été installées dans les quatre trous percés à 5 cm de haut du porte-échantillon. La masse de l'échantillon préparé, la température ambiante et l'humidité ont été notées avant le démarrage des mesures. Les mesures ont été exécutées immédiatement après la fabrication des échantillons. Le couvercle du porte-échantillon est gardé hermétiquement fermé au cours des mesures. Les mesures PPS ont été réalisées à l'aide des trois différents appareils présentés précédemment : (a) le SIP-FUCHS, (b) le NumetriQ et (c) le SECR-1. La gamme de fréquence des mesures correspond à l'intervalle [1 mHz - 12 kHz]. Les mesures ont été répétées plusieurs fois par jour pendant 5 jours afin d'améliorer la mesure par répétition. La

date de fabrication (et donc de mesure), la composition des échantillons, la concentration de l'électrolyte, la durée de l'expérience, le nombre de mesure par jour, la température et l'humidité sont détaillés à l'**annexe A6**.

Lors des mesures expérimentales réalisées au laboratoire, au total 44 échantillons ont été préparées. Ces échantillons comportent des teneurs volumiques en argile de (*différentes minéralogies*) de 100 %, 20 %, 5 % et 1 % et sont saturés en eau déminéralisée ou en eau salée. Une synthèse des échantillons fabriqués lors de ces expériences peut être trouvée dans le **Tableau III.12 (voir aussi l'annexe A6)**.

Tableau III.12. Bilan synthétique des échantillons argilo-sableux préparés (* la mesure n'a pas été effectuée en raison de la sensibilité de l'appareil pour une gamme de conductivité importante, --- déstockage du matériau utilisé).

Argile : Kaolinite N°1				
<i>Pourcentage volumique en argile dans le mélange</i>	<i>Salinité de l'électrolyte</i>			
	<i>eau déminéralisée</i>	<i>0,1 g/l</i>	<i>1 g/l</i>	<i>10 g/l</i>
100	√	√	√	√
20	√	√	√	√
5	√	---	---	---
1	√	√	√	√

Argile : Kaolinite N°2				
<i>Pourcentage volumique en argile dans le mélange</i>	<i>Salinité de l'électrolyte</i>			
	<i>eau déminéralisée</i>	<i>0,1 g/l</i>	<i>1 g/l</i>	<i>10 g/l</i>
100	√	√	√	*
20	√	√	√	*
5	√	√	√	*
1	√	√	√	*

Argile : Bentonite N°1				
<i>Pourcentage volumique en argile dans le mélange</i>	<i>Salinité de l'électrolyte</i>			
	<i>eau déminéralisée</i>	<i>0,1 g/l</i>	<i>1 g/l</i>	<i>10 g/l</i>
100	√	√	---	---
20	√	---	---	---
5	√	---	---	---
1	√	---	---	---

Argile : Bentonite N°2				
<i>Pourcentage volumique en argile dans le mélange</i>	<i>Salinité de l'électrolyte</i>			
	<i>eau déminéralisée</i>	<i>0,1 g/l</i>	<i>1 g/l</i>	<i>10 g/l</i>
100	√	√	*	*
20	√	√	√	√
5	√	√	√	√
1	√	√	√	√

3.3. Résultats expérimentaux

Dans un premier temps, les résultats expérimentaux vont être présentés à partir des spectres d'amplitude et de phase afin de juger les conditions de mesure (i.e. *résistivité de l'échantillon, effet instrumental de l'appareil*). Dans un deuxième temps, les spectres de la partie réelle de la conductivité σ' et la partie imaginaire de la conductivité σ'' peuvent être retrouvés. Nous rappelons que la σ' est associée aux phénomènes de conduction ohmique alors que la σ'' est liée aux phénomènes de polarisation (conservation d'énergie). La grandeur σ' présente une relation linéaire avec la surface spécifique et la capacité d'échange cationique (Tabbagh & Cosenza, 2007).

3.3.1. Influence de la teneur en argile

Dans le cadre d'une étude de l'influence de la teneur en argile dans un mélange, nous nous intéressons, dans un premier temps aux résultats spectraux obtenus à partir des mélanges argilo-sableux préparés avec la kaolinite (*argile simple*), dans un deuxième temps, à ceux des mélanges argilo-sableux préparés avec la bentonite (*argile chimiquement plus active*). Les teneurs volumiques en argile étudiées sont les suivantes : [100 %, 20 %, 5 %, 1 %]. Ces teneurs ont été choisies en considérant des teneurs extrêmes (100 %, 1 %) et intermédiaires (20 %, 5 %). Pour l'intervalle entre 100 % et 20 %, la littérature indique qu'au-delà de 50 % du pourcentage en argile dans un mélange, la réponse dépend plutôt de l'argile et pas de la quantité de sable (Telford *et al.*, 1990).

3.3.1a. Influence de la teneur en argile de type kaolinite (argile non-gonflant)

Nous présentons les résultats de cette étude sur la **Figure III.22** avec les spectres d'amplitude et de phase de deux échantillons de Kaolinite dite N° 1-2 respectivement.

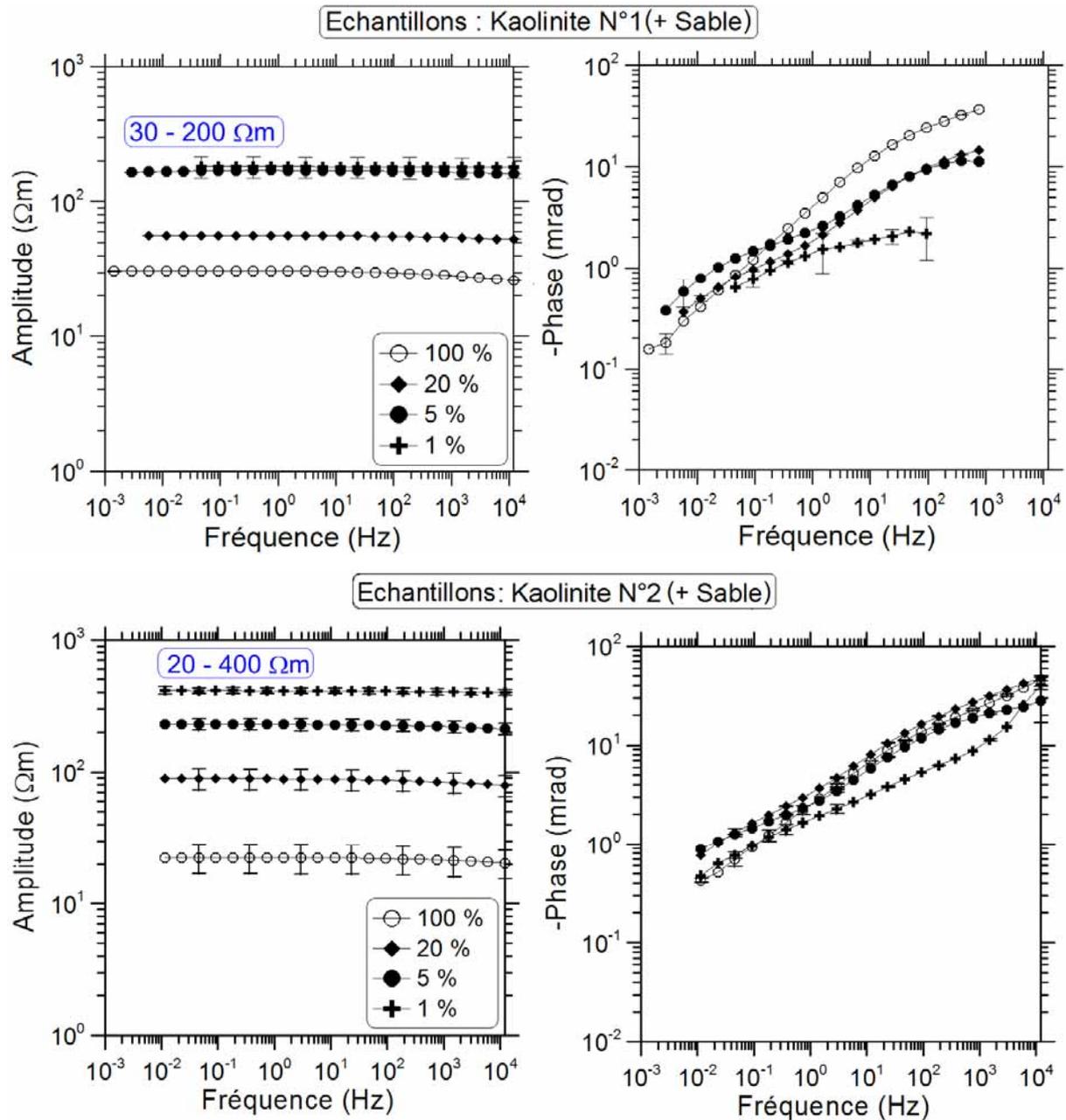


Figure III.22. Spectres d'amplitude ($\Omega \cdot m$) et de phase (mrad) pour différentes teneurs en argile. Les échantillons sont composés de Kaolinite (N° 1 et N° 2) et de Sable (saturation en eau déminéralisée).

Les spectres d'amplitude, **Figure III.22**, révèlent que les résistivités des échantillons préparés avec les Kaolinites N° 1 et N° 2 sont comprises entre [20 et 400 $\Omega \cdot m$]. *A priori*, d'après les résultats des études préliminaires (**voir section 3.1.2**), les appareils de mesure dont on dispose sont bien adaptés à cette gamme de résistivité. Pour les spectres de phase, **Figure III.22**, nous notons une difficulté de mesure pour le mélange à 1 % de teneur volumique en argile (*Kaolinite N°1*). Nous expliquons cette difficulté par la teneur importante en sable. Rappelons que les sables purs présentent des faibles valeurs de déphasage (dépendant de la distribution de la taille des grains). La synthèse de ce travail sur deux

différents échantillons d'argile (+ sable) et l'interprétation physique de l'influence de la teneur en argile dans un mélange vont être discutées à partir de la **Figure III.23** où sont représentés les paramètres spectraux (σ' et σ'').

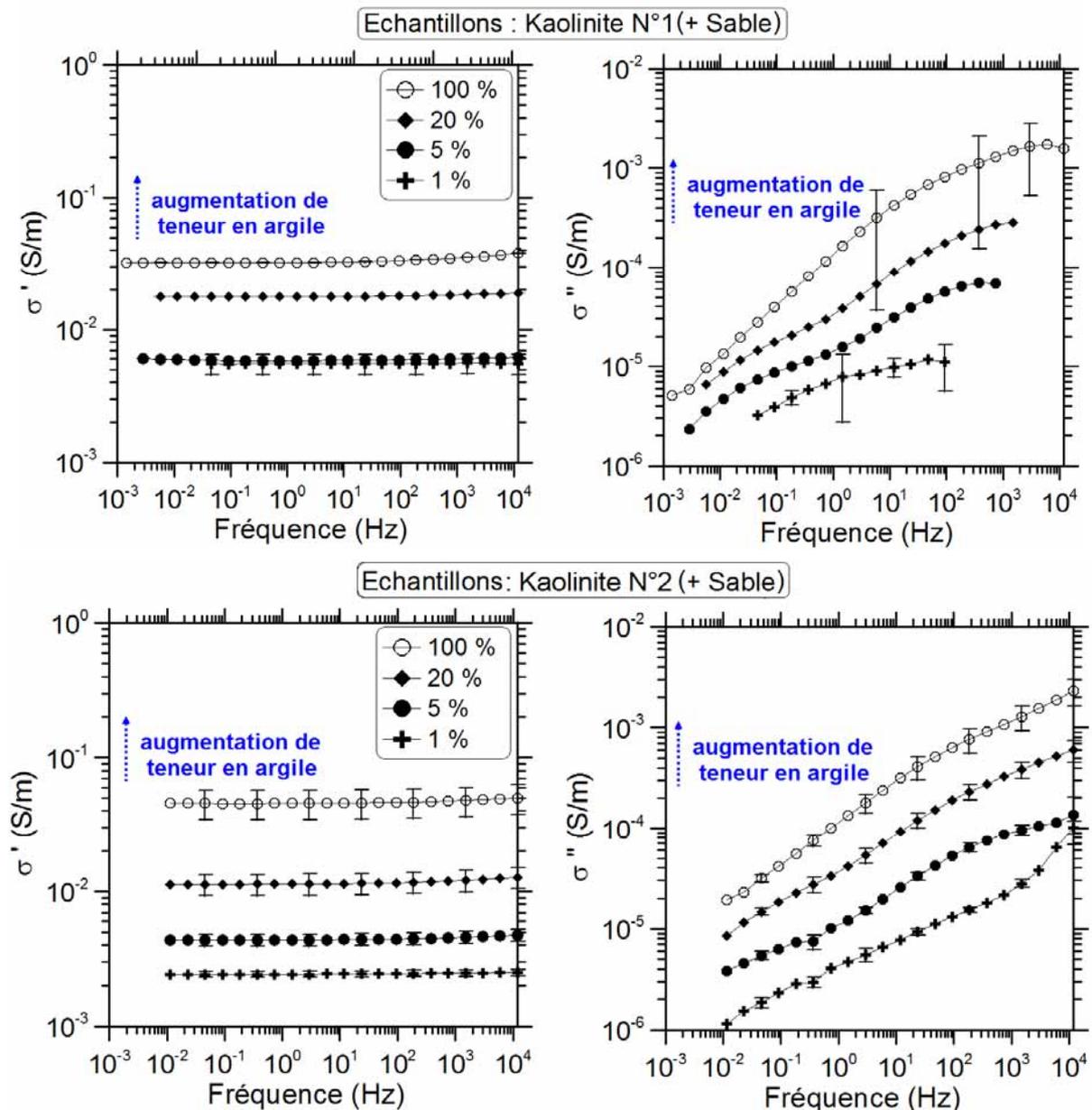


Figure III.23. Spectres des parties réelle σ' et imaginaire σ'' de la conductivité complexe pour différentes teneurs en argile. Les échantillons sont composés de Kaolinite (N°1 et/ou N°2) et de Sable (saturation en eau déminéralisée).

Les interprétations générales vont être ultérieurement présentées après l'introduction du même type d'étude sur des échantillons argileux de type Bentonite.

3.3.1b. Influence de la teneur en argile de type bentonite (argile gonflante)

Dans un premier temps, étudions les conditions de mesures à partir de la **Figure III.24** illustrant les spectres d'amplitude et de phase des mélanges argilo-sableux pour deux échantillons de Bentonite notés respectivement *N°1* et *N°2*.

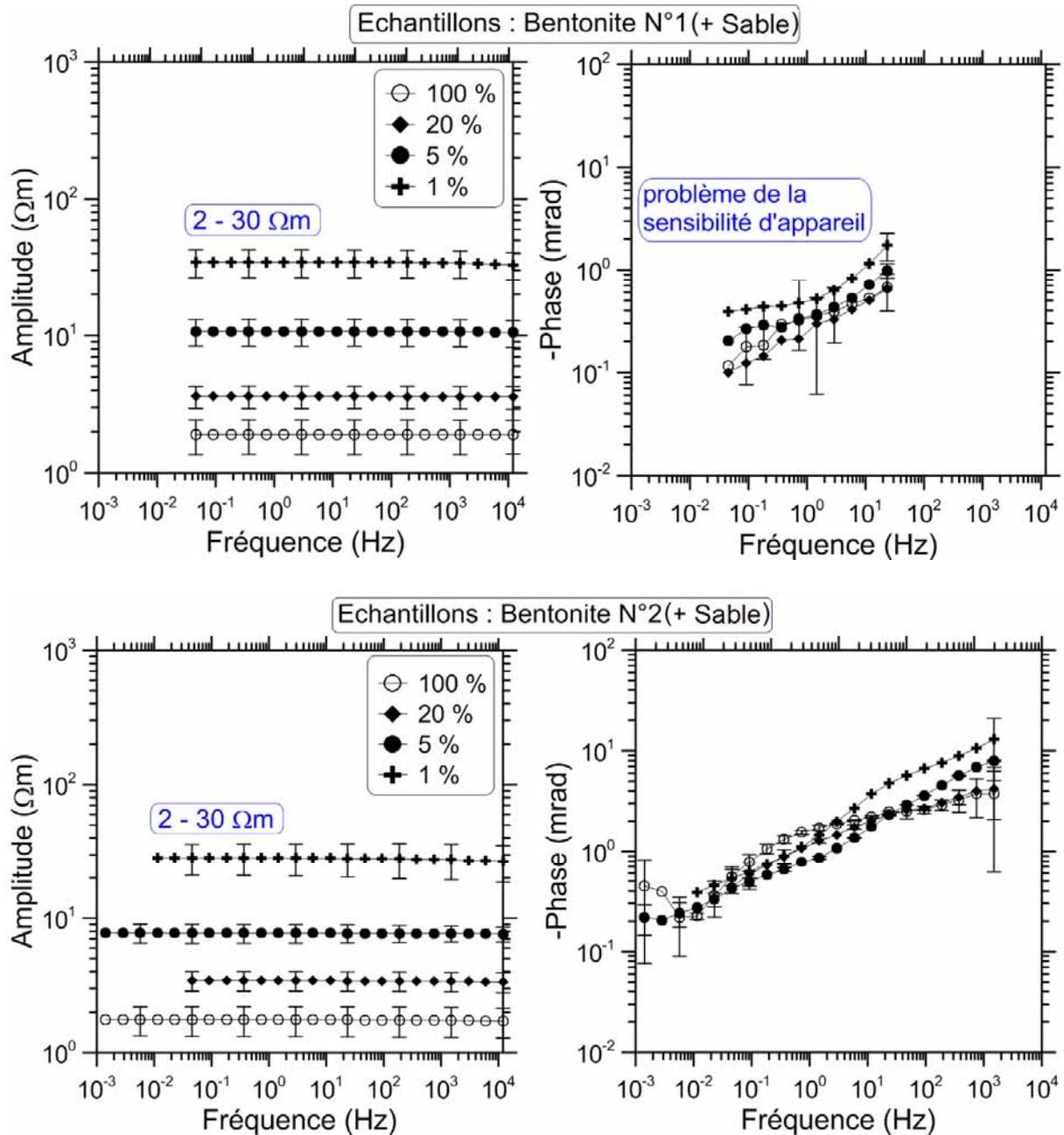


Figure III.24. Spectres d'amplitude ($\Omega.m$) et de phase (mrad) pour différentes teneurs en argile. Les échantillons sont composés de Bentonite (N° 1 et/ou N° 2) et de Sable (saturation en eau déminéralisée).

Les spectres d'amplitude de la résistivité complexe des mélanges avec les deux types de Bentonite indiquent cette fois-ci des valeurs de résistivité des échantillons de l'ordre de [2 à 30 $\Omega \cdot m$] (**Figure III.24**). Rappelons que les études méthodologiques préliminaires effectuées à partir des différents appareils de mesure sur des résistances pures (**voir section 3.1.2**) avaient mis en évidence que l'effet instrumental intervenait lorsqu'il s'agissait des résistances (et/ou résistivités) basses surtout en cas de l'utilisation du SIP FUCHS. Les résistivités des échantillons correspondent à cette gamme de résistances basses. D'ailleurs, le spectre de phase illustré sur la **Figure III.24** montre la difficulté de mesure des échantillons avec la Bentonite N°1 pour les mesures acquises à l'aide de SIP FUCHS. Dans ce cas, l'effet instrumental de l'appareil est plus dominant qu'il ne le serait avec un autre appareil (i.e. **Figure III.24** échantillons de Bentonite N°2 mesuré avec le NumetriQ). En conclusion, les échantillons de *Bentonite N°1* sont à la limite de la sensibilité de l'appareil. Les spectres de σ' et σ'' des échantillons argilo-sableux préparés avec les Bentonites N°1 et N°2 peuvent être trouvés sur la **Figure III.25**.

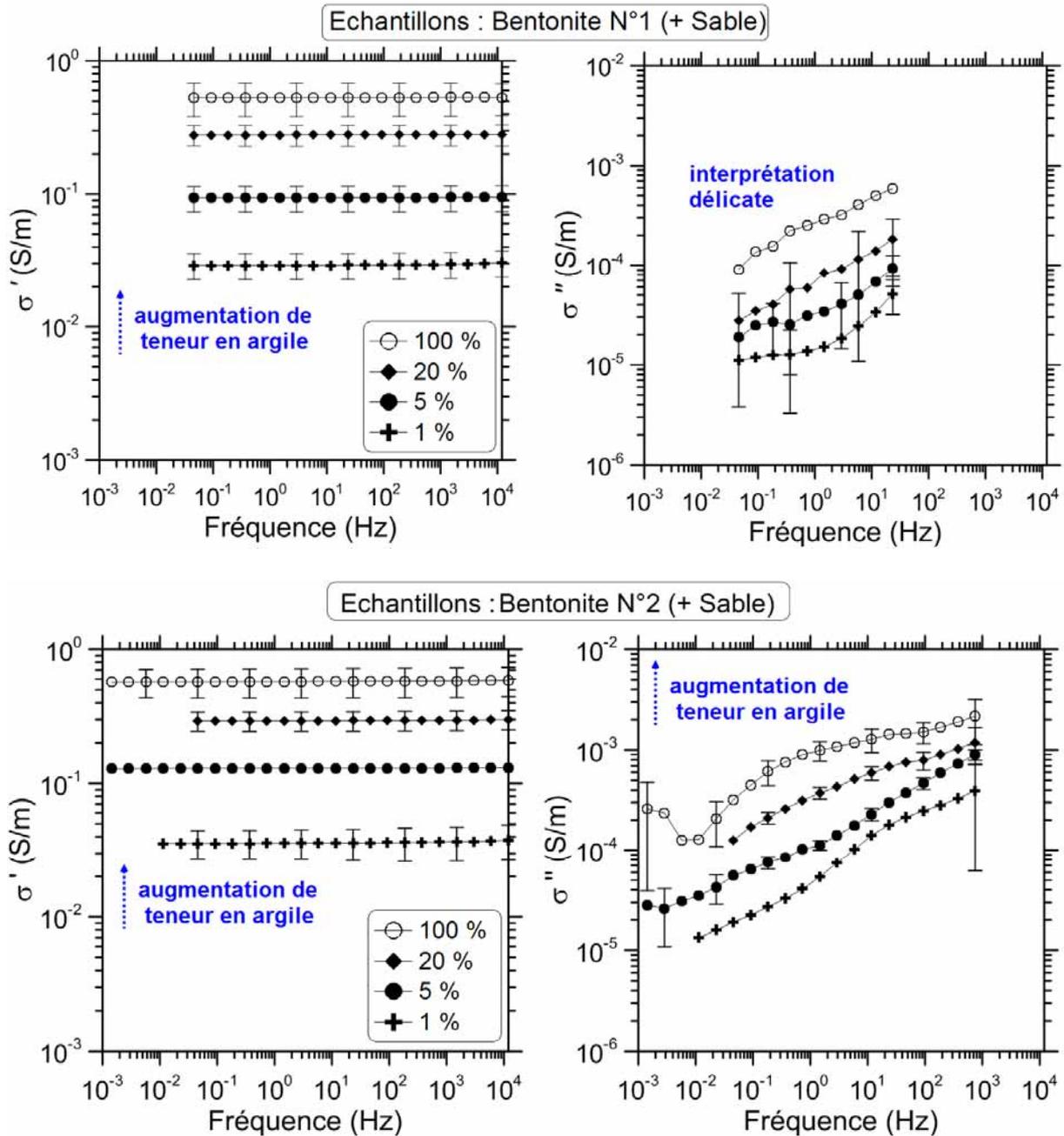


Figure III.25. Spectres des parties réelle σ' et imaginaire σ'' de la conductivité complexe pour différentes teneurs en argile. Les échantillons sont composés de Bentonite (N°1 et N°2) et de Sable (saturation en eau déminéralisée).

Conclusions sur l'étude de l'influence de la teneur en argile dans un mélange (Figures III.23-25) :

- Les amplitudes de σ' et σ'' sont maximum pour les échantillons purement argileux (*sans sable*). Plus la teneur en argile diminue plus les σ' et σ'' diminuent. Les plus faibles amplitudes de σ' et σ'' correspondent aux échantillons argileux de 1 % en teneur volumique.

- Quelque soit le mélange considéré, la partie imaginaire σ'' augmente sensiblement avec la fréquence.
- Contrairement à ce qu'indique la littérature (Vacquier *et al.*, 1957 ; Telford *et al.*, 1990), nos données ne montrent pas l'existence d'un optimum de teneur en argile pour lequel le phénomène de polarisation serait maximum.
- Les expériences faites avec la *Bentonite N°1* sont à la limite de la sensibilité de l'appareil (**Figure III.24**).

3.3.2. Influence de la minéralogie d'argile

La discussion à propos de l'influence de la minéralogie d'argile dans un mélange argilo-sableux est structurée en deux étapes. Dans un premier temps, nous nous intéressons à la comparaison des résultats expérimentaux obtenus pour des échantillons préparés avec deux argiles de même famille minéralogique *Kaolinite N°1 et N°2*, puis *Bentonite N°1 et N°2*. L'intérêt de cette comparaison est de cerner l'influence de la minéralogie sur les propriétés EM aux basses fréquences. Dans un deuxième temps, nous comparons des échantillons argilo-sableux composés d'argiles de différentes minéralogies (*Kaolinite N°2 et Bentonite N°2*). Puisque les spectres d'amplitude et de phase des échantillons correspondants ont déjà été présentés (**Figures III.22-24**), nous étudierons les spectres de σ' et σ'' présentés sur les **Figures III.26-27-28**. Les interprétations ont été associées avec les résultats des analyses de DRX. Afin d'interpréter les convergences ou divergences entre différents échantillons, lorsqu'il s'agit de la partie réelle de conductivité σ' , nous nous sommes basés sur les analyses effectuées à partir des échantillons bruts. Pour la partie imaginaire de la conductivité, nous nous sommes intéressés aux analyses effectuées à partir de la fraction argileuse présentant des informations supplémentaires uniquement liées à la minéralogie de l'argile.

Echantillons : Kaolinite N°1 (+ Sable) - Kaolinite N°2 (+ Sable)

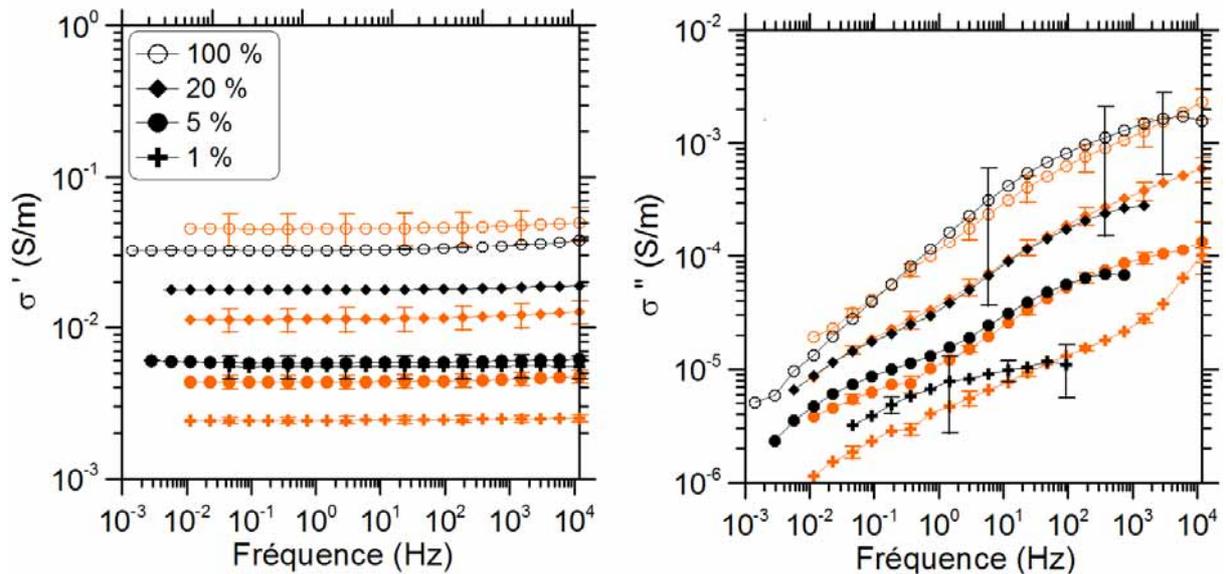


Figure III.26. Influence de la minéralogie pour une même famille d'argile de type Kaolinite (argile non-gonflante) dans un mélange saturé en eau déminéralisée sur les phénomènes de conduction et de polarisation (à gauche : spectre de la conductivité réelle, à droite : spectre de la conductivité imaginaire).

Echantillons : Bentonite N°1 (+ Sable) - Bentonite N°2 (+ Sable)

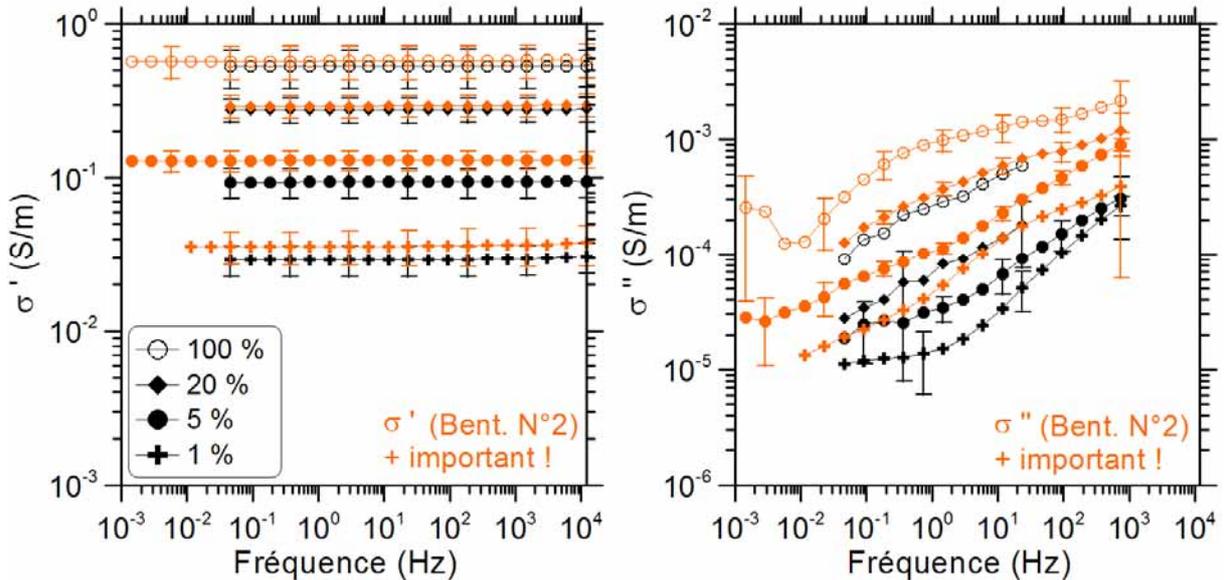


Figure III.27. Influence de la minéralogie pour une même famille d'argile de type Bentonite (argile gonflante) dans un mélange saturé en eau déminéralisée sur les phénomènes de conduction et de polarisation (à gauche : spectre de la conductivité réelle, à droite : spectre de la conductivité imaginaire).

Conclusions sur l'étude de l'influence de la minéralogie à partir des mélanges argilo-sableux de même famille d'argile :

Mélanges « Kaolinite N° 1 ou N° 2 + Sable » (Figure III.26) :

- L'amplitude de σ' est plus élevée pour les échantillons préparés avec la *Kaolinite N°1* (à l'exception des mélanges 100 % argileux pour lesquels il semble que $\sigma'_{KaoliniteN°2} > \sigma'_{KaoliniteN°1}$ mais les différences sont presque dans la barre d'erreur).
- Pour le reste des échantillons, en rappelant que les échantillons sont saturés et que les sables utilisés doivent avoir les mêmes impuretés et rester comparables (**voir annexe A5**), les amplitudes élevées de σ' des mélanges argilo-sableux de la *Kaolinite N° 1* peuvent être associées à la présence d'impuretés plus importante (déterminée à partir des analyses sur échantillons bruts) par rapport à ceux de *Kaolinite N°2* (**Tableau III.10**). Nous notons spécifiquement la présence de smectite sous forme d'impureté qui pourrait expliquer le développement d'une conductivité surfacique plus importante (donc de σ' plus importants) pour les mélanges « *Kaolinite N°1+sable* ».
- Les mélanges préparés avec les deux *Kaolinite* (N° 1 et N° 2) ne montrent pas de différence en termes d'amplitude de polarisation (σ'') malgré leurs différences en termes de surfaces spécifiques (*Kaolinite N°1* : 9,4 m²/g ; *Kaolinite N°2* : 12,6 m²/g) et de compositions minéralogiques (15 % de smectite dans la *Kaolinite N°1* déterminé à partir des analyses sur la fraction argileuse). Normalement, cette teneur significative en smectite aurait du influencer d'une manière plus importante l'amplitude de polarisation (**voir sections 3.3.1a et 3.3.1b**). Nous concluons alors que la smectite observée dans l'échantillon de *Kaolinite N° 1* ne présente pas les mêmes propriétés physico-chimiques que les smectites des échantillons de bentonites étudiés (*Bentonite N°1 et N°2*) même si ils appartiennent à la même famille minéralogique. Ce résultat met en évidence une diversité de comportement électrique d'argiles de même famille minéralogique.
- L'amplitude de polarisation (σ'') des mélanges avec *Kaolinite N°1 et/ou N°2* de 1 % de teneur en argile diffère légèrement entre elles. Lorsque la teneur en argile diminue, l'incertitude de mesure est importante du fait des faibles propriétés de polarisation de sable.

Mélanges « Bentonite N° 1 ou N° 2 +Sable » (Figure III.27) :

- Indépendamment de la teneur en argile, l'amplitude de σ' des mélanges préparés respectivement avec les *Bentonites N° 1 et N° 2* sont comparables. Les résultats des analyses de DRX menées à partir des échantillons bruts (**Tableau III.10**) montrent que les deux argiles semblent correspondre à du matériel de même type (*mélange smectite + beidellite + opale + quartz + feldspath + diverses impuretés*). Notons que les différents sables utilisés présentent également les mêmes compositions. Il est alors cohérent d'obtenir des amplitudes de σ' similaires.
- L'amplitude de σ'' des mélanges préparés avec la *Bentonite N° 2* est beaucoup plus importante que celle de ceux préparés avec la *Bentonite N° 1*. Les analyses DRX indiquent que la *Bentonite N° 1* est une smectite sodique soit une Na-Montmorillonite alors que la *Bentonite N° 2* une smectite calci-sodique très certainement du type Ca-Na Montmorillonite. La même chose se retrouve dans les résultats des analyses de capacités d'échanges cationiques (CEC), la *Bentonite N° 2* a une capacité d'échange cationiques plus élevée (44,2 meq/100 g) que celle de la *Bentonite N° 1* (34 meq/100 g) (**Tableau III.10**). Rappelons que la relation linéaire entre la CEC d'un géomatériau et l'amplitude de la polarisation ou de la conduction a été établie par plusieurs auteurs (Vinegar & Waxman, 1984 ; Knight & Nur, 1987 ; Börner & Schön, 1991 ; Strurrock et al., 1999). La différence de l'amplitude de polarisation entre deux paquets d'échantillon (*Bentonite N° 1 et N° 2*) s'explique par la différence de leurs CEC et la différente nature de leurs cations compensateurs (Na^+ et Ca^{2+}).
- Toutefois, la surface spécifique semble être un paramètre mal adapté pour la description des phénomènes de polarisation. La surface spécifique en effet est un peu plus importante pour la *Bentonite N° 1* (30,9 m²/g) que pour la *Bentonite N° 2* (27,65 m²/g) (**Tableau III.10**) alors que l'amplitude de la polarisation dans les échantillons *Bentonite N° 2 + sable* est plus importante. Cette contradiction peut être mise en rapport avec le fait que les surfaces ont été déterminées à partir d'échantillons d'argile pure (alors que le phénomène de polarisation a été observé sur des mélanges contenant du sable. Une analyse de la surface spécifique à partir des échantillons prélevés sur les mélanges préparés aurait peut être mieux refléter la réalité de la relation entre amplitude de polarisation et surface spécifique. Un autre aspect qui n'a pas été abordé ici est l'organisation spatiale de la phase argileuse (vis-à-vis notamment de la phase sableuse) dans le matériau qui pourrait ici avoir eu un rôle important pour expliquer les différences observées (e.g, Cosenza & Tabbagh, 2004).

Nous nous intéressons finalement à la comparaison des réponses spectrales à partir des mélanges argilo-sableux préparées avec des argiles de différentes minéralogies (**Figure III.28**).

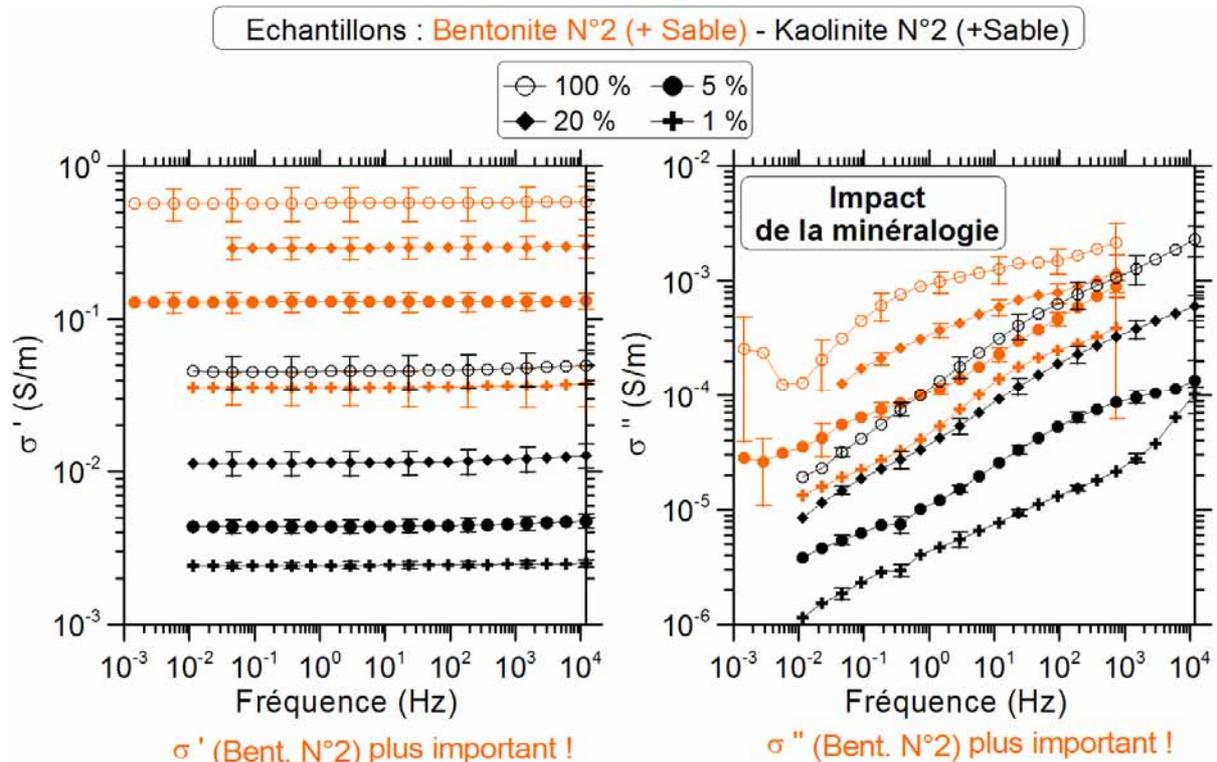


Figure III.28. Influence de la minéralogie d'argile dans un mélange sur les phénomènes de conduction et de polarisation (à gauche : spectre de la conductivité réelle σ' (S/m), à droite : spectre de la conductivité imaginaire σ'' (S/m)).

Conclusions sur l'étude de l'influence de la minéralogie des différentes familles d'argile :

- Indépendamment des teneurs en argile, les réponses spectrales des mélanges « bentonite+sable » sont différentes de celles des « kaolinite+sable ».
- A proportion d'argile sensiblement égale, la partie réelle σ' des mélanges « bentonite+sable » est beaucoup plus élevée que celle des mélanges « kaolinite+sable ». Cette différence s'explique principalement par la nature minéralogique et les propriétés de surface des argiles mises en jeu. La *Bentonite N° 2* possédant une CEC plus grande (44,2 meq/100 g) que celle de la kaolinite (0 meq/100 g) (**Tableau III.10**), les mélanges « bentonite+sable » vont donc développer une conductivité surfacique plus importante.
- A proportion d'argile sensiblement égale, la partie imaginaire σ'' des mélanges « bentonite+sable » est beaucoup plus élevée que celle des mélanges « kaolinite+sable ».

« kaolinite+sable ». Cette différence sur l'amplitude de polarisation entre les deux types de mélanges est associée à la différence de CEC et à leurs surfaces spécifiques (Kaolinite N°2 : $12,6 \text{ m}^2/\text{g}$; Bentonite N°2 : $27,65 \text{ m}^2/\text{g}$) (**Tableau III.10**). Nous rappelons que ces deux paramètres sont proportionnels à l'amplitude de polarisation (σ'').

3.3.3. Influence de la salinité d'électrolyte

La salinité de l'eau porale joue un rôle indirect sur le chemin préférentiel suivi par les différentes espèces ioniques en solution contrôlant ainsi les phénomènes de conduction et de polarisation. Aux salinités élevées, la circulation des ions a lieu essentiellement dans l'espace poral interconnecté contrairement aux faibles salinités où la circulation se fait surtout à l'interface minéral-eau (Revil & Glover, 1998). Plusieurs études ont été menées pour étudier l'influence de la composition chimique de l'électrolyte sur les propriétés électriques/électromagnétiques (**voir section 1.4.1**). Néanmoins, l'influence de la salinité de l'électrolyte sur les propriétés EM aux basses fréquences n'a pas été complètement explorée en fonction de la teneur en argile et de la minéralogie d'argile. Dans cette section, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus pour différentes salinités d'électrolytes en fonction de la teneur et de la minéralogie de l'argile. Nous présentons tout d'abord l'influence de la salinité de l'électrolyte sur la partie réelle de la conductivité complexe (σ') des mélanges argilo-sableux préparés avec les Kaolinites (N°1 et/ou N°2) ensuite sur celle de ceux préparés avec les Bentonite (N°1 et/ou N°2). A la prochaine étape, nous présentons de la même manière, l'influence de la salinité d'électrolyte sur la partie imaginaire de la conductivité complexe (σ'').

3.3.3a. Influence de salinité de l'électrolyte sur la conduction ohmique en fonction des teneurs et minéralogies des argiles

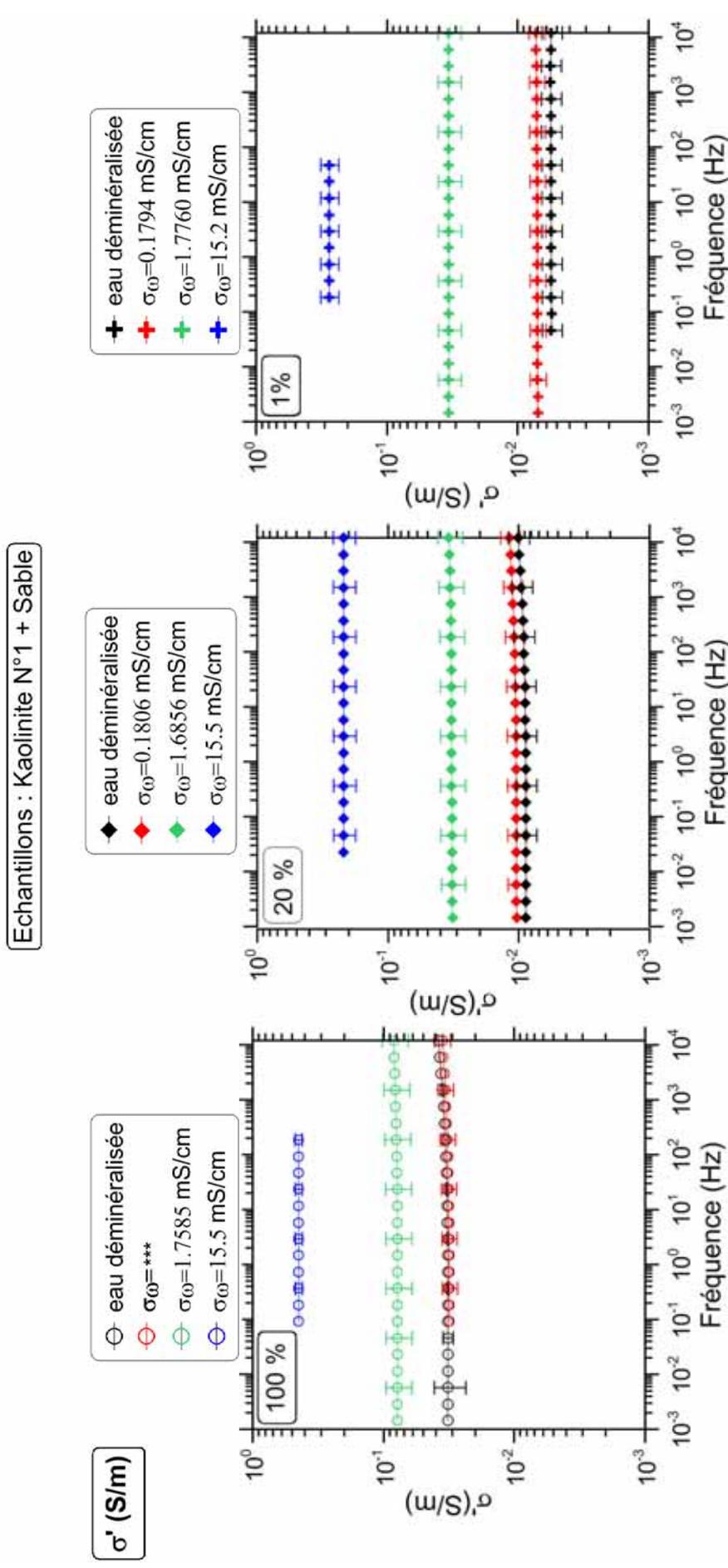


Figure III.29. Etude de l'influence de la salinité de l'électrolyte sur la conduction ohmique à partir d'échantillons composés de Kaolinite N°1 (de différentes teneurs) et de Sable (σ' : partie réelle de la conductivité complexe). La teneur en Kaolinite N°1 de l'échantillon est indiquée en haut à gauche de chaque figure.

*** nous ne disposons pas de mesure de la conductivité de l'électrolyte.

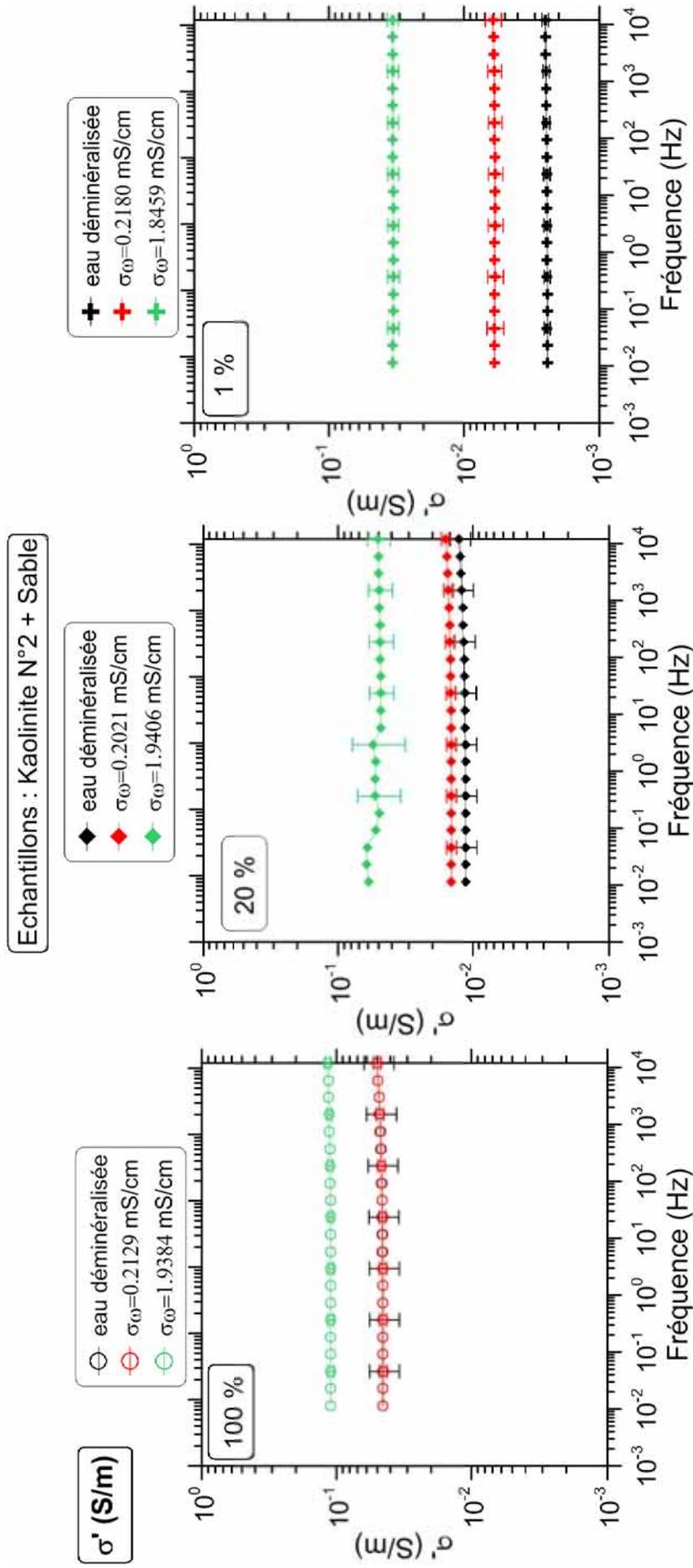


Figure III.30. Etude de l'influence de la salinité de l'électrolyte sur la conduction ohmique à partir d'échantillons composés de Kaolinite N°2 (de différentes teneurs) et de Sable (σ' : partie réelle de la conductivité complexe). La teneur en Kaolinite N°2 de l'échantillon est indiquée en haut à gauche de chaque figure.

* Les mesures avec 10 g/l de salinité n'ont pas été effectuées puisque le rapport signal/bruit diminuait en fonction de l'augmentation de concentration de l'électrolyte.

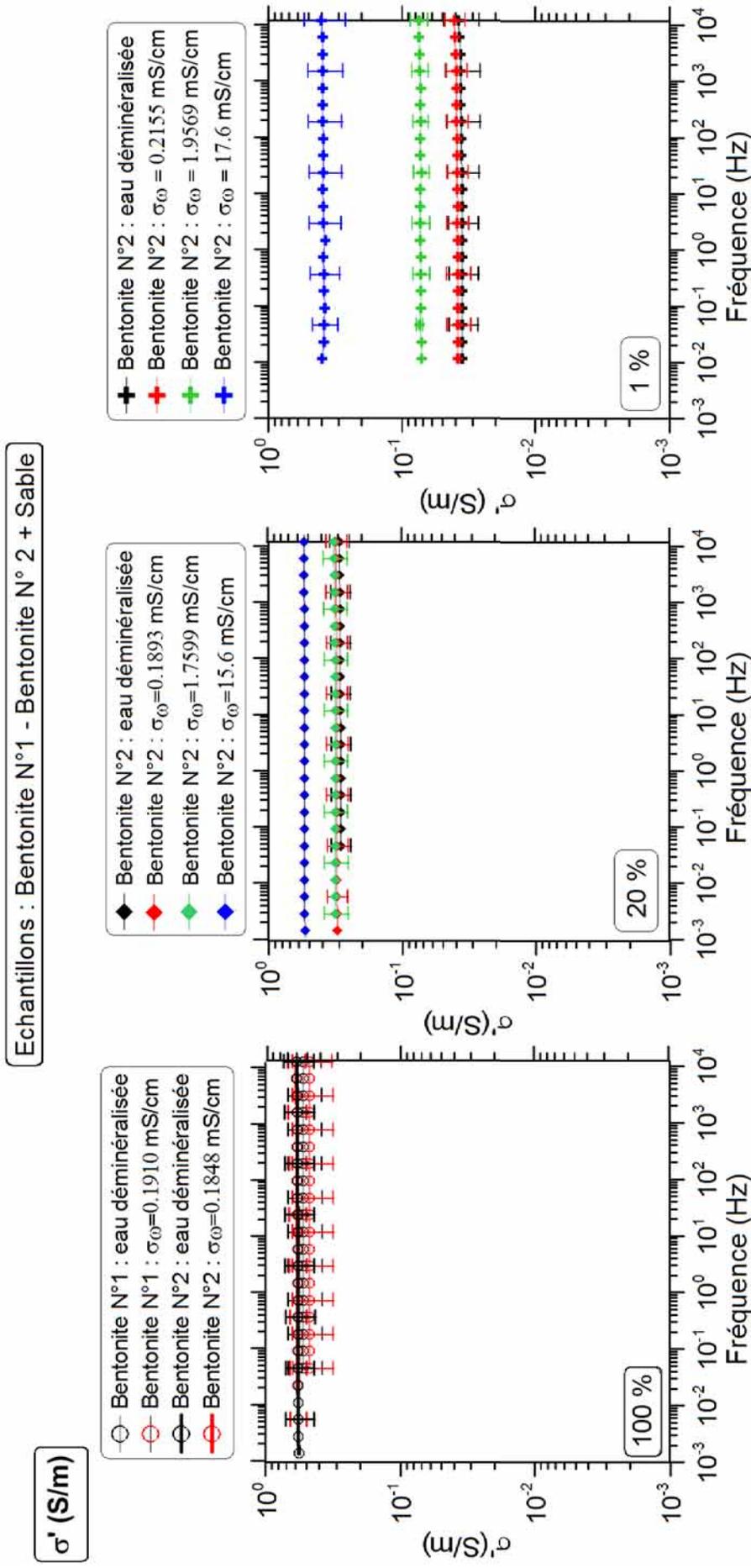


Figure III.31. Etude de l'influence de la salinité de l'électrolyte sur la conduction ohmique à partir d'échantillons composés de Bentonite N°1 ou Bentonite N°2 (de différents teneurs) et de sable (σ' : partie réelle de la conductivité complexe). La teneur en Bentonite N°1 et Bentonite N°2 de l'échantillon est indiquée en bas à gauche de chaque figure.

Concernant les échantillons à 100 % de teneur volumique en argile, les expériences avec des salinités plus importantes n'ont pas pu être réalisées à cause de conductivités très importantes inadaptées à la sensibilité de l'appareil.

Conclusions sur l'étude l'influence de la salinité de l'électrolyte sur l'amplitude de σ' :

Mélanges « Kaolinite N°1 ou N°2 + sable » (Figure s III.29-30)

- Indépendamment de la teneur en argile étudiée (100 %, 20 %, 1 %), les plus importantes amplitudes de σ' sont obtenues à partir des mélanges saturés en électrolyte à salinité élevée. Plus la salinité de l'électrolyte augmente plus l'amplitude de σ' augmente. Ce résultat confirme les travaux de [Leroy & Revil \(2004\)](#) où les auteurs indiquent l'augmentation de la conductivité de surface en fonction de la salinité pour des argiles de type Kaolinite.
- A salinités de l'électrolyte sensiblement égales, l'amplitude de σ' d'un mélange purement argileux (100 %) est plus élevée que celle des mélanges « kaolinite+sable » à 20 % et 1 % de teneur en argile. Ce constat confirme l'importance de la teneur d'argile dans la conductivité de surface qui s'ajoute à la conductivité volumique.

Mélanges « Bentonite N°1 ou N°2 + sable » (Figure III.31)

- Indépendamment de la teneur en argile (100 %, 20 %), la variation de la salinité de l'électrolyte n'a quasiment pas d'influence sur l'amplitude de σ' qui reste dominée par la conductivité de surface elle-même indépendante de la salinité comme l'indiquent [Waxman & Smits \(1968\)](#) et plus récemment [Leroy & Revil \(2004\)](#). Toutefois, ce résultat n'est plus valable pour un mélange bentonite+sable avec 1 % de teneur en argile. Dans ce cas-là, nous retrouvons l'effet de la salinité en fonction de la teneur et de la nature de l'argile. Moins la teneur en argile (1 %) est forte plus la conductivité volumique est dominante.
- Comme pour les mélanges « kaolinite+sable », à même salinité de l'électrolyte des mélanges « bentonite+sable », l'amplitude de σ' d'un mélange purement argileux (100 %) est plus élevée que celle des mélanges.

Afin de comparer l'amplitude des mélanges « argile+sable » de différentes minéralogies et salinités, la **Figure III.32** montre les comportements spectraux de mélanges à une teneur d'argile fixe : 20 %. Cette teneur a été choisie en fonction de (i) la disponibilité de toutes les gammes de salinité pour les deux types d'argiles et (ii) de la volonté de garder une quantité suffisamment importante d'argile. Concernant la première considération, (i) nous rappelons que les différentes gammes de salinité n'ont pas toujours pu être appliquées sur les mélanges à 100 % de teneur en argile, les fortes conductivités ainsi atteintes dépassant la limite de sensibilité des appareils de mesure.

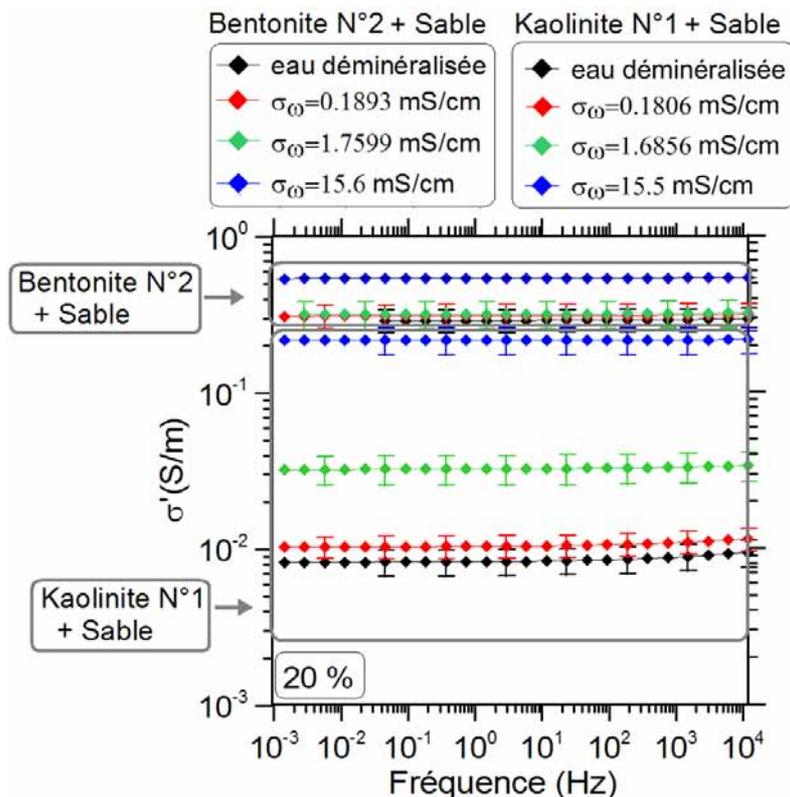


Figure III.32. Dépendance de la conduction ohmique à la salinité de l'électrolyte à partir des échantillons composés de Kaolinite N°1 ou de Bentonite N°2 (20 % en teneur) et de sable (σ' : partie réelle de la conductivité complexe).

La Figure III.32 met en évidence les points suivants :

- Indépendamment de la salinité de l'électrolyte, les amplitudes σ' des mélanges « bentonite+sable » sont plus élevées que celles des mélanges « kaolinite+sable ». Les mélanges « bentonite+sable » développent une conductivité surfacique plus importante que celle des mélanges « kaolinite+sable ».
- L'amplitude σ' des mélanges « kaolinite+sable » est dépendante de la salinité de l'électrolyte contrairement aux mélanges « bentonite+sable ».

3.3.3b. Influence de la salinité de l'électrolyte sur les phénomènes de polarisation en fonction de la teneur et de la minéralogie

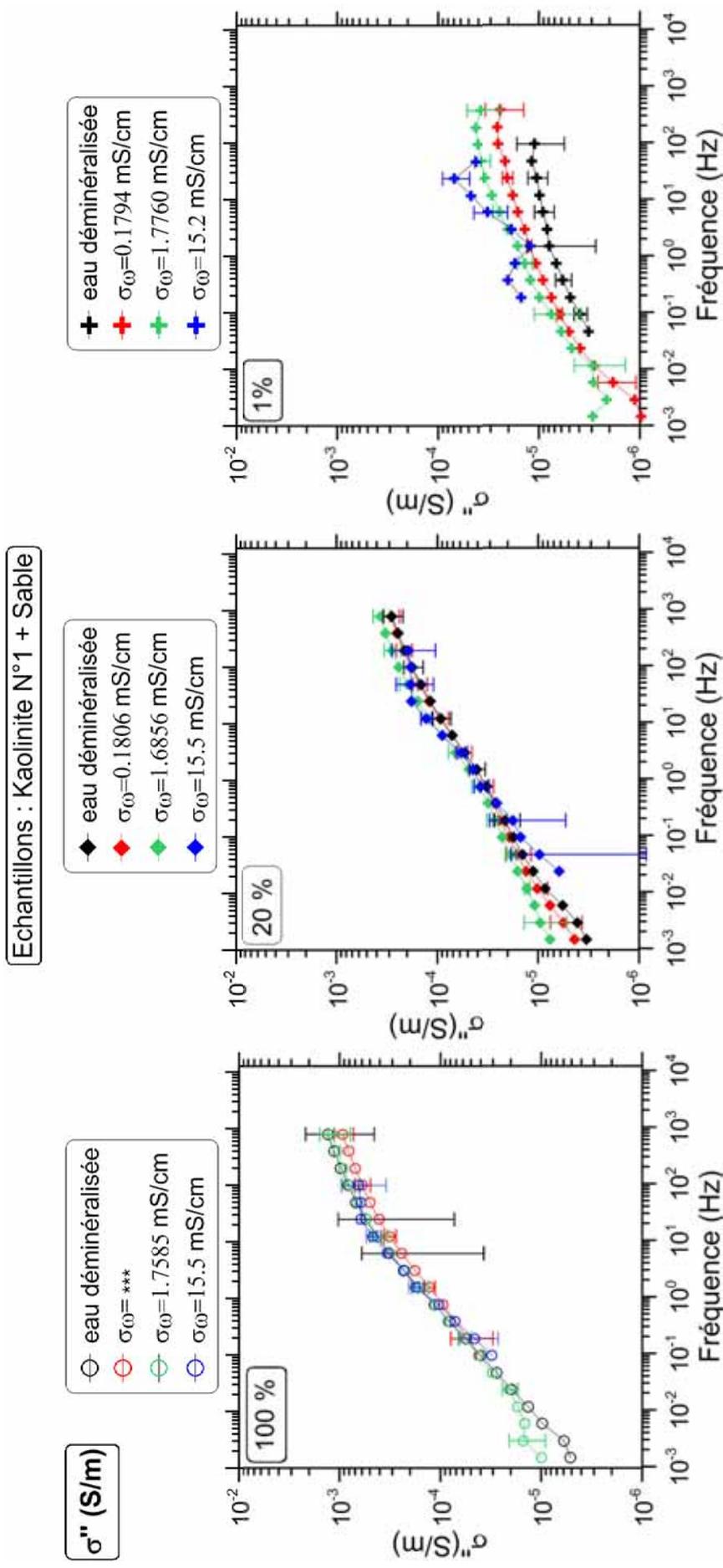


Figure III.33. Etude de l'influence de la salinité de l'électrolyte sur la polarisation à partir d'échantillons composés de Kaolinite N°1 (de différentes teneurs) et de sable (σ'' (S/m) : conductivité imaginaire).

Caractérisation des hétérogénéités texturales et hydriques des géomatériaux argileux par la méthode de Polarisation Provoquée : Application à l'EDZ de la station expérimentale de Tournemire.

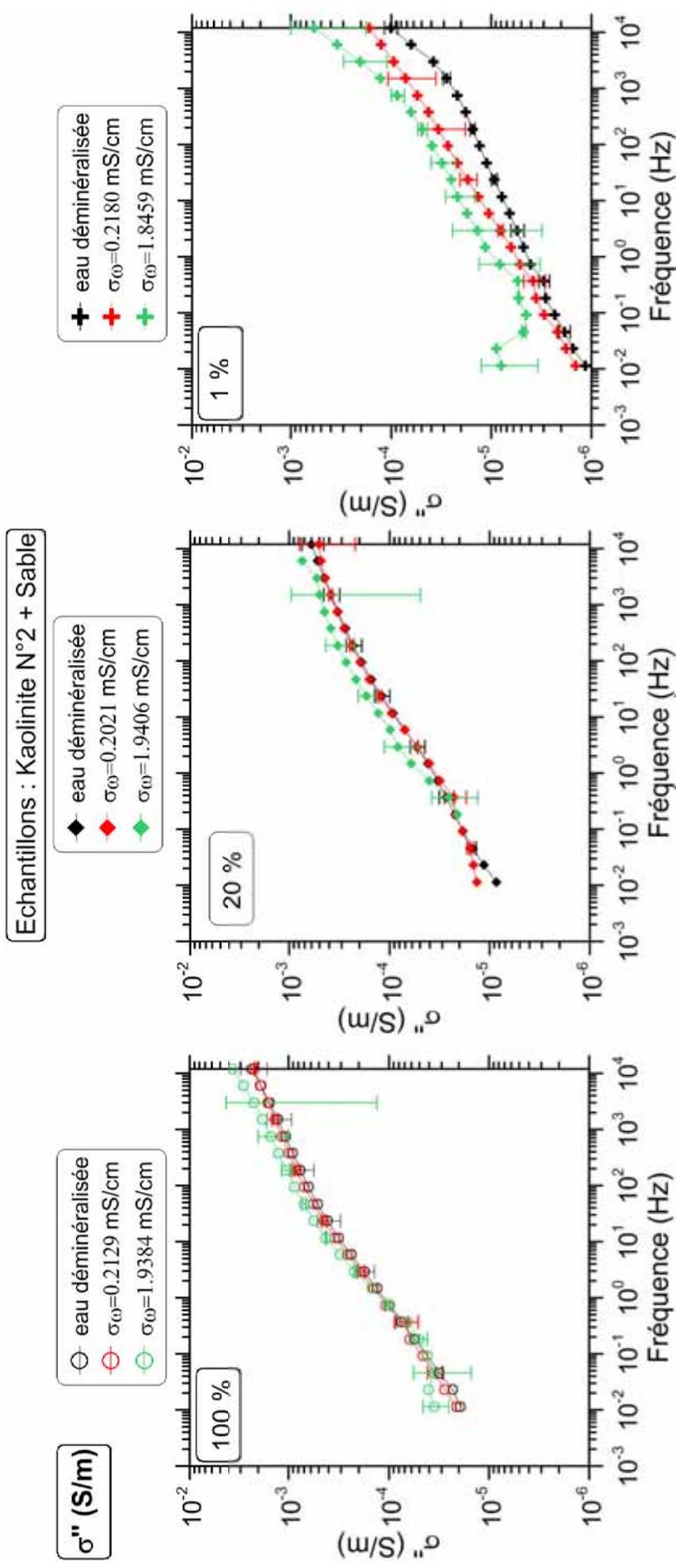


Figure III.34. Etude de l'influence de la salinité de l'électrolyte sur la polarisation à partir d'échantillons composés de Kaolinite N°2 (de différents teneurs) et de sable ($\sigma''(S/m)$: conductivité imaginaire).

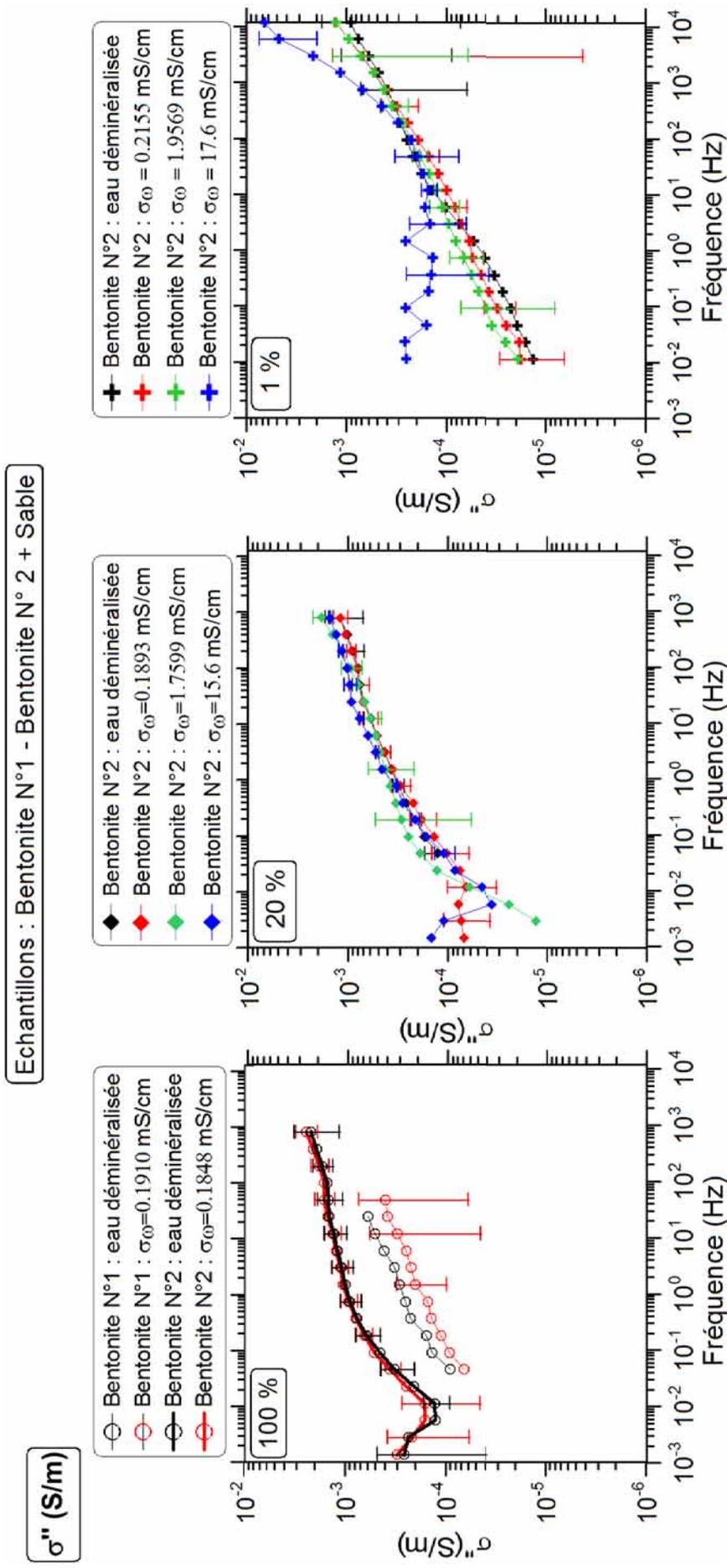


Figure III.35. Etude de l'influence de la salinité de l'électrolyte sur la polarisation à partir d'échantillons composés de Bentonite N° 1 ou Bentonite N°2 (de différentes teneurs) et de sable (σ'' (S/m) : conductivité imaginaire).

* Concernant les échantillons à 100 % de teneur volumique en argile, les expériences avec des salinités plus importantes n'ont pas pu réaliser à cause de conductivités très importantes dépassant la sensibilité de l'appareil.

Conclusions sur l'influence de la salinité d'électrolyte sur l'amplitude de σ'' :

Mélanges « Kaolinite N°1 ou N°2 + sable » et « Bentonite N°1 ou N°2 + sable »

- Contrairement à l'amplitude de σ' des mélanges « kaolinite+sable », l'amplitude de σ'' des mélanges « kaolinite+sable » ne varie pas en fonction de la concentration de l'électrolyte. La salinité n'influence l'amplitude de σ'' que pour l'échantillon à 1 % de teneur en argile. Lorsque la teneur en argile est importante (100 %, 20 %), dans un échantillon à kaolinite, l'amplitude de la polarisation est indépendante de la salinité de l'électrolyte (**Figures III.33-34**).
- De même que pour l'amplitude de σ' des mélanges « bentonite+sable », l'amplitude de σ'' des mélanges « bentonite+sable » ne varie pas en fonction de la salinité d'électrolyte. Autrement dit, pour un échantillon argileux à bentonite, l'amplitude de polarisation est indépendante de la salinité de l'électrolyte. Ce constat est valable indépendamment de la teneur en argile (100 %, 20 %). Les réponses des échantillons « bentonite+sable » saturés à 1 % de teneur en argile sont délicates à interpréter (**Figure III.35**).
- Indépendamment de la salinité d'électrolyte, l'amplitude de σ'' d'un mélange purement argileux (100 %) est plus élevée que celle des mélanges « kaolinite+sable » ou « bentonite+sable » à 20 % et 1 % de teneur en argile.
- Rappelons que du fait de problèmes instrumentaux, lorsque la salinité de l'électrolyte est importante (~15 mS/cm) et la teneur en argile faible (1 %), le rapport signal/bruit diminue (**Figures III.33-35**). Ce résultat est valable pour les deux types de mélanges « kaolinite+sable » et « bentonite+sable ».

Nous proposons dans la **Figure III.36** une synthèse de l'influence de la salinité de l'électrolyte des mélanges « kaolinite+sable » et « bentonite+sable » sur la partie imaginaire de la conductivité complexe (σ'').

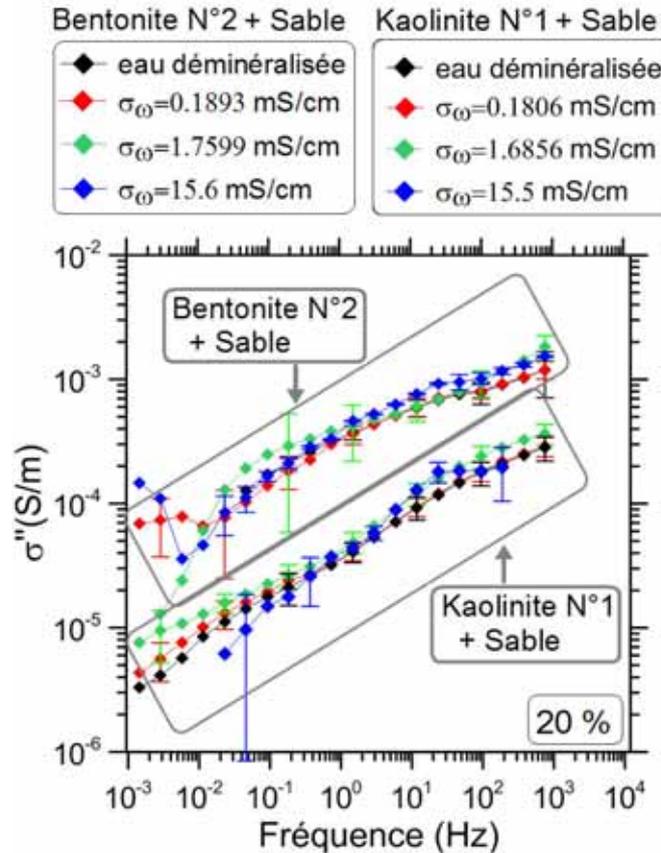


Figure III.36. Dépendance de la polarisation à la salinité d'électrolyte à partir d'échantillons composés de Kaolinite N° 1 ou Bentonite N° 2 de 20 % en teneurs et de sable (σ'' (S/m) : conductivité imaginaire).

La Figure III.36 met en évidence les points suivants :

- A proportion d'argile sensiblement égale, la partie imaginaire σ'' des mélanges « bentonite+sable » est beaucoup plus élevée que celle des mélanges « kaolinite+sable » quelque soit la salinité.
- Pour tous les mélanges, le phénomène de polarisation est indépendant de la salinité. C'est un résultat original. Si malgré tous les changements de concentration de l'électrolyte, l'amplitude de polarisation ne varie pas, nous pourrions suggérer que les processus de polarisation mesurés ne dépendent pas de la couche diffuse de la double couche électrique. En effet, les propriétés géométriques et physico-chimiques de la couche diffuse sont très sensibles à la variation en concentration des cations compensateurs (voir la théorie classique de Gouy-Chapman). La polarisation mesurée dépendrait alors essentiellement de la polarisation de la couche de Stern. Cette hypothèse pourrait être valable dans la gamme de concentrations de notre étude et mériterait d'être discutée avec une modélisation ad hoc (e.g. Leroy & Revil, 2008).

3.3.4. Influence d'un traitement thermique

Selon la quantité d'eau présente au sein du système et la nature de l'argile considérée, l'organisation du géomatériaux et des phases qui le composent sera variable. Il peut en résulter différents types d'eau dans la matrice argileuse (Makki, 2009) :

- l'eau libre, qui remplit les macropores entre les particules et peut être éliminée par séchage à l'étuve à une température de 105 °C ;
- l'eau liée, qui occupe les espaces interfoliaires en étant liée par des interactions chimiques et électriques et qui a besoin d'une température élevée de 200 °C pour être évacuée ;
- l'eau cristalline, qui se situe au niveau des feuillets argileux et est éliminée à une température de 550 °C.

Nous avons précédemment discuté du rôle de la teneur en eau d'un géomatériau sur les propriétés électromagnétiques aux basses fréquences (**voir section 1.4.1**). Le drainage d'une certaine quantité d'eau dans un géomatériau aura *a priori* une influence sur les phénomènes de polarisation. Le drainage d'eau peut entraîner ainsi un changement de structure (en fonction du traitement appliqué). La variation de la quantité d'eau peut aussi être assurée à partir d'un traitement thermique induisant l'élimination de l'eau à différents niveaux de la matrice argileuse en fonction de la température de chauffe appliquée. Par l'intermédiaire du traitement thermique d'un géomatériau, nous pouvons ainsi envisager d'étudier les phénomènes de polarisation associées à la perte d'eau et/ou au changement structural.

Vacquier *et al.* (1957) suggéra qu'un chauffage initial d'un mélange sable-argile pouvait contribuer au tapissage des grains de quartz par les minéraux argileux et par conséquent pouvait créer un changement structural entraînant une modification des processus de polarisation. Afin d'étudier l'influence d'un traitement thermique, dans un premier temps, nous avons procédé à une mesure PPS sur un échantillon argilo-sableux (Kaolinite N°1 (5 %) + sable). Cet échantillon préparé avec la Kaolinite a été choisi en raison de la simplicité structurale d'argile en question (1:1 Kaolinite). Nous avons tenu compte des élévations de température nécessaires au drainage de l'eau présente dans la matrice argileuse, plus faibles pour cette famille que pour d'autres à structure plus complexe (i.e. smectite). Le protocole adopté pour cette étude peut être décrit de la manière suivante :

1. l'échantillon a été préparé et les mesures PPS sont acquises selon la technique habituelle (**voir sections 3.2.2 et 3.2.3**).
2. une fois les mesures terminées, l'échantillon est mis à l'étuve pendant 48 heures à 150 °C (température suffisante pour l'extraction de l'eau libre mais insuffisante pour

celle de l'eau liée). L'objectif ici est de provoquer un changement structural modéré sans modification minéralogique.

3. l'échantillon a été enlevé de l'étuve après 48 h et avant de procéder aux mesures PPS, une attente suffisante (7 h) permet au mélange « kaolinite+sable » d'atteindre l'équilibre thermique (**Figure III.37**).
4. la ré-humectation du mélange est assurée jusqu'à saturation avec la même quantité d'eau déminéralisée qu'à la première expérience sur cet échantillon (850 g).
5. les mesures PPS sont de nouveau acquises avec l'échantillon thermiquement traité.



Figure III.37. (A) Etat de l'échantillon après séchage à l'étuve, (B) Echantillon séché mis en forme de poudre avant la re-saturation.

Les résultats expérimentaux de cette étude sont présentés sur la **Figure III.38** par les spectres d'amplitude et de phase de la résistivité complexe et des parties réelle et imaginaire de la conductivité complexe.

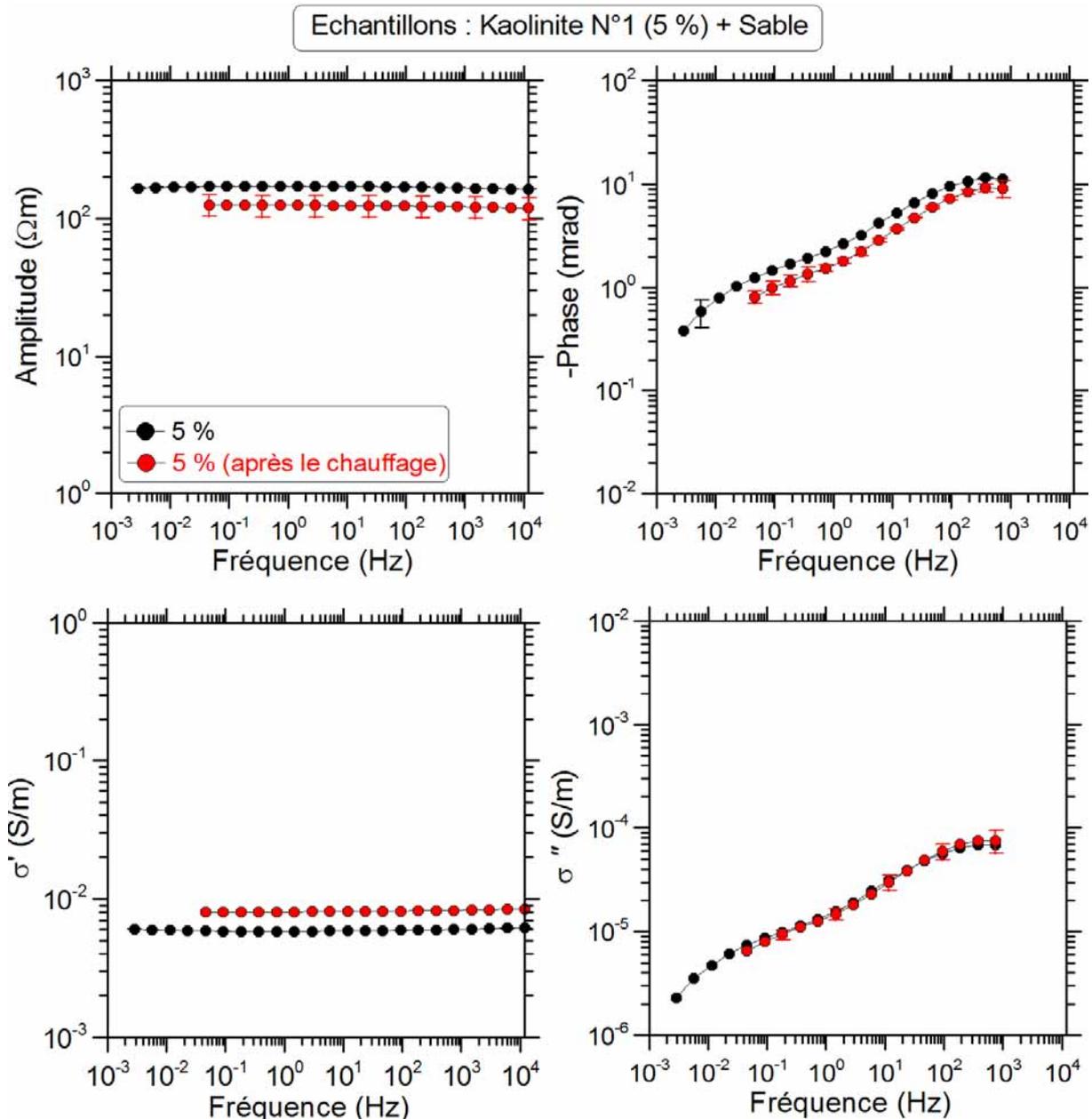


Figure III.38. Spectres d'amplitude ($\Omega \cdot m$) et de phase (mrad) de la résistivité, de la conductivité réelle (S/m) et de la conductivité imaginaire (S/m) avant et après le traitement thermique (chauffage de l'échantillon à l'étuve à 150 °C pendant deux jours).

Conclusions sur l'influence du chauffage (Figure III.38) :

- Contrairement à ce qu'indique les travaux de [Vacquier et al. \(1957\)](#), les résultats montrent que ce traitement initial ne modifie pas le spectre de σ'' donc la polarisation. Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce résultat : (i) ce traitement thermique initial est inopérant, et ne modifie en rien l'organisation spatiale des différentes phases ou (ii) ce traitement thermique initial est efficace mais les phénomènes de polarisation sont indépendants de l'organisation spatiale des

phases, ils se produiraient au niveau de la particule argileuse indépendamment de la phase siliceuse.

3.3.5. Influence du changement de la taille des grains du sable

Rappelons les **sections 1.4.3** et **1.4.4** où nous introduisons les phénomènes de polarisation physico-chimiques à l'échelle de l'interface grain/électrolyte (*i.e. polarisation de la double couche électrique*) et/ou à l'échelle de l'espace poral (*i.e. polarisation de membrane ou polarisation de Maxwell-Wagner donc un effet géométrique structural*). Les différentes polarisations intervenant aux deux échelles micro ou macro structurales sont fortement influencées par la taille des grains ou par la distribution de la taille des grains dans un milieu poreux granulaire. Rappelons l'étude expérimentale de [Vanhala \(1997b\)](#) qui soulignait l'influence de la distribution de la taille des grains sur le spectre de phase. Le même type de recherche a été mené à partir de mélanges d'argiles et de billes de verre ([Klein & Sill, 1982](#)), de mélanges de billes de verre seules ([Leroy et al., 2008](#)) ou d'échantillons de sable ([Koch et al., 2010](#)) (**voir section 1.4.1**), mais l'influence exacte d'un changement des paramètres microstructuraux au niveau de l'espace poral et/ou au niveau de la taille des grains sur la réponse PPS d'un géomatériau argilo-sableux n'est pas clairement établie.

Nous avons donc étudié l'influence d'une modification de la distribution de la taille des grains de sable sur les propriétés EM aux basses fréquences ce qui correspond à un changement microstructural au niveau des propriétés porales des mélanges préparées. L'expérience a été menée à partir des mélanges argilo-sableux à 20 % de teneur en argile. Les deux types d'argile ont été utilisés lors de ces expériences : la Kaolinite et la Bentonite. Dans un premier temps, deux mélanges « *kaolinite+sable* » ont été préparés : le premier avec du sable tamisé à « 200-250 μm » ; le deuxième tamisé à « 300-400 μm ». Il a été nécessaire d'utiliser deux différentes kaolinites (N° 1 et N° 2) puisque nous ne disposons plus de la *Kaolinite N°1* (mais les propriétés EM aux basses fréquences des deux argiles restent comparables voir **Figure III.26**). Il en est de même pour leur distribution de taille des grains (**Figure III.39**). Dans un deuxième temps, deux mélanges « *bentonite+sable* » ont été préparés selon le même protocole que pour les mélanges « *kaolinite+sable* ». La bentonite utilisée correspond à l'échantillon N°2 (voir sa granulométrie à la **Figure III.40**). Nous avons utilisé le sable de Fontainebleu dans toutes les études expérimentales du travail.

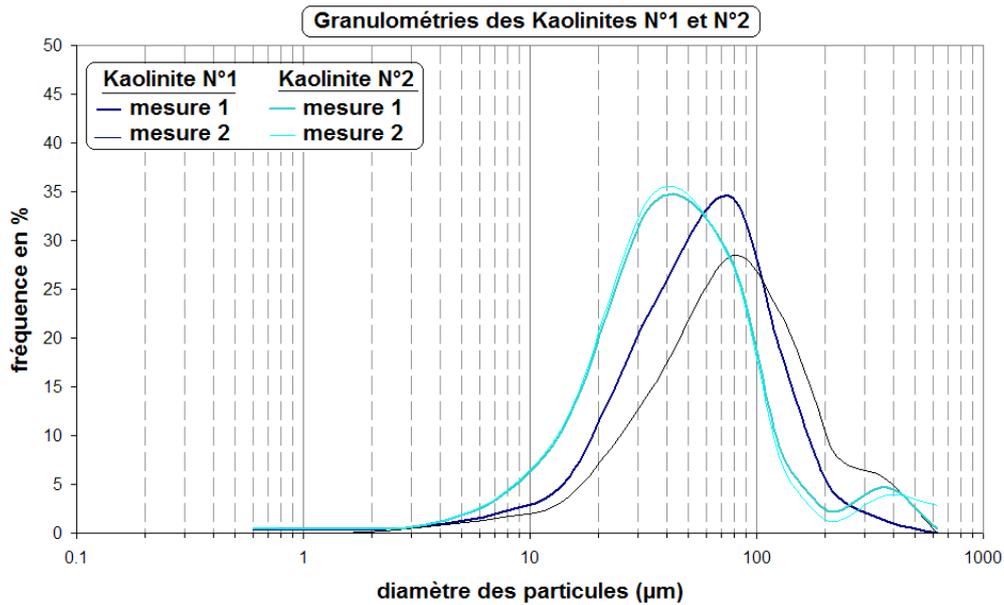


Figure III.39. Granulométrie de deux Kaolinites (N° 1 et N° 2). Les mesures de granulométrie à laser ont été effectuées à sec au centre de l'INRA Orléans. Deux répétitions ont été faites pour chaque échantillon. L'écart entre les deux répétitions est probablement lié à la ré-humectation de l'argile entre les deux mesures. Lors de la mesure, la désagglomération des particules n'a pas été complètement achevée, il s'agit donc plutôt des tailles d'agrégats.

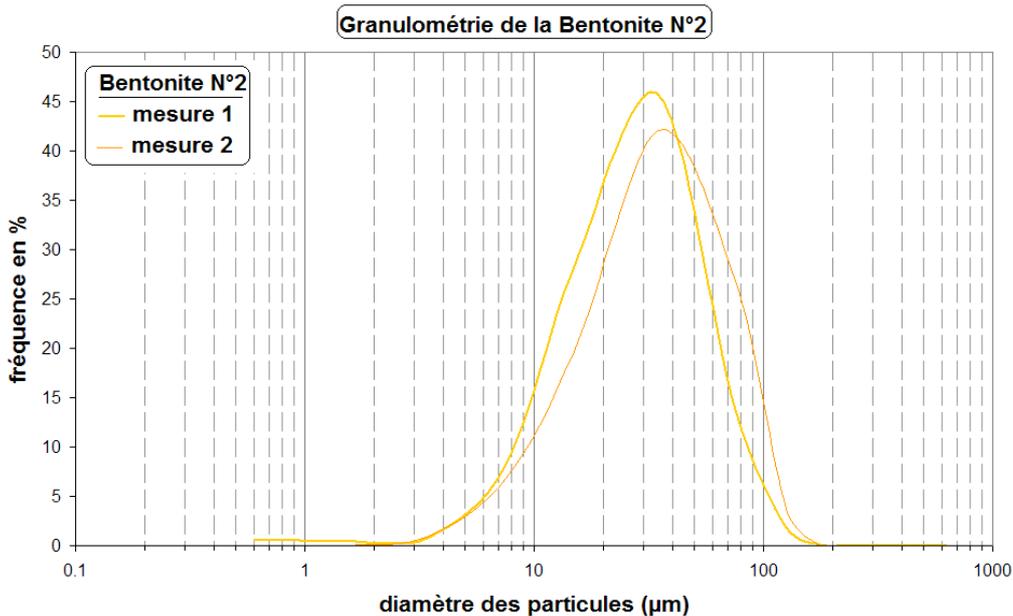


Figure III.40. Granulométrie de la Bentonite N°2. Les mesures de granulométrie à laser ont été effectuées à sec au centre de l'INRA Orléans. Deux répétitions ont été faites pour chaque échantillon. L'écart entre les 2 répétitions est probablement lié à la ré-humectation de l'argile entre les deux mesures. Lors de la mesure, la désagglomération des particules n'a pas été complètement achevée, il s'agit donc plutôt des tailles d'agrégats.

Les échantillons sont saturés en eau déminéralisée pour deux raisons : (i) d'une part, grâce à l'étude de l'influence de la salinité de l'électrolyte (**voir section 3.3.3**), nous avons pu constater que le rapport signal/bruit augmente d'une manière significative en

fonction de la diminution de la concentration de l'électrolyte, (ii) d'autre part, rappelons qu'en fonction de la salinité de l'électrolyte la circulation des ions, contrôlant les phénomènes de polarisation et de conduction, suit différents chemins préférentiels. Aux salinités élevées, la circulation est contrôlée par l'espace poral interconnecté alors qu'aux salinités faibles, la circulation se place plutôt à l'interface minéral-eau (Revil & Glover, 1998). En conséquence, nous nous intéressons plutôt à l'influence d'un changement granulométrique sur la réponse PPS. La chimie de l'électrolyte a été maintenue constante pour les quatre campagnes de mesure par utilisation d'eau déminéralisée. Les résultats sont montrés sur la **Figure III.41**.

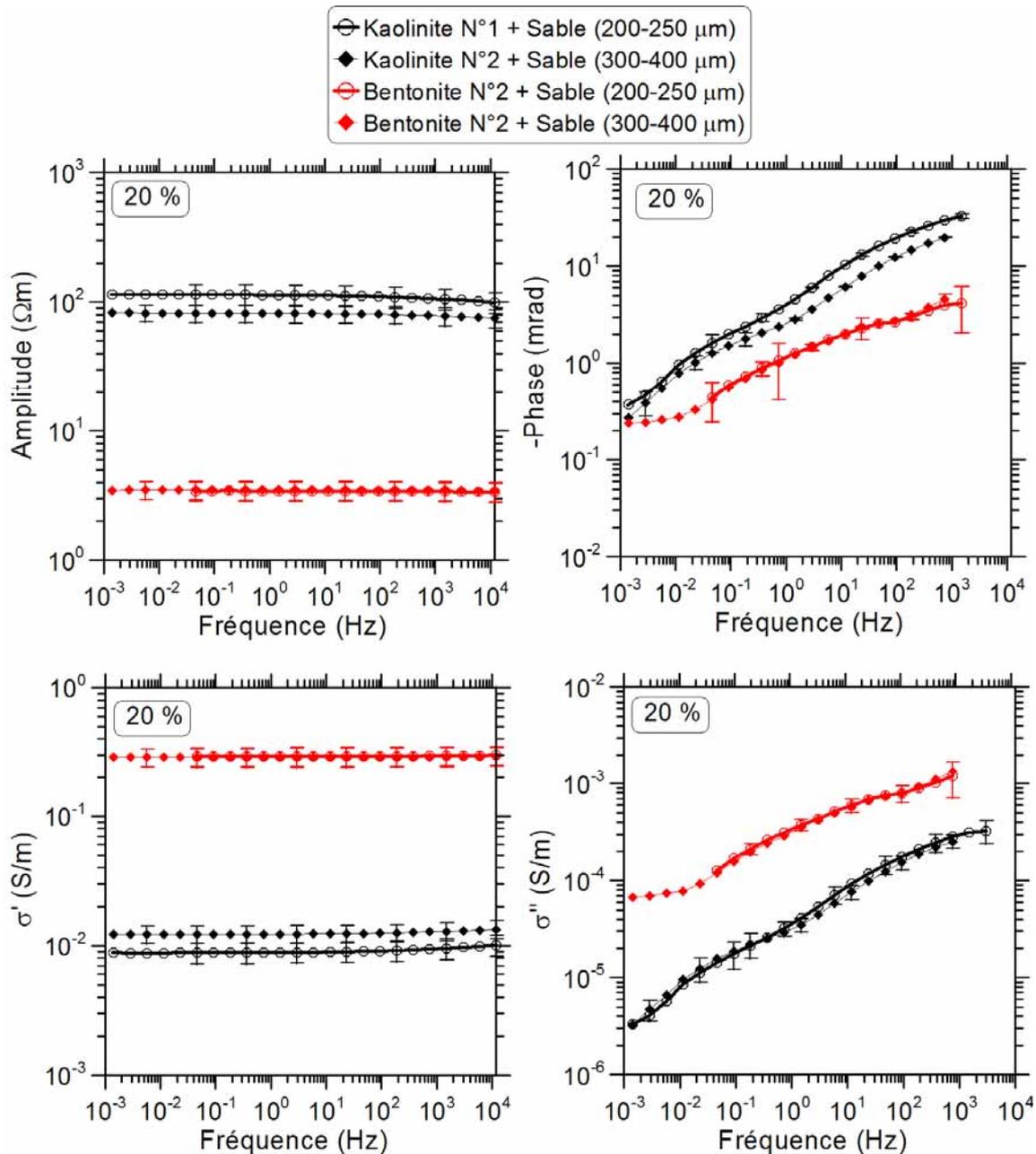


Figure III.41. Influence de variation de la taille des grains de sable sur le spectre d'amplitude ($\Omega \cdot m$) et de phase (mrad) de la résistivité et sur les spectres des parties réelle et imaginaire de la conductivité (S/m).

Conclusions sur l'influence de la taille des grains de sable (Figure III.41) :

- Les réponses spectrales correspondant à deux différents tamisages de chaque paquet d'échantillon argilo-sableux de même minéralogie d'argiles sont identiques. Ce résultat peut être expliqué par la faible différence entre les deux distributions. Afin de juger de la validité de cette hypothèse, il est nécessaire de multiplier les mesures PPS à partir d'échantillons argilo-sableux possédant des granulométries de sable plus contrastées.
- A ce stade, on peut avancer que les phénomènes de polarisation dans un mélange argilo-sableux sont liés au premier ordre aux propriétés surfaciques des argiles (*i.e. capacité d'échange cationique, surface spécifique etc.*). Cette hypothèse s'appuie sur la différence en amplitude de polarisation (σ'') entre les mélanges « *Kaolinite+sable* » et « *Bentonite+sable* » (**Figure III.41**).
- Il est intéressant de noter une possible influence de la distribution de taille des grains d'argile sur le spectre de σ'' . Pour les mélanges « *kaolinite+sables* », il semble exister deux bosses en dessous et au dessus de 2 Hz (**Figure III.41**). Les échantillons « *bentonite+sable* » ne présentent pas de même réponse spectrale. Cette différence en termes de forme des réponses spectrales entre des mélanges « *kaolinite+sable* » et « *bentonite+sable* » pourrait traduire une distribution différente de la taille des grains d'argile (**Figures III.39-40**). Remarquons que la distribution de la taille des particules (ou ici d'agrégats de particules) des kaolinites est relativement plus large que celle de la bentonite. Les modèles micro-macro (par exemple celui de [Leroy & Revil, 2009](#), présenté dans la **section 1.5.2**) pourraient permettre de mieux discuter le rôle de ce paramètre microstructural.

Conclusion

Nous avons étudié l'influence de la teneur en argile, de la minéralogie de la phase argileuse, de la concentration de l'électrolyte, d'un traitement thermique et du changement de la taille des grains de sable sur des mélanges argilo-sableux non consolidés saturés. Les expériences menées en laboratoire montrent que les phénomènes de polarisation sont principalement contrôlés par les propriétés de l'argile présente dans le mélange.

- Plus la teneur en argile est importante, plus la polarisation est importante. Les échantillons argilo-sableux saturés ne présentent pas un optimum de teneur en argile pour lequel le phénomène de polarisation serait maximum contrairement à ce qu'indique la littérature (Vacquier *et al.*, 1957 ; Telford *et al.*, 1990).
- Plus la capacité d'échange cationique (CEC) de l'argile et sa surface spécifique sont importantes plus la polarisation est importante. Ce résultat est conforme aux résultats publiés (Vinegar & Waxman, 1984 ; Knight & Nur, 1987 ; Börner & Schön, 1991 ; Sturrock *et al.*, 1999).
- Nos données mettent en évidence également une différence d'amplitude de polarisation non seulement entre des mélanges préparés avec différentes familles d'argile mais aussi entre des mélanges préparés avec la même famille d'argile (**Figure III.27**). Ce résultat met en évidence l'impact de la diversité de la minéralogie des argiles de même famille et la sensibilité de la méthode PPS aux caractéristiques minéralogiques des argiles étudiées.
- L'originalité de notre étude visant à observer l'influence de la concentration de l'électrolyte sur la polarisation résulte du couplage de celle-ci avec la teneur en argile et la minéralogie de l'argile. Dans la gamme de la salinité étudiée, nos résultats confirment la dépendance de la conductivité de surface à la salinité de l'électrolyte des échantillons argileux de type Kaolinite (**Figure III.29-30**) et l'indépendance des échantillons argileux de type Bentonite (**Figure III.31**), évoquée aussi par Leroy & Revil (2004). Toutefois, l'indépendance de la conductivité de surface des échantillons argileux de type bentonite n'est plus valable pour [1 %] de teneur en argile. L'amplitude de polarisation est indépendante de la salinité quelque soit la teneur et la nature de l'argile (**Figure III.33-34-35**). C'est aussi un résultat original.
- Une autre étude consistait à induire des modifications microstructurales (sans changement minéralogique) à partir d'un traitement thermique (2 jours, 150 °C) sur un échantillon argilo-sableux préparé avec la kaolinite (5 % en teneur). L'amplitude de polarisation n'a pas été modifiée avant et après le traitement thermique (**Figure III.38**). Soit (i) ce traitement thermique initial fut inutile, il ne modifia en rien

l'organisation spatiale des différentes phases soit (ii) ce traitement thermique initial fut efficace mais les phénomènes de polarisation sont indépendants de l'organisation spatiale des phases : ils se produisent au niveau de la particule argileuse.

- Dernièrement, nous avons observé avec différents tamisages des grains de sable (200-250 μ m/300-400 μ m) dans un échantillon argilo-sableux que l'amplitude de polarisation n'est pas modifiée quelque soit la nature d'argile utilisée (**Figure III.41**). Néanmoins, il faut souligner qu'entre les deux cas considérés la distribution des tailles des grains de sable n'est pas significativement différente. Cette étude semble mettre en cause également le rôle de la distribution de taille des particules ou agrégats de particules des argiles utilisées sur la forme du spectre de polarisation.

Conclusion générale et Perspectives

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire de thèse s'inscrit dans la problématique générale de la sûreté des stockages de déchets en formations géologiques profondes. Dans ce travail de thèse, la méthode de la Polarisation Provoquée (PP) a été la première fois appliquée en galerie souterraine, d'une manière systématique et exhaustive, pour la caractérisation de l'Excavation Damaged Zone (EDZ).

Les résultats obtenus dans trois galeries de la station expérimentale de Tournemire (Aveyron, France) ont notamment prouvé que la méthode PP se montre efficace et pratique à mettre en œuvre tant sur des parois nues que sur des parements en béton des galeries. Ce travail de thèse a surtout apporté deux contributions importantes pour la caractérisation non destructive des roches argileuses et de leur état physique.

La première contribution porte sur la détection par la méthode PP de la minéralisation présente dans les hétérogénéités de la matrice argileuse. Sur le site de Tournemire, la minéralisation (*plus précisément la présence de pyrite*) se concentre dans certaines zones (ou hétérogénéités) particulièrement intéressantes à identifier en termes de conditions de sûreté. En effet, ces hétérogénéités structurales et texturales associées à différentes échelles d'espace correspondent à des structures de type *fracture tectonique (millimétrique-centimétrique : remplies de calcite avec un pourcentage de l'ordre de 10 % de pyrite en masse)*, *faille tectonique (métrique : brèches)* et aussi à des roches de différents textures possédant toutes des nodules calcaires (*centimétrique-décimétrique : avec un pourcentage de l'ordre de 5 % de pyrite en masse*). Ces hétérogénéités structurales et texturales ont donné systématiquement des réponses PP élevées (valeurs élevées de chargeabilité et de phase) tant dans le domaine temporel que dans le domaine spectral. Il est important de souligner ici que les tomographies électriques de résistivité ne pouvaient pas à elles seules discriminer ces hétérogénéités structurales et texturales dans la zone endommagée : le contraste de résistivité entre ces hétérogénéités et la matrice désaturée n'était pas suffisant.

La deuxième contribution de ce travail concerne la compréhension de l'impact (spatiale et temporel) de l'excavation d'une galerie sur les propriétés électriques/électromagnétiques aux basses fréquences de l'argilite. Dans le cas de la station expérimentale de Tournemire, l'excavation des galeries induit des perturbations mécaniques et hydriques mises en évidence par l'apparition de fractures néoformées et des fractures de désaturation respectivement de manière différée. Les fractures néoformées se développent particulièrement aux radiers. Quant aux fractures de désaturation, elles apparaissent en hiver (en période sèche) aux parois verticales des galeries.

Dans ce contexte, nous avons montré dans la galerie Est-96, la plus ancienne galerie du site, que l'EDZ caractérisée par une désaturation significative de la roche apparaît le plus souvent comme une bande continue de valeurs de résistivité élevées (d'épaisseur comprise entre 0,5 et 0,8 m au niveau du radier) et une bande plus ou moins continue de plus faibles chargeabilités sur les sections électriques inversées. L'impact de la désaturation a été mieux observé à partir des profils au niveau des parois verticales des galeries. La désaturation bien soulignée au radier et liée à l'âge de la galerie se développe à partir des fractures néoformées remplies d'air. Ces dernières semblent avoir joué un rôle de chemins préférentiels de transport de l'air dans la roche en intensifiant en profondeur la désaturation du géomatériau.

Comparativement aux deux autres galeries plus récentes (galeries Est-03 et Nord-08) et à mode d'excavation sensiblement égal, l'EDZ de la galerie Est-96 a montré une extension plus importante.

Là encore, la méthode de la résistivité électrique toute seule n'a pas permis de distinguer la désaturation de la roche de la fracturation (i.e. fractures tectoniques) parce que les deux phénomènes induisent des résistivités élevées. La méthode PPT a pu alors clarifier les interprétations (*résistivités élevées-chargeabilités faibles associées à la désaturation, résistivités élevées-chargeabilités élevées associées à la présence des fractures tectoniques*).

Un suivi de l'évolution de l'EDZ par PPT suivant deux campagnes de mesures à deux différentes périodes d'hygrométrie contrastée (*juin 2008 et février 2009*) a mis en évidence que les variations de résistivité et de chargeabilité étaient plus importantes au radier par rapport à celles observées en paroi verticales.

La campagne menée dans la galerie Est-03 possédant un radier en béton (environ 30 cm d'épaisseur ; béton non armé) a montré une organisation plutôt verticale des résistivités en trois couches : (a) la première couche la plus superficielle correspondant bien à la couche de béton ; (b) la deuxième couche intermédiaire possédait des résistivités élevées (supérieures à 500 $\Omega \cdot m$) associée à l'argilite désaturée et/ou fracturée lors de l'excavation ; cette deuxième couche possédait une épaisseur irrégulière variant de 30 cm à plus de 60 cm ; (c) la troisième couche, la plus profonde (résistivités inférieures à 100 $\Omega \cdot m$) correspondait à l'argilite saine. Dans ce contexte, la PPT n'a pas apporté d'information supplémentaire significative.

Dans ce travail de thèse, outre la méthode PPT, la méthode de Polarisation Provoquée Spectrale (PPS) a été mise en œuvre (46 mHz-12kHz) pour les mêmes objectifs. Dans un premier temps, nous avons confirmé la cohérence des résultats de la méthode PP acquis tant dans le domaine spectral (aux basses fréquences) que dans le domaine temporel (23 - 93 Hz). Dans un deuxième temps, à relativement plus hautes fréquences (187 Hz, 375 Hz), la méthode PPS appliquée à partir du radier non-bétonné de la galerie la plus ancienne (*Est-96*) a apporté des éléments supplémentaires et pertinents par rapport aux résultats de la PPT acquis pour l'identification de l'état désaturé et fracturé de la roche (indépendamment de l'influence de la minéralisation). Les polarisabilités fortes observées aux moyennes fréquences (187 Hz, 375 Hz, 750 Hz) (*tomographies de phase*) ont été interprétés par des processus de polarisation spécifiquement associées à des effets d'interface où la surface des argiles jouerait un rôle important (polarisation de type Maxwell-Wagner).

L'organisation spatiale des valeurs de phases et celle des résistivités élevées ont été parfaitement cohérentes entre elles : la phase à moyenne fréquence (p.ex. 375 Hz) avec la résistivité semblent être des indicateurs d'un même état physique (état désaturé et endommagé). Le dispositif électrique Wenner- α semble d'ailleurs être le plus adapté pour l'identification de cet état physique de l'argilite. Nous soulignons ainsi ici l'intérêt d'appliquer la méthode de résistivité électrique en parallèle à la méthode PP pour la complémentarité et la fiabilité des interprétations.

En complémentarité des résultats *in situ*, le volet expérimental en laboratoire a permis de juger l'influence de la teneur en argile, de la minéralogie de l'argile, de la salinité de l'électrolyte, du traitement thermique et du changement de la tailles des grains de sable sur les propriétés électromagnétiques aux basses fréquences de mélanges argilo-sableux non consolidés et saturés. Les résultats obtenus ont montré que les phénomènes de polarisation dans un mélange argileux incluant une autre phase de géomatériau (*i.e. sable pour notre cas*) sont liés au premier ordre aux propriétés surfaciques (*i.e. capacité d'échange cationique, surface spécifique*) et à la teneur en argile. La réponse PPS des mélanges est fortement sensible à la minéralogie des différentes familles d'argile ; elle met également en évidence une diversité de comportement électrique d'argiles de même famille minéralogique.

Pour tous les mélanges, le phénomène de polarisation est indépendant de la salinité indépendamment de la teneur en argile (*sauf dans le cas où 1 % de teneur en argile a été utilisé : une légère dépendance de la polarisation vis-à-vis de la salinité a été observée*) et de la minéralogie des minéraux argileux mis en jeu. Le traitement thermique et la variation de la taille des grains de sable dans les mélanges effectués n'ont pas modifié l'amplitude de polarisation. Contrairement à ce que suggère la littérature, nos échantillons argilo-sableux

saturés n'ont pas présenté d'optimum de la teneur en argile pour lequel le phénomène de polarisation serait maximum.

En guise de perspectives, les futures études *in situ* par la méthode PPT pourraient s'intéresser à élargir les gammes classiques des valeurs des paramètres d'acquisition : en choisissant des créneaux d'injection largement plus longs (4 s et 8 s par exemple) et en augmentant le pas d'échantillonnage (surtout en paroi afin d'obtenir un nombre de données et une précision plus importante) pour aller progressivement vers des acquisitions 3D.

Nous suggérons de coupler des données spectrales acquises sur un large spectre avec des données pétrophysiques (*distribution des tailles de grain, mesures de porosité et de la teneur en eau, caractérisation de l'état de fissuration par mesures optiques*) ainsi que minéralogiques déterminées à partir d'échantillons prélevés sur les secteurs de mesure. Aussi le suivi PPS aux moyennes fréquences (i.e. 375 Hz) suivant différentes périodes (monitoring) pourra être privilégié.

En outre, afin toujours d'approfondir nos connaissances sur les relations entre paramètres PP-fissuration-hygro-métrie, nous pouvons également envisager des mesures de tomographies de PPT et PPS sur des maquettes (en laboratoire) suffisamment grandes (i.e. de taille décimétrique) pour se rapprocher des conditions *in situ* et éviter des effets de bords (**c.f. Figure ii.**) (voir les travaux expérimentaux en géomécanique de [Pham, 2006](#)). Ces échantillons décimétriques permettront de surcroît d'investiguer une échelle d'espace intermédiaire (entre la galerie souterraine plurimétrique et l'échantillon centimétrique).



Figure ii. Echantillons d'argilite résinés afin d'éviter la désaturation (diamètre : 40 cm, hauteur : 50 cm)

A propos des outils d'interprétation, nous voudrions attirer l'attention du lecteur sur le besoin de codes de calcul tenant compte explicitement de la géométrie particulière des galeries souterraines (*fer en cheval ou circulaire*) pour l'inversion des mesures de résistivité et de chargeabilité. Jusqu'à ce que ce besoin soit satisfait, nous proposons d'opter pour des petit dispositifs localisés en paroi verticale et au radier qui ont le mérite de contourner simplement la complexité de la géométrie d'une galerie souterraine.

En matière de recherches à mener au laboratoire, il serait aussi intéressant de compléter nos mesures obtenues sur des mélanges argilo-sableux en intégrant :

- (a) *différents degrés de saturation* afin d'observer l'influence de la variation de teneur en eau sur la réponse spectrale suivant la teneur et la minéralogie des argiles. De telles expériences pourraient révéler des liens entre réponses PPS et phénomènes de polarisation induit à différents niveaux microstructuraux (i.e. micro-macropores).
- (b) *des cycles de température*. A partir de traitements thermiques de nature cyclique, il s'agirait de provoquer des évolutions de la microstructure du géomatériau argileux. De cette manière, les évolutions texturales (ou microstructurales) du géomatériau argileux pourront être étudiées en relation avec les propriétés de polarisation et de conduction électriques de ce dernier. Ce travail devra être bien évidemment complété par des observations pétrographiques classiques à l'échelle microscopique : MEB (microscope électronique à balayage), MEBE (microscope électronique à balayage environnemental), MET (microscope électronique à transmission), autoradiographie.
- (c) *des contraintes mécaniques (compaction)* qui pourraient être également appliquées afin d'établir un lien entre les mesures *in situ* (argilite indurée) et nos mesures en laboratoire (mélanges non-consolidés). Pour ces expériences, une caractérisation au MEBE des échantillons avant et après la compaction pourra être réalisée.

Au niveau de l'interprétation de nos mesures obtenues en laboratoire, un travail de modélisation est prévu à très court terme. La modélisation s'appuiera sur le modèle de [Leroy et Revil \(2008\)](#) qui prend en compte (i) des réactions de complexation de surface des minéraux argileux (kaolinite, smectite), (ii) la polarisation de la couche de Stern, et (iii) un modèle macroscopique comprenant la polarisation électrochimique des grains et la contribution de l'effet Maxwell-Wagner (suivant une approche de type milieux effectifs).

Références bibliographiques

A

Alheid, H.-J., (2002) Geophysical characterization of excavation disturbed zones, *In the 2002 International EDZ Workshop: The Excavation Damage Zone - Causes and Effects*, 2003. Ontario, Canada: Atomic Energy of Canada Limited.

Apparao, A., & Rao, T.G., (1974) Depth of investigation in resistivity methods using linear electrodes, *Geophys. Prospect.*, **22**, 211-223.

Avena, M. J., & De Pauli, C.P., (1996) Modelling the interfacial properties of an amorphous aluminosilicate dispersed in aqueous NaCl solutions, *Colloids Surf. A.*, **118**, 75-87, doi:10.1016/0927-7757(96)03668-0.

B

Barbreau, A., & Boisson, J.Y., (1993) Caractérisation d'une formation argileuse : synthèse des principaux résultats obtenus à partir du tunnel de Tournemire de Janvier 1992 à Juin 1993. CCE report no. 1 EUR 15736 FR, ref. SERGD 93r22.

Barker, R.D., (1989) Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays, *Geophysics*, **54**(8), 1031-1037.

Bemer, E., Longuemare, P., & Vincké, O., (2004) Poroelastic parameters of Meuse/Haute Marne argillites: effect of loading and saturation states, *Appl. Clay Sci.*, **26**, 359-366.

Berryman, J. G., Pride, S.R., & Wang, H.F., (2002) A differential scheme for elastic properties of rocks with dry and saturated cracks, *Geophys. J. Int.*, **151**, 597-611.

Bertin, J., & Loeb, J., (1976) Experimental and theoretical aspects of induced polarization: presentation and application of the IP method- case histories, *Geoexploration Monograph*, No. 7, Vol. 1, Gebürder-Borntraeger, Berlin, 214 p.

Bertin J., (1968) Some aspects of induced polarization (time domain), *Geophys. Prospec.*, **16**, 401-426.

Binley, A., Kruschwitz, S., Lesmes, D., & Kettridge, N., (2010) Exploiting the temperature effects on low frequency electrical spectra of sandstone: A comparison of effective diffusion path lengths, *Geophysics*, **75**(6), A43-A46.

Binley, A., Slater, L.D., Fukes, M. & Cassiani, G., (2005) Relationship between spectral induced polarization and hydraulic properties of saturated and unsaturated sandstones, *Water Resour. Res.*, **41**, W12417, doi: 10.1029/2005WR004202.

Binley, A., & Kemna, A., (2005) DC resistivity and induced polarization methods, *in Hydrogeophysics*, Water Sci. Technol. Libr., Vol. 50, edited by Y. Rubin and S. S. Hubbard, 129-156, Springer, New York (<http://www.springerlink.com/content/g664726v71342g10/>).

Binley, A., Cassiani, G., Middleton, R., & Winship, P., (2002) Vadose zone flow model parameterisation using cross-borehole radar and resistivity imaging, *Journal of Hydrology*, **267**, 147-160.

Bleil, D.F., (1953) Induced polarization: A method of geophysical prospecting, *Geophysics*, **18**, 636-661.

Blümling, P., Bernier, F., Lebon, P., & Martin, C.D., (2007) The Excavation-Damaged Zone in Clay Formations - Time-dependent Behaviour and Influence on Performance Assessment Elsevier, *Phys. Chem. Earth*, **32**, 588-599.

Boisson, J.Y., (2005) Clay Club Catalogue of Characteristics of Argillaceous Rocks, Nuclear Energy Agency Organisation for Economic co-operation and development, ISBN 92-64-01067-X.

Boisson, J.Y., Bertrand, L., Heitz, J.F., & Golvan, Y.M.-L., (2001) In situ and laboratory investigations of fluid flow through an argillaceous formation at different scales of space and time, Tournemire tunnel, Southern France, *Hydrogeology Journal*, **9**, 108-123.

Boisson, J.Y., Cabrera, J., & De Windt, L., (1998) Etude des écoulements dans un massif argileux, laboratoire souterrain de Tournemire, rapport Technique EUR 18338, Commission Européenne, Luxembourg.

Boisson, J.Y., (1996a) Caractérisation d'une formation argileuse - Etude des transferts au laboratoire à partir des argilites du tunnel de Tournemire, CCE report no. 3, ref. SERGD 96r06.

Boisson, J.Y., (1996b) Caractérisation d'une formation argileuse - Caractérisations hydrogéologiques in situ des argilites du tunnel de Tournemire, CCE report no. 4, ref. SERGD 96r11.

Boisson, J.Y., (1995) Etude de l'écoulement dans un massif argileux – Tournemire, CCE report no. 2, ref. SERGD 95r15.

Bonin, B., (1998) Deep geological disposal in argillaceous formations: studies at the Tournemire test site, *Journal of Contaminant Hydrology*, **35**, 315-330.

Bossard, P., Meier, M.P., Moeri, A., Trick, T., & Major, J-C., (2002) Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory, *Engineering Geology*, **66**, 19-38, doi: 10.1016/S0013-7952(01)00140-5.

Börner, F.D., (2006) Complex conductivity measurement, *in Groundwater Geophysics - A Tool for Hydrogeology*, edited by R. Kirsh, 119-153, Springer, Berlin, Germany (<http://www.springerlink.com/content/177v602013i24751/>).

Börner, F. D., Schopper, J. R. & Weller, A., (1996) Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements, *Geophys. Prospect.*, **44**, 583-601.

Börner, F., & Schön, J., (1995) Low Frequency Complex Conductivity Measurements of microcrack Properties, *Surveys in Geophysics*, **16**, 121-135, Kluwer Academic Publishers.

Börner, F., & Schön, J., (1991) A relation between the quadrature component of electrical conductivity and the specific surface area of sedimentary rocks: The LogAnalyst, **32**, 612-613.

Brandes, I.M., (2005) The negative chargeability of clays, *PhD thesis*, School of Civil and Environmental Engineering, the University of NSW.

Breede, K., Esser, O., Zimmermann, E., Huisman, J.A., & Kemna, A., (2010) Characterizing structural and textural subsurface patterns using spectral induced polarization: Effects of saturation, 12, EGU2010-5473, EGU General Assembly, 2010.

Bruggeman, D., (1935) Berechnung Verschiedeneren Physicalischer Konstanten von Heterogenen Substanzen, *Ann. Phys.*, **24**, 636-679.

Bussian, A. E., (1983) Electrical conductance in a porous medium, *Geophysics*, **48**, 1258-1268.

C

Cabrera, J., (2005) Forages rayonnants pour caractériser la zone endommagée autour des ouvrages de la Station Expérimentale de Tournemire, réalisation, suivi géologique et diagraphies Période 2004-2005, Rapport IRSN DEI/SARG/2005-067, 80 p.

Cabrera, J., Beaucaire, C., Bruno, G., De Windt, L., Genty, A., Ramanbasoa, N., Rejeb, A., Savoye, S., & Volant, P., (2001) Projet Tournemire - Synthèse des programmes de recherche 1995-1999, Rapport IPSN DPRE/SERGD 01-19, Paris, France.

Cabrera, J., Volant, Ph., Baker, C., Pettit, W. & Young, R.P., (1999) Structural and geophysical investigations of the EDZ in indurated argillaceous media: the tunnel and the galleries of the IPSN Tournemire Site, France. *Proc. of the 37th US Rock Mechanics Sympo., Vail, USA*, 957-964.

Cabrera, J., (1995) Etude structurale et tectonique - Relations avec la perméabilité - Site de Tournemire Campagne 1994 : Réalisation des forages rayonnants ID, Rapport IPSN.

Campbell, D.L., Horton, R.J., & Beanlang, S., (2000) Geoelectrical laboratory measurements of materials from the May Say mine dump, Southwestern Colorado, Open-File Report 00-382, USGS, 27 p.

Canan, B., (1999) Dielectric properties of mixtures of clay-water-organic compounds, *PhD Thesis*, Dept. of Geophysics, Colorado School of Mines, Golden, 332 p.

Charpentier, D., Cathelineau, M., Mosser-Ruck, R., & Bruno, G., (2001) Evolution minéralogique des argilites en zone sous-saturée oxydée : exemple des parois du tunnel de Tournemire (Aveyron, France), *C. R. Acad. Sci. Paris*, **332**, 601-607.

Chelidze, T. L., & Gueguen, Y., (1999a) Electrical spectroscopy of porous rocks: a review-I. Theoretical models, *Geophys. J. Int.*, **137**, 1-15.

Chelidze, T. L., & Gueguen, Y., (1999b) Electrical spectroscopy of porous rocks: a review-II. Experimental results and interpretation, *Geophys. J. Int.*, **137**, 16-34.

Chelidze, T.L., Derevjanko, A.I. & Kurilenko, O.D., (1977) Electrical spectroscopy of heterogeneous systems, Naukova Dumka, Kiev (in Russian).

Chen, Y., & Or, D., (2006a) Geometrical factors and interfacial processes affecting complex dielectric permittivity of partially saturated porous media, *Water Resour. Res.*, **42**, W06423, doi: 10.1029/2005WR004744.

Chen, Y., & Or, D., (2006b) Effects of Maxwell-Wagner polarization on soil complex dielectric permittivity under variable temperature and electrical conductivity, *Water Resour. Res.*, **42**, W06424, doi: 10.1029/2005WR004590.

Coggon, J.H., (1984a) New three-point formulas for inductive coupling removal in induced polarisation, *Geophysics*, **49**, 307-309.

Coggon, J.H., (1984b) New three-point formulas for inductive coupling removal in induced polarisation - erratum, *Geophysics*, **49**, 1395.

Coggon, J.H. (1971) Electromagnetic and electric modelling by the finite element method, *Geophysics*, **36**, 132-155.

Cole, K. S. & Cole, R. H. (1941) Dispersion and absorption in dielectrics, *J. Chem. Phys.*, **9**, 341-351.

Collet, L.S., (1959) Laboratory investigation of overvoltage, *Overvoltage Research and Geophysical Applications* (Ed. J.R. Wait), Pergamenon, Oxford.

Comparon, L., (2005) Etude expérimentale des propriétés électriques et diélectriques des matériaux argileux consolidés, *Thèse de doctorat*, Institut de Physique du Globe de Paris, 398 p.

Contrucci, I., Cabrera, J., Klein, E., & Ben-Slimane, K., (2007) EDZ Investigations by ultrasonic borehole logging in drifts of different ages excavated in argillaceous formations

of the Tournemire experimental station (Aveyron, France), Clays in Natural and engineering barriers for radioactive waste confinement, Lille, September.

Cosenza, P., Ghorbani, A., Camerlynck, C., Rejiba, F., Guérin, R., & Tabbagh, A., (2009) Effective medium theories for modelling the relationships between electromagnetic properties and hydrological variables in geomaterials: a review, *Near Surface Geophysics*, **7**, 563-578.

Cosenza, P., Ghorbani, A., Florsch, N. & Revil, A., (2007) Effects of drying on the low-frequency electrical properties of Tournemire agillites, *Pure Appl. Geophys.*, **164**, doi: 10.1007/s00024-007-0253-0.

Cosenza, P., & Tabbagh, A., (2004) Electromagnetic determination of clay water content: role of the microporosity, *Appl. Clay Sci.*, **26**, 21-36.

Cosenza, P., Camerlynck, C., & Tabbagh, A., (2003) Differential effective medium schemes for investigating the relationship between high-frequency relative dielectric permittivity and water content of soils, *Water Resour. Res.*, **39**, 1230, 13 p, doi: 10.1029/2002WR001774.

Côte, P., & Leparoux, D., (2008) Etude de faisabilité pour la caractérisation de l'EDZ à partir de l'analyse des Ondes sismiques de Surface. Application au contexte du site expérimental de Tournemire, Rapport final, IRSN Accord spécifique n°3, 27 pages, 27 octobre 2008.

Côte P., & Leparoux D., (2007) Mesures en Ondes de Surface - Site de Tournemire, Rapport Final 29 pages, 28 figures, 2007.

Croisé, J., Schlickenrieder, L., Marschall, P., Boisson, J., Vogel, P., & Yamamoto, S., (2004) Hydrogeological investigations in a low permeability claystone formation: the Mont Terri Rock Laboratory, *Phys. Chem. Earth*, **29**, 3-15.

D

Dahlin, T., Leroux, V., & Nissen, J., (2002) Measuring techniques in induced polarisation imaging, *J. of Appl. Geophys.*, **50**, 279-298.

Dannowski, G., & Yaramanci, U., (1999) Estimation of water content and porosity using combined radar and geoelectrical measurements, *Eur. J. Environ. Eng. Geophys.*, **4**, 71-85.

Darboux-Afouda, R., & Louis, P., (1989) Contribution des mesures à l'anisotropie électrique à la recherche des aquifères de fractures en milieu cristallin au Benin, *Geophys. Prospect*, **37**, 91-105.

Davidson, D.W., & Cole, R.H., (1950) Dielectric relaxation in glycerine, *J. Chem. Phys.*, **18**, 1417.

Debye, P., (1929) Polar molecules, Dover Publ., New York.

DeGroot-Hedlin, C. & Constable, S., (1990) Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data, *Geophysics*, **55**, 1613-1624.

De Lima, O.A.L. & Niwas, S., (2000) Estimation of hydraulic parameters of shaly sandstone aquifers from geoelectrical measurements, *J. Hydrol.*, **235**, 12-26, doi: 10.1016/S0022-1694(00)00256-0.

De Lima, O.A.L., & Sharma, M.M., (1992) A generalized Maxwell-Wagner theory for membrane polarization in shaly sands, *Geophysics*, **57**, 431-440.

De Witt, G.W., (1979) Parameter studies of induced polarization spectra, *Ms. Sc. Thesis*, University of Utah, **57**, 431-440.

Dey, A., & Morrison, H.F., (1979a) Resistivity modelling for arbitrary shaped two-dimensional structures, *Geophys. Prospect.*, **27**, 1020-1036.

Dey, A., & Morrison, H.F., (1979b) Resistivity modelling for arbitrarily shaped three-dimensional shaped structures, *Geophysics*, **44**, 753-780.

Dias, C.A., (2000) Developments in a model to describe low-frequency electrical polarization of rocks, *Geophysics*, **65**, 437-451.

Dieter, K., Paterson, N.R., & Grant, F. S., (1969) IP and resistivity type curves for three dimensional bodies, *Geophysics*, **34**, 615-632.

Dirksen, C. & Dasberg, S., (1993) Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57**, 660-667.

Dubois, P., (1985) Notes karstologiques sur les Grands Causses, Rapport technique 19, Bulletin de la société géologique Languedocienne, 3-4.

Duckworth, K., & Calvert, H.T., (1995) An examination of the relationship between time-domain integral chargeability and the Cole-Cole impedance model, *Geophysics*, **60**(4), 1249-1252.

Dukhin, S.S., & Shilov, V.N., (1974) Dielectric phenomena and the double layer in disperse systems and polyelectrolytes, John Wiley, New York.

E

Edwards, L.S., (1977) A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization, *Geophysics*, **42**, 1020-1036.

Escoffier, S., Homand, F., Giraud, A., & Hoteit, N., (2001) Under stress permeability determination of the Meuse/Haute-Marne argillite, In: P., D. (Ed.) 6th International Workshop on Key Issues in Wastes Isolation Research KIWIR, Paris, 28-30 November.

Evjen, H.M., (1938) Depth factors and resolving power of electrical measurements, *Geophysics*, **3**, 78-95.

F

Fan, X., (1998) Modellierung und Inversion von gleichstromgeoelektrischen Bohrlochmessungen mit 2D und 3D Finite Differenzen, *PhD Thesis*, Technical University Berlin, Germany.

Fatmi, H., Mangin, A., & Matray, J.M., (2004) Traitement et exploitation des séries temporelles de pression, température et humidité obtenues sur le site de Tournemire. Rapport IRSN/DEI/SARG 04-24, Paris, France.

Feng, S., & Sen, P.N., (1985) Geometrical model of conductive and dielectric properties of partially saturated rocks, *J. Appl. Phys.*, **58**, 3236-3243.

Fixman, M., (1980) Charged macromolecules in external fields. I. The sphere, *J. Phys. Chem.*, **72**, 5177-5186, doi: 10.1063/1.439753.

Fraser, D.C., Keevil, N.B., & Ward, S.H., (1964) Conductivity spectra of rocks from the Craigmont ore environment, *Geophysics*, **29**, 832-847.

Fuller, B. D., & Ward, S. H., (1970) IEEE Trans. Geosci. Electronics, GE-8, no. 1.

G

Gasc-Barbier, M., & Tessier, D., (2007) Structural modifications of a hard deep clayey rock due to hydro-mechanical solicitations, *Int J Geomech*, **7**, 227-235.

Gasc-Barbier, M., Cosenza, P., Ghoreychi, M., Chanchole, S., & Tessier, D., (2000) Conception d'un essai triaxial à succion contrôlée : mesure des déformations, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, **330**, 97-103.

Gautschi, A., (2001) Hydrogeology of a fractured shale Opalinus clay: implications for deep geological disposal of radioactive wastes, *Hydrogeology Journal*, **9**, 97-107.

Ghorbani, A., Cosenza, P., Revil, A., Zamora, M., Schmutz, M., & Florsch, N., (2009) Noninvasive monitoring of water content and textural changes in clay-rocks using Spectral Induced Polarization: a laboratory investigation, *Appl. Clay Sci.*, **43**, 493-502, doi: 10.1016/j.clay.2008.12.007.

Ghorbani, A., Camerlynck, C., Florsch, N., Cosenza, P., & Revil, A., (2007a) Bayesian inference of the Cole-Cole parameters from time and frequency domain induced polarization, *Geophys. Prospect.*, **55**, 589-605.

Ghorbani, A., Camerlynck, C., & Florsch, N., (2007b) A Matlab program to invert 1D Spectral Induced Polarization data for Cole-Cole model including electromagnetic effects,

Poster, 5th Decennial International Conference on Mineral Exploration, poster, Toronto, Canada, 9-12 Sept. 2007.

Gibert, D., Nicollin, F., Kergosien, B., Bossart, P., Nussbaum, C., Grislin-Mouëzy, A., Conil, F. & Hoteit, N., (2006) Electrical tomography monitoring of the excavation damaged zone of the gallery 04 in the Mont Terri Rock Laboratory: field experiments and preliminary results, *Appl. Clay Sci.*, **33**, 21-34.

Glover, P.W.J., Gómez, J.B., Meredith, P.G., (2000) Fracturing in saturated rocks undergoing triaxial deformation using complex electrical conductivity measurements: experimental study, *Earth and Planetary Science Letters*, **5621** (2000), 201-213.

Glover, P.W.J., Gómez, J.B., Meredith, P.G., Hayashi, K., Sammonds, P.R., Murrell, S.A.F., (1997) Damage of saturated rocks undergoing triaxial deformation using complex electrical conductivity measurements: experimental results, *Phys. Chem. Earth*, **22**, 57-61.

Glover, P.W.J., Gómez, J.B., Meredith, P.G., Boon, S.A., Sammonds, P.R., & Murrell, S.A.F., (1996) Modelling the stress-strain behaviour of saturated rocks undergoing triaxial deformation using complex electrical conductivity measurements, *in Surveys in Geophysics*, **17**, 307-330, doi: 10.1007/BF01904046.

Grard, R., & Tabbagh, A., (1991) A mobile four-electrode array and its application to the electrical survey of planetary grounds at shallow depths, *J. of Geophys. Research*, **96**, B-3, 4117-4123.

Grant, T.W., (1990) Dipole-dipole electromagnetic coupling for 3D models: *M.Sc. thesis*, Univ. of Utah.

Grissemann, C., Rammlmair, D., Siegwart, C., & Foullet, N., (2000) Spectral induced polarization linked to image analyses: a new approach, *In Rammlmair et al. (eds) Appl. mineralogy*, Balkema, Rotterdam, 561-564.

Guéguen, Y., & Palciauskas, V., (1992) Introduction à la physique des roches, Hermann, éditeurs des sciences et des arts, 299 p.

Günther, T., Rücker, C., & Spitzer, K., (2006) Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography – II. Inversion, *Geophys. J. Int.*, **166**, 506-517.

H

Ha, H.S., Kim, D. S., & Park, I.J., (2010) Application of electrical resistivity techniques to detect weak and fracture zones during underground construction, *Environ Earth Sci.*, **60**, 723-731, doi: 10.1007/s12665-009-0210-6.

Hanai, T., (1968) Electrical properties of emulsions, in *Emulsion Science*, 354-478, ed. Sherman, P., Academic Press, New York.

Hedan, S., Cosenza, P., Dudoignon, P., Valle, V., Laforest, C., & Cabrera, J., (2010) Investigation of the fracturing process induced by desiccation in Tournemire argillites using digital image correlation, Alert-Geomechanics Workshop, Aussois, 3 sept. 2010.

Hoek, E., Kaiser, P.K., & Bawden, W.F., (1995) Support of Underground Excavations, in *Hard Rock*, Balkema, Rotterdam, Brookfield.

Hoek, E., & Brown, E.T., (1980) Underground excavations in rock, Institution of Mining and Metallurgy, London.

Hoekstra, P. & Doyle, W.T., (1971) Dielectric relaxation of surface adsorbed water, *J. Colloid Interface Sci.*, **36**, 513-521.

Hohmann, G.W., (1973) Electromagnetic coupling between grounded wires at the surface of a two-layer Earth, *Geophysics*, **38**, 854-863.

Hönig, M., & Tezkan, B., (2007) 1D and 2D Cole-Cole inversion of time domain induced polarization data, *Geophys. Prospect.*, **55**, 117-133.

Hördt, A., Blaschek, R., Kemna, A., & Zisser, N. (2007) Hydraulic conductivity estimation from induced polarisation data at the field scale - the Krauthausen case history, *J. Appl. Geophys.*, **62**, 33-46.

I

Ingeman-Nielsen, T., & Baumgartner, F., (2006) CR1mod, a Matlab program to model 1D complex resistivity effects in electrical and electromagnetic surveys, *Computers and Geosciences*, **32**, 1411-1419.

J

Jaggar, S.R., & Fell, P.A., (1988) Forward and inverse Cole-Cole modelling in the analysis of frequency domain electrical impedance data, *Expl. Geophys.*, **19**, 463-470.

Jougnot, D., Ghorbani, A., Revil, A., Leroy, P. & Cosenza, P., (2010) Spectral induced polarization of partially saturated clay-rocks: a mechanistic approach, *Geophysical Journal International*, **180**, 210-224.

Jougnot, D., (2009) Etude géophysique des phénomènes de transfert dans les argilites du COx partiellement saturées en eau : Application à l'EDZ du site de Bure, *Thèse de doctorat*, Université de Savoie, 343 p.

Jullien, M., Raynal, J., Kohler, E., & Bildstein, O., (2005) Physicochemical Reactivity in Clay-Rich Materials: Tools for Safety Assessment, Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, **60**, 107-120, doi: 10.2516/ogst:2005007.

K

Keller, G.V. & Frischknecht, F.C., (1966) Electrical methods in geophysical prospecting, Pergamon Press Inc., Oxford.

Kemna, A., (2000) Tomographic inversion of complex resistivity - theory and application, *Ph.D. thesis*, Bochum Univ. (published by: Der Andere Verlag, Osnabrück, Germany), 196 p.

Klein, D.J., & Sill, W.R., (1982) Electrical properties of artificial clay-bearing sandstones, *Geophysics*, **47**, 1593-1605.

Knight, R., & Nur, A., (1987) The dielectric constant of sandstones, 60kHz to 4MHz, *Geophysics*, **52**, 644-654.

Knoll, M.D., (1996) A petrophysical basis for Ground-penetrating radar and very early time electromagnetics, electrical properties of sand-clay mixtures, *Ph.D. Thesis*, University of British Columbia, 316 p.

Koch, K., Kemna, A., Irving, J., & Holliger, K., (2010) Impact of controlled changes in grain size and pore space characteristics on the hydraulic conductivity and spectral induced polarization response of “proxies” of saturated alluvial sediments, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, **7**, 6057-6080, doi: 10.5194/hessd-7-6057-2010.

Kruschwitz, S., Binley, A., Lesmes, D., & Elshenawy, A., (2010) Textural controls on low-frequency electrical spectra of porous media, *Geophysics*, **75**, P.WA113-WA123, 10.1190/1.3479835.

Kruschwitz, S., & Neiderleithinger, E., (2009) Complex resistivity tomography in laboratory and field studies - a promising NDT tool, NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes, France, June 30th – July 3rd, 2009 (<http://www.ndt.net/article/ndtce2009/papers/170.pdf>).

Kruschwitz, S. & Yaramanci, U., (2004) Detection and characterization of the disturbed rock zone in claystone with complex resistivity method, *J. appl. Geophys.*, **57**, 63-79, doi: 10.1016/j.jappgeo.2004.09.003.

L

Lataste, JF., Sirieix, C., Breysse, D., & Frappa, M., (2003) Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering, *Non destructive Testing and Evaluation International*, **36**, 383-384.

Lataste, JF., Breysse, D., Sirieix, C., Frappa, M., & Bournazel, J.P., (2002) Fissuration des ouvrages en béton armé, auscultation par mesure de résistivité électrique. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, **239**, 79-91.

Lavergne, M., (1986) Méthodes sismiques. Editions Technip, Paris.

Leroy, P., & Revil, A., (2009) A mechanistic model for the spectral induced polarization of clay materials, *J. Geophys. Res.*, **114**, B10202, doi: 10.1029/2008JB006114.

Leroy, Ph., Revil, A., Kemna, A., Cosenza, P., & Ghorbani, A., (2008) Complex conductivity of water-saturated packs of glass beads, *J. Colloid Interface Sci.*, **321**, 103-117.

Leroy, P., & Revil, A., (2004) A triple layer model of the surface electrochemical properties of clay minerals, *J. Colloid Interface Sci.*, **270**, 371-380.

Lesmes, D.P., & Friedman, S.P., (2005) Relationships between the electrical and hydrogeological properties of rocks and soils, in *Hydrogeophysics, Water Sci. Technol. Libr.*, **50**, edited by Y. Rubin and S. S. Hubbard, 87-128, Springer, New York.
<http://www.springerlink.com/content/w30841j65246q48k/>

Lesmes, D.P., & K.M. Frye., (2001) The influence of pore fluid chemistry on the complex conductivity and induced polarization responses of Berea sandstone, *J. Geophys. Res.*, **106**, 4079-4090.

Lesmes, D.P., & Morgan, F.D., (2001) Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks, *J. Geophys. Res.*, **106**, 13, 329-13,346, doi: 10.1029/2000JB900402.

Li, Y., & Oldenburg, D.W., (2000) 3-D inversion of induced polarization data, *Geophysics*, **65**, 1931-1945.

Lile, O.B., Backe, H.R., Elvebakk, H., & Buan, J.E., (1994) Resistivity measurements on the sea bottom to map fractures zones in the bedrock underneath sediments, *Geophys. Prospect.*, **42**, 813-824.

Lima, O.A.L., & Niwas, S., (2000) Estimation of hydraulic parameters of shaly sandstone aquifers from geoelectrical measurements, *J. Hydrol.*, **235**, 12-26.

Lockner, D.A., & Byerlee, J.D., (1985) Complex resistivity measurements of confined rock, *J. Geophys. Res.*, **90**, 7837-7847.

Loke, M.H., Chambers, J.E., & Ogilvy, R.D., (2006) Inversion of 2D spectral induced polarization imaging data, *Geophys. Prospect.*, **54**, 287-301.

Loke, MH., (2001) Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. *Geotomo Software*: Penang, Malaysia. <http://www.geoelectrical.com>.

Loke, M.H., & Barker, R., (1996) Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method, *Geophys. Prospect.*, **44**, 131-152.

Loke, M.H., & Barker, R., (1995) Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections, *Geophysics*, **60**, 1682-1690.

Luo, Y., & Zhang, G., (1998) Theory and application of spectral induced polarization, Geophysical Monograph Series.

Lyklema, J., Springer, M.M., Shilov, V.N., & Dukhin, S.S., (1986) The relaxation of the double layer around colloidal particles and the low-frequency dielectric dispersion: part III. Application of theory to experiments, *J. Electroanal. Chem.*, **198**, 19-26.

Lyklema, J., Dukhin, S.S., & Shilov, V.N., (1983) The relaxation of the double layer around colloidal particles and the low-frequency dielectric dispersion. Part 1. Theoretical considerations, *J. Electroanal. Chem.*, **143**, 1-21, doi: 10.1016/S0022-0728(83)80251-4.

M

Madden, T.R., & Cantwell, T., (1967) Induced polarization, a review, in J. S. Sumner, ed., *Mining geophysics*, vol. II: SEG, 373-400.

Madden, T.R., (1961) Electrode polarization and its influence on the electrical properties of mineralized rocks, *Ph.D. thesis*, Massachusetts Institute of Technology.

Madden, T.R., & Marshall, D.J., (1959) Electrode and membrane polarization: M.I.T. report to A.E.C., RME 3157.

Madden, T.R., & Marshall, D.J., (1958) A laboratory investigation of induced polarization: M.I.T. report to A.E.C., RME 3156.

Magnin, O., Cote P., Leparoux, D., Ben-Slimane, K., & Cabrera, J., (2008) Investigation géophysique pour caractériser l'endommagement autour d'ouvrages souterrains, Journées Nationales de la Géotechnique et de la Géologie de l'ingénieur, Nantes, 18/06/2008.

Major, J., & Silic, J., (1981) Restriction on the use of Cole-Cole dispersion model in complex resistivity interpretation, *Geophysics*, **46**, 916-931.

Makki, L., (2009) Comportement de retrait-gonflement des sols en période de sécheresse, *Thèse de doctorat*, Université Pierre et Marie Curie, 268 p.

Mansoor, N. & Slater, L., (2007) On the relationship between iron concentration and induced polarization in marsh soils, *Geophysics*, **72**, P.A1-A5, 10.1190/1.2374853.

Marescot, L., (2004) Modélisation directe et inverse en prospection électrique sur des structures 3D complexes par la méthode des éléments finis, *Thèse de doctorat en cotutelle à l'Université de Nantes et Lausanne*.

Marshall, D.J., & Madden, T.R., (1959) Induced polarization, a study of its causes, *Geophysics*, **24**, 790-816.

Mathieu, R., Pagel, M., Clauer, N., De Windt, L., Cabrera, J., & Boisson, J.Y., (2000) Paleofluid circulations records in shales: a mineralogical and geochemical study of calcite veins from the experimental Tournemire tunnel site, *European Journal of Mineralogy*, **12**, 377-390.

Matray, J.M., Savoye, S., & Cabrera, J., (2007) Desaturation and structure relationships around drifts excavated in the well-compacted Tournemire's argillite (Aveyron, France), *Engineering Geology*, **90**, 1-16.

Mayor, J.C., Velasco, M., & Garcia-Siñeriz, J.L., (2007) Ventilation experiment in the Mont Terri underground laboratory, *Phys. Chem. Earth*, **32**, 616-628.

Maxwell-Garnett, J.C., (1904) Colours in metal glasses and in metal films, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B*, 203, 385-420.

Maxwell, J.C., (1891) A treatise on Electricity and Magnetism, Dover Publ. Inc., New York.

McGillivray P.R., & Oldenburg D.W., (1990) Methods for calculating Frechet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem: a comparative study, *Geophys. Prospect.*, **38**, 499-524.

Miehe, R., Jockwer, N., Wiczorek, K., & Rothfuchs, T., (2000) Qualification of clay barriers in underground repository systems, Eurosafe conf., Nuclear safety in deregulated markets, Cologne 6-7 November 2000.

Millard, A., Maßmann, J., Rejeb, A., & Uehara, S., (2009) Study of the initiation and propagation of excavation damaged zones around openings in argillaceous rock, *Environmental Geology*, **57**, 1325-1335, doi: 10.1007/s00254-008-1518-3.

Miller, G.F., & Pursey, H., (1955) On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid. In: (4th ed.), Proceeding Royal Society London, Series A **233** (1955), 55-69.

Montes, H.G., Duplay, J., Martinez, L., Escoffier, S., & Rousset, D., (2004) Structural modifications of Callovo-Oxfordian argillite under hydration/dehydration conditions, *App. Clay Sci.*, **25**, 187-194.

N

Nelson, P.H., (1997) Induced polarization research at Kennecott, 1965-1977, *The Leading Edge*, **16**, 29-33.

Nelson, P.H. & Voorhis Van, G.D., (1983) Estimation of sulphide content from induced polarization data, *Geophysics*, **48**, 62-75.

Nelson, G.D., Van Voorhis, G.D., (1973) Letter to the editor regarding the paper "Complex resistivity spectra of porphyry copper mineralization", *Geophysics*, **38**, 984.

Niederleithinger, E., Radic, T., Kretschmar D. & Lienau, R., (1997) Development of a new measuring device and interpretation methods for Spectral Induced Polarization (SIP). Extended Abstracts for Posters from EEGS 8.-11.11.97, Aarhus, 1997.

Nicollin, F., Gibert, D., Lesparre, N., & Nussbaum, Ch., (2010) Anisotropy of electrical conductivity of the excavation damaged zone in the Mont Terri Underground Rock Laboratory, *Geophys. J. Int.*, **181**, 303-320.

Nordsiek, S., & Weller, A., (2008) A new approach to fitting induced-polarization spectra, *Geophysics*, **73**, 235-245, doi: 10.1190/1.2987412.

Norris, A.N., Callegari, A.J., & Sheng, P., (1985) Effective-medium theories for two-phase dielectric media, *Journal of Applied Physics*, **57**, 1990-1996.

Nover, G., Heikamp, S., & Freund, D., (2000) Electrical impedance spectroscopy used as a tool for the detection of fractures in rock samples exposed to either hydrostatic or triaxial pressure conditions, *Natural Hazards*, **21**, 317-330.

O

Ogilvy, A.A., & Kuzmina, E.N., (1972) Hydrogeologic and engineering-geologic possibilities for employing the method of induced potentials, *Geophysics*, **37**, 839-861.

O'Konski, C.T., (1960) Electric properties of macromolecules. V. Theory of ionic polarization in polyelectrolytes, *J. Phys. Chem.*, **64**, 605-619.

Oldenburg, D.W., & Li, Y., (1994) Inversion of Induced Polarization data, *Geophysics*, **59**, 1327-1341.

Olhoeft, G., (1985) Low-frequency electrical properties, *Geophysics*, **50**, 2492-2503.

Olsson, OL., & Winberg, A., (1996) Current understanding of extent and properties of the excavation disturbed zone and its dependence of excavation method, *In Martino JB, Martin CD*, editors Proceedings of the International Conference on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, 101-112.

P

Parasnis, D.S., (1986) Principles of applied geophysics, 4th ed. Chapman and Hall, London, 402 p.

Park, C.B., Miller, R.D., & Xia, J., (1999) Multi-channel analysis of surface waves (MASW), *Geophysics*, **64**, 800-808.

Parkhomenko, E.I., (1971) Electrification phenomena in rocks, Plenum Press, New York.

Patriarche, D., Ledoux, E., Simon-Coincon, R., Michelot, J., & Cabrera, J., (2004) Characterization and modelling of diffusion process for mass transport through the Tournemire argillites Aveyron, France, *Appl. Clay Sci*, **26**, 109-122.

Pelton, W.H., Sill, W. R., & Smith, B. D., (1983) Interpretation of Complex Resistivity and Dielectric Data, Part I., *Geophysical Trans.*, **29**, 297-330.

Pelton, W.H., Ward, S.H., Hallof, P.G., Sill, W.R., & Nelson, P.H., (1978) Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP, *Geophysics*, **43**, 588-609.

Pelton, W. H., (1977) Interpretation of induced polarization and resistivity data, *Ph.D. thesis*, University of Utah.

Pham, Q.T., (2006) Effets de la désaturation et de la resaturation sur l'argilite dans les ouvrages souterrains, *Thèse de doctorat*, EP/X, Paris, France, 202 p.

R

Rakotondratsima, L.Y., Tisot, J.-P., & Masrouri, F., (1983) Comportement géotechnique des schistes cartons, in *Geotechnical Engineering of Hard Soils-Soft Rocks*, Anagnostopoulos et al. (eds), Balkema, Rotterdam.

Ramambasoa, N., (2001) Etude du comportement hydromécanique des argillites: application au site de Tournemire, *Thèse de l'Ecole Polytechnique*, 182 p.

Ramirez, A., & Daily, W., (2001) Electrical imaging at the large block test; Yucca Mountain, Nevada, *J. Appl. Geophys.*, **46**, 85-100.

Ramos da Silva, M., Schroeder, C., & Verbrugge, J.C., (2008) Unsaturated rock mechanics applied to a low-porosity shale, *Engineering Geology*, **97**, 42-52.

Rejeb, A., (2006) De l'observation à la modélisation des zones perturbées par l'excavation des ouvrages dans le site de Tournemire, Note technique, IRSN, DEI/SARG/2006-001.

Rejeb, A., & Cabrera, J., (2006) Time-dependent evolution of the excavation damaged zone in the argillaceous Tournemire site. In: Proc. of the GeoProc Int. Conf. on Coupled T-H-M-C Processes in Geosystems, 22-25 May, Nanjing, P. R. China, 65-74.

Rejeb, A., (2005) Disturbances caused by the excavation of a gallery in the Tournemire site in 2003. In: Safety of the geological disposal of radioactive waste, scientific and technical report, Institute of Radioprotection and Nuclear Safety (IRSN), France.

Revil, A., & Cosenza, P., (2010) Comment on “Generalized effective medium theory of induced polarization” (Michael Zhdanov, 2008, *Geophysics*, **73**, F197-F211), *Geophysics*, **75**, X7; doi: 10.1190/1.3372299.

Revil, A., & Florsch, N., (2010) Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media, *Geophys. J. Int.*, **181**, 1480-1498.

Revil, A., (2000) Thermal conductivity of unconsolidated sediments with geophysical applications, *Journal of Geophysical Research*, **105**, N°B7, 16.749-16.768.

Revil, A., (1999) Ionic diffusivity, electrical conductivity, membrane and thermoelectric potentials in colloids and granular porous media: A unified model, *J. Colloid Interface Sci.*, **212**, 503-522.

Revil, A., & Glover, P.W.J., (1998) Nature of surface electrical conductivity in natural sands, sandstones, and clays, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 691-694.

Revil, A., Cathles, L.M., Losh, S., & Nunn, J.A., (1998) Electrical conductivity in shaly sands with geophysical applications, *J. Geophys. Res.*, **103**, B10, 23925-23936.

Reynolds, J.M., (1997) Introduction to Applied and Environmental Geophysics, 796 pp., John Wiley, New York.

Routh, P.S., Oldenburg, D.W. & Li, Y., (1998) Regularized inversion of spectral IP parameters from complex resistivity data, 68th Ann. Internat. Mtg. Soc. of Expl. *Geophys.*, 810-813.

Rothfuchs, T., & Wieczorek, K., (2005) Monitoring Moisture Distribution in Engineered Barrier Systems and Host Rocks by Geoelectric Tomography, WM '05 Conference, February 27 - March 3, 2005, Tucson, AZ.

Rothfuchs, T., Hartwig, L., Hellwald, K., Komischke, M., Mieke, R., & Wieczorek, K., (2004) Ventilation test at Mont Terri: geoelectric monitoring of Opalinus clay desaturation. - GRS -207- ISBN 3-931995-74-7, November.

Roy, A., (1972) Depth of investigation in Wenner, three-electrode and dipole-dipole DC resistivity methods, *Geophys. Prospect.*, **20**, 329-340.

Roy, A., & Apparao, A., (1971) Depth of investigation in direct-current methods, *Geophysics*, **36**, 943-959.

Rücker, C., Günther, T., & Spitzer, K., (2006) Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography - I. Modelling, *Geophys. J. Int.*, **166**, 495-505.

S

Samstag, F.J., & Morgan, F.D., (1991) Induced Polarization of shaly sands: salinity domain modelling by double embedding of the effective medium theory, *Geophysics*, **56**, 1749-1756.

Samouëlian, A., Cousin, I., Richard, G., Tabbagh, A., & Bruand, A., (2003) Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale, *Soil Science Society of America Journal*, **67**, 1319-1326.

Sasaki, Y., (1992) Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation, *Geophys. Prospect.*, **40**, 453-463.

Sasaki, Y., (1988) Improved two-dimensional resistivity inversion: BUTSURI-TANSA (Geophysical Exploration), **41**, 111-115.

Sato, T., Kikuchi, T., & Sugihara, K., (2000) In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan, *Engineering Geology*, **56**, 97-108.

Savoie, S., Michelot, J.L., Wittebroodt, C., & Altinier, M.V., (2006) Contribution of the diffusive exchange method to the characterization of pore-water in consolidated argillaceous rocks, *J. Contam.Hydrol.*, **86**, 87-104.

Savoie, S., de Windt, L., Beaucaire, C., Bruno, G., & Guitard, N., (2001) Are artificial tracers conservative in argillaceous media ? The Tournemire claystone case. In: Cidu (Ed.), *Water Rock Interaction Proceedings*, **10**, 1383-1386.

Schleifer, N., & Junge, A., (2004) Comparison of different electrodes for frequency domain induced polarisation (IP) surveys, *10th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysical Society (EEGS)*, in Utrecht, Netherlands.

Schlumberger, C., (1920) Etude sur la prospection électrique du sous-sol, Gaultier-Villars et Cie., Paris, 94 p.

Schön, J., (1996) Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics, In Helbig, K., Treitel, S., (eds) *Handbook of geophysical exploration*, **18**, Redwood Books, Trowbridge.

Schurr, J.M., (1964) On the theory of the dielectric dispersion of spherical colloidal particles in electrolyte solution, *J. Phys. Chem.*, **68**, 2407-2413, doi: 10.1021/j100791a004.

Schwan, H.P., (1968) Electrode polarization impedance and measurements in biological materials, *Ann. New York Acad. Sci.*, **148**, 191-209.

Schwan, H.P., Schwarz, G., Maczuk, J., & Pauly, H., (1962) On the low-frequency dielectric dispersion of colloidal particles in electrolyte solution, *J. Phys. Chem.*, **66**, 2626-2635.

Schwarz, G., (1962) A theory of the low-frequency dielectric dispersion of colloidal particles in electrolyte solution, *J. Phys. Chem.*, **66**, 2636-2642, doi: 10.1021/j100818a067.

Scott, J.B.T., (2006) The origin of the observed low-frequency electrical polarization in sandstones, *Geophysics*, **71**, G235-G238.

Scott, J.B.T., & Barker, R.D., (2003) Determining pore-throat size in Permian-Triassic sandstones from low-frequency electrical spectroscopy, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, paper 1450, doi: 10.1029/2003GL016951.

Seigel, H.O., Nabighian, M., Parasnis, D.F., & Vozoff, K., (2007) The early history of the induced polarization method, *The Leading Edge*, **26**, 312-321.

Seigel, H.O., Vanhala, H., & Sheard, S.N., (1997) Some case histories of source discrimination using time-domain spectral IP, *Geophysics*, **62**, 1394-1408.

Seigel, H.O., (1959) Mathematical formulation and type curves for induced polarization, *Geophysics*, **24**, 547-565.

Sen, P.N., (1981) Relation of certain geometrical features to the dielectric anomaly of rocks, *Geophysics*, **46**, 1714-1720.

Sen, P.N., Scala, C., & Cohen, M.H., (1981) A self-similar model for sedimentary rocks with application to the dielectric constant of fused glass beads, *Geophysics*, **46**, 781-795.

Sheider, W., (1975) Theory of the frequency dispersion of electrode polarization, *J. Phys. Chem.*, **79**, 127-136.

Sheinman, S.M., (1969) Contemporary physical foundations of the electrical prospecting theory, Nedra.

Shuey, R. T., & Johnson, M., (1973) On the phenomenology of electrical relaxation in rocks, *Geophysics*, **38**, 37-48.

Silvester, P.P., & Ferrari, R.L., (1990) Finite elements for electrical engineers (2nd ed.), Cambridge University Press.

Slater, L.D., (2007) Near surface electrical characterization of hydraulic conductivity: From petrophysical properties to aquifer geometries - a review, *Surveys in Geophysics*, **28**, 169-197.

Slater, L., Ntarlagiannis, D., & Wishart, D., (2006) On the relationship between induced polarization and surface area in metal-sand and clay-sand mixtures, *Geophysics*, **71**, A1-A5.

Slater, L., & Lesmes, D.P., (2002) IP Interpretation in environmental investigations, *Geophysics*, **67**, 77-88.

Song, L., (1984) A new IP de-coupling scheme, *Expl. Geophys.*, **15**, 99-112.

Souffaché, B., Cosenza, P., Flageul, S., Pencolé, J.-P., Seladji, S. & Tabbagh, A., (2010) Electrostatic multipole for electrical resistivity measurements at decimetric scale, *J. Appl. Geophys.*, **71**, 6-12.

Springer, M.M., Korteweg, A., & Lyklema, J., (1983) The relaxation of the double layer around colloid particles and the low-frequency dielectric dispersion: Part II. Experiments, *J. Electroanal. Chem.*, **153**, 55-66.

Sturrock, J.T., Lesmes, D.P., & Morgan, F. D., (1999) Permeability estimation using spectral induced polarization measurements: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Environmental and Engineering Geophysical Society, Proceedings, 409-416.

Su, K., Hoteit, N., & Ozanam, O., (2004) Desiccation and rehumidification effects on the thermohydrromechanical behaviour of the Callovo-Oxfordian argillaceous rock, *Geo-Engineering Book Series*, Elsevier, 419-424.

Sumner, J.S., (1976) Principles of induced polarization for geophysical exploration, Elsevier Science Publ. Co., Inc.

Sumi, F., (1959) Prospecting for non-metallic minerals by induced polarization, *Geophys. Prospect.*, **13**, 603-616.

Sunde, E.D., (1968) Earth Conduction Effects in Transmission Systems, Dover, New York, 370 p.

Suzuki, K., Nakata, E., Minami, M., Hibino, E., Tani, T., Sakakibara, J., & Yamada, N., (2004) Estimation of the zone of excavation disturbance around tunnels, using resistivity and acoustic tomography, *Exploration Geophysics*, **35**, 62-69.

T

Tabbagh, A., & Cosenza, P., Ghorbani, A., Guérin, R., & Florsch, N., (2009) Modelling of Maxwell-Wagner induced polarisation amplitude for clayey materials, *J. Appl. Geophys.*, **67**, 109-113.

Tabbagh, A., & Cosenza, P., (2007) Effect of microstructure on the electrical conductivity of clay-rich systems, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **32**, 154-160, doi:10.1016/j.pce.2006.05.045.

Tabbagh, A., Benderitter, Y., Michot, D., & Panissod, C., (2002) Measurement of variations in soil electrical resistivity for assessing the volume affected by plant water uptake, *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **7**, 229-237.

Tabbagh, A., Hess, A. & Grard, R., (1993) Determination of electrical properties of the ground shallow depth with an electrostatic quadripole: field trials on archaeological sites, *Geophy. Prospect.*, **41**, 579-597.

Taylor, R.K., (1988) Coal measures mudrocks: composition, classification and weathering processes, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, **21**, 85-99.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., & Keys, D.A., (1990) Applied geophysics, Cambridge University Press.

Titov, K., Kemna, A., Tarasov, A., & Vereecken, H., (2004) Induced Polarization of unsaturated sands determined through time domain measurements, *Vadose Zone Journal*, **3**, 1160-1168.

Titov, K., Komarov, V., Tarasov, V., & Levitski, A., (2002) Theoretical and experimental study of time-domain induced polarization in water-saturated sands, *J. Appl. Geophys.*, **50**, 417-433.

Tong, M., Li, L., Wang, W., & Jiang, Y., (2006a) Determining capillary pressure curve, pore size distribution and permeability from induced polarization of shaly sand, *Geophysics*, **71**, N33–N40.

Tong, M., Li, L., Wang, W., & Jiang, Y., (2006b) A time-domain induced polarization method for estimating permeability in a shaly sand reservoir, *Geophys. Prospect.*, **54**, 623-631.

Topp, G.C., Davis, J.L., & Annan, A.P., (1980) Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.*, **16**, 574-582.

Tripp, A.C., Klein, J.D., Halverson, M.O., Kingman, J. & Grant, T.W., (1990) Induced-polarization spectral interpretation including electromagnetic coupling data - a field example, in Fink, J.B., Sternberg, B.K., McAlister, E.O., Wieduwilt, W.G., and Ward, S.H., Eds., *Induced Polarization - Applications and Case Histories: Society of Exploration Geophysicists*, 179-198.

Tsang, C.-F., Blümling, P., & Bernier, F., (2008) Coupled hydro-mechanical processes in crystalline rock and in indurated and plastic clays: A comparative discussion <http://www.escholarship.org/uc/item/7wz2d8dx>.

Tsang, C.-F., Bernier, F., & Davies, C., (2005) Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays - In the context of radioactive waste disposal, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **42**, 109-125.

U

Ulrich, C., & Slater, L., (2004) Induced polarization measurements on unsaturated sands, *Geophysics*, **69**, 762–771.

V

Valès, F., Nguyen Minh, D., Gharbi, H., & Rejeb, A., (2004) Experimental study of the influence of the degree of saturation on physical and mechanical properties in Tournemire shale (France), *App Clay Sci.*, **26**, 197-207.

Vanhala, H., (1997a) Mapping oil-contaminated sand and till with the spectral induced polarization SIP method, *Geophys. Prospect.*, **45**, 303-326.

Vanhala, H., (1997b) Laboratory and field studies of environmental and exploration applications of the spectral induced polarization SIP method, *Ph.D. thesis*, Helsinki University of Technology.

Vanhala, H., & Soininen, H., (1995) Laboratory technique for measurement of spectral induced polarization response of soil samples, *Geophys. Prospect.*, **43**, 655-676.

Vanhala, H., Soininen, H., & Kukkonen, I., (1992) Detecting organic chemical contaminants by spectral-induced polarization method in glacial till environment, *Geophysics*, **57**, 1014-1017.

Van Voorhis, G.D., Nelson, P.H., & Drake, T.L. (1973) Complex resistivity spectra of porphyry copper mineralization, *Geophysics*, **38**, 49-60.

Vaquier, V., Holmes, C.R., Kintzinger, P.R., & Lavergne, M., (1957) Prospecting for ground water by induced polarization, *Geophysics*, **22**, 660-687.

Velde, B., (1995) Origin and mineralogy of clays, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Vereecken, H., Binley, A., Cassini, G., Revil, A., & Titov, K., (2006) Applied hydrogeophysics, NATO Sci. Ser. 71. Springer Verlag, Berlin.

Vinegar, H.J., & Waxman, M.H., (1984) Induced polarization of shaly sands. The effect of clay counterion type, paper presented at SPWLA, Soc. of Prof. Well Log Anal.

W

Wagner, K.W., (1924) Erklärung der Dielectrischen Nachwirkungsvorgänge auf grund Maxwellscher vorstellungen, *Archiv Electrotechnik*, **2**, 371-387.

Wakim, J., (2005) Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses, *Thèse de doctorat*, l'Ecole des Mines de Paris, 163 p.

Wait, J.R., (1959) The variable-frequency method, in Wait, J.R., Ed., *Overvoltage research and geophysical applications*, Pergamon Press, Inc., 29-49.

Ward, S.H., Sternberg, B.K., Labrecque, D.J., & Poulton, M.M., (1995) Recommendations for IP research, *The Leading Edge*, **14**, 243-247.

Washburne, J., (1982) Parameterization of spectral induced polarization data. Laboratory and In Situ Spectral Induced Polarization Measurements West Shasta Copper-Zinc District Shasta CA, *M. Sc. Thesis unpub.*, Colorado School of Mines.

Waxman, M. H. & Smits, L. J. M., (1968) Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands, *Society of Petroleum Engineers Journal*, **243**, 107-122.

Weller, A., Slater, L., Nordsiek, S., & Ntarlagiannis, D., (2010) On the estimation of specific surface per unit pore volume from induced polarization: A robust empirical relation fits multiple data sets, *Geophysics*, **75**, P.WA105-WA112.

Weller, A., Seichter, M., & Kampke, A., (1996) Induced-polarization modelling using complex electrical conductivities, *Geophys. J. Int.*, **127**, 387-398.

Wieczorek, K., (2004) Application of geoelectric tomography for monitoring moisture content and tracer distribution in geotechnical barriers and host rocks. - DisTec 2004 International Conference on Radioactive Waste Disposal, April 26-28, Berlin, Germany.

Wong, J., & Strangway, W.D., (1981) Induced polarization in disseminated sulfide ores containing elongated mineralization, *Geophysics*, **46**, 1258-1268.

Wong, J., (1979) An electrochemical model of the induced-polarization phenomenon in disseminated sulfide ores, *Geophysics*, **44**, 1245-1265.

Worthington, P.F., & Collar, F.A., (1984) Relevance of induced polarization to quantitative formation evaluation, *Marine and Petroleum Geology*, **1**, 14-26.

Wynn, J.C. & Zonge, K.L., (1975) EM coupling - its intrinsic value, its removal, and the cultural coupling problem, *Geophysics*, **40**, 831-850.

X

Xiang, J., Jones, N.B., Cheng, D., & Schlindwein, F.S., (2001) Direct inversion of the apparent complex-resistivity spectrum, *Geophysics*, **66**, 1399-1404.

Y

Yuval & Oldenburg, D.W., (1997) Computation of Cole-Cole parameters from IP data, *Geophysics*, **62**, 436-448, doi: 10.1190/1.1444154.

Z

Zhdanov, M., (2008) Generalized effective-medium theory of induced polarization, *Geophysics*, **73**, F197-F211.

Zhdanov, M.S., & Keller, G.V., (1994) The geoelectrical methods in geophysical in geophysical exploration, Amsterdam: Elsevier, 873 p.

Zisser, N., Kemna, A., & Nover, G., (2010) Dependence of Spectral Induced Polarization response of sandstone on temperature and its relevance to permeability estimation, *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2010JB007526

Zonge, K., & Wynn, J.C., (1975) Recent advances and applications in complex resistivity measurements, *Geophysics*, **40**, 851-864.

Annexe A1 : Propriétés microstructurales et surfaciques des argiles

Sous la forme d'un petit lexique, nous voudrions présenter brièvement ici les propriétés microstructurales et surfaciques des argiles

Les différentes échelles structurales des argiles : Plus la surface d'un matériau est importante vis-à-vis du volume poral, plus les propriétés associées à la surface des grains dominent les propriétés physiques à l'échelle macroscopique. Les argiles sont des géomatériaux présentant des surfaces importantes d'où l'intérêt de connaître ses propriétés surfaciques et microstructurales pour mieux comprendre ses comportements macroscopiques. La **Figure I.A1** représente les différentes échelles de l'organisation microstructurale des argiles.

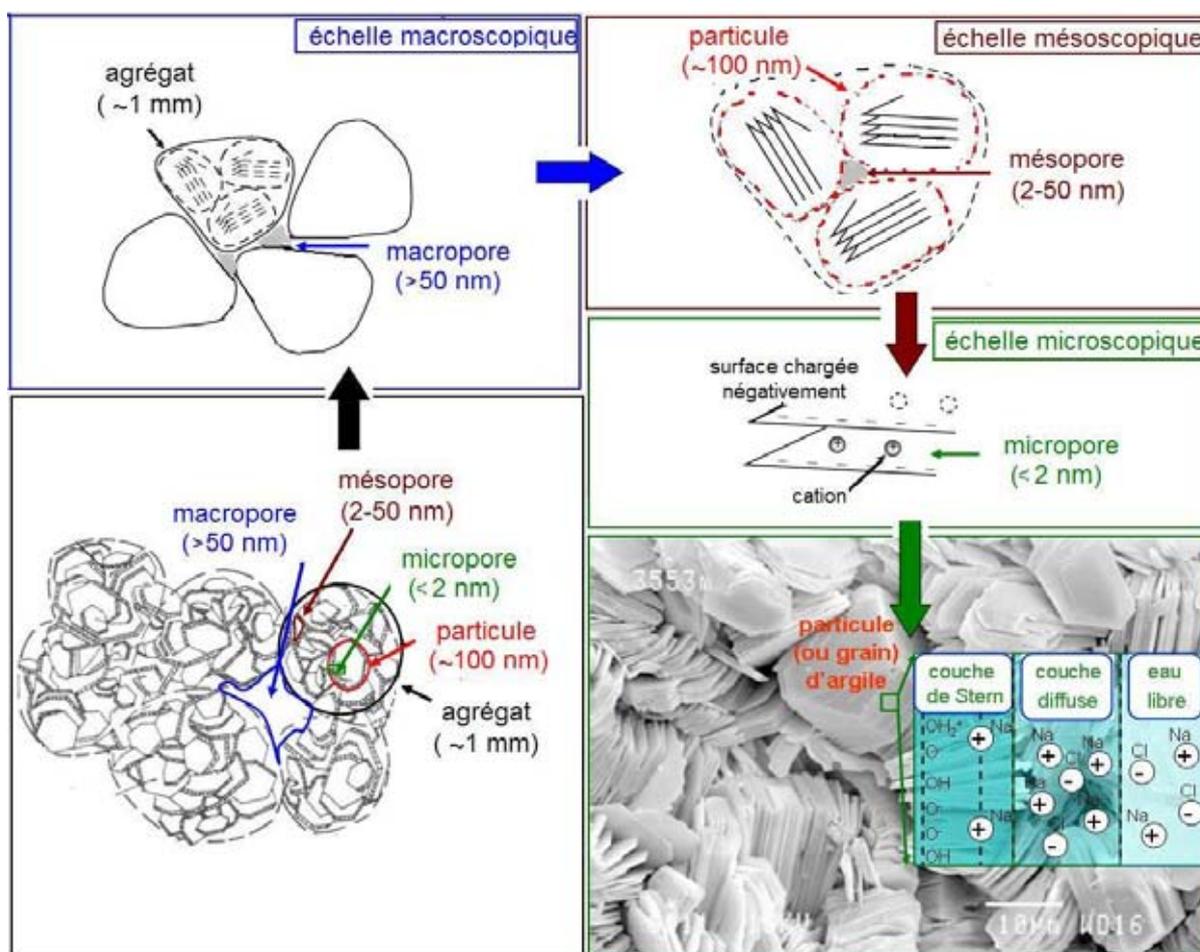


Figure A1.1. Echelle macro-méso-microscopique des argiles et l'image MEB d'une argile de type kaolinite (photo de N. Liewig & P. Karcher) (références utilisées pour les dessins : Makki, 2009 ; Comparon, 2005 ; Julien et al., 2005). D'un point de vue pétrophysique, les différents niveaux d'organisation spatiale de la structure argileuse interviennent via une multi porosité à l'échelle macroscopique, mesoscopique ou microscopique.

Suivant l'échelle considérée, on peut distinguer trois niveaux d'organisation de la phase argileuse :

- le *feuille*t dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques Å. (10^{-10} m).
- la *particule* qui est un assemblage de feuillets.
- l'*agrégat* qui est une association de particules élémentaires dont la longueur peut atteindre $2\ \mu\text{m}$ suivant la nature minéralogique de l'argile considérée.

Minéralogie : Les minéraux argileux sont très nombreux. Schématiquement, les minéraux argileux peuvent être classés suivant cinq grandes familles : **(a)** la *Kaolinite*, **(b)** l'*illite*, **(c)** le *smectite*, **(d)** la *chlorite* et **(f)** les *interstratifiés* (empilements de feuillets ou de particules appartenant à des familles différentes). Nous nous focalisons ici sur la structure des deux minéraux argileux très courants : la kaolinite et la montmorillonite (une smectite) qui ont été étudié au chapitre 3.

- **Kaolinite** : Une particule de *kaolinite* est constituée d'une série de feuillets élémentaires dits (TO) (argile dite 1:1) : le feuillet élémentaire est fait de tétraèdres (T) à cœur d'atomes de silice Si et associée à une couche d'octaèdres (O) à cœur d'atomes d'aluminium Al (**Figure I.A2**). Un point important ici à souligner est que certains sommets des couches octaédriques et tétraédriques ne présentent pas de liaisons et forment ainsi des groupes hydroxyles (de type aluminol $>\text{Al-OH}$ et silanol $>\text{Si-OH}$, le symbole $>$ désigne le réseau cristallin). Ces groupes hydroxyles vont être à l'origine d'un déficit de charges électriques sensible à la variation du PH de l'eau porale.
- **Smectite** : Quant à la particule de *smectite*, celle-ci est une succession de couches dioctaédriques (TOT) (argile dite 2 :1 voir **Figure I.A2**) entre lesquelles peuvent s'introduire des molécules d'eau. Au sein de la couche octaédrique, se produisent des substitutions isomorphiques : les ions Al^{3+} sont remplacés par Fe^{2+} et/ou Mg^{2+} . C'est cette substitution qui va provoquer alors également un déficit de charges électriques cette fois-ci permanent.

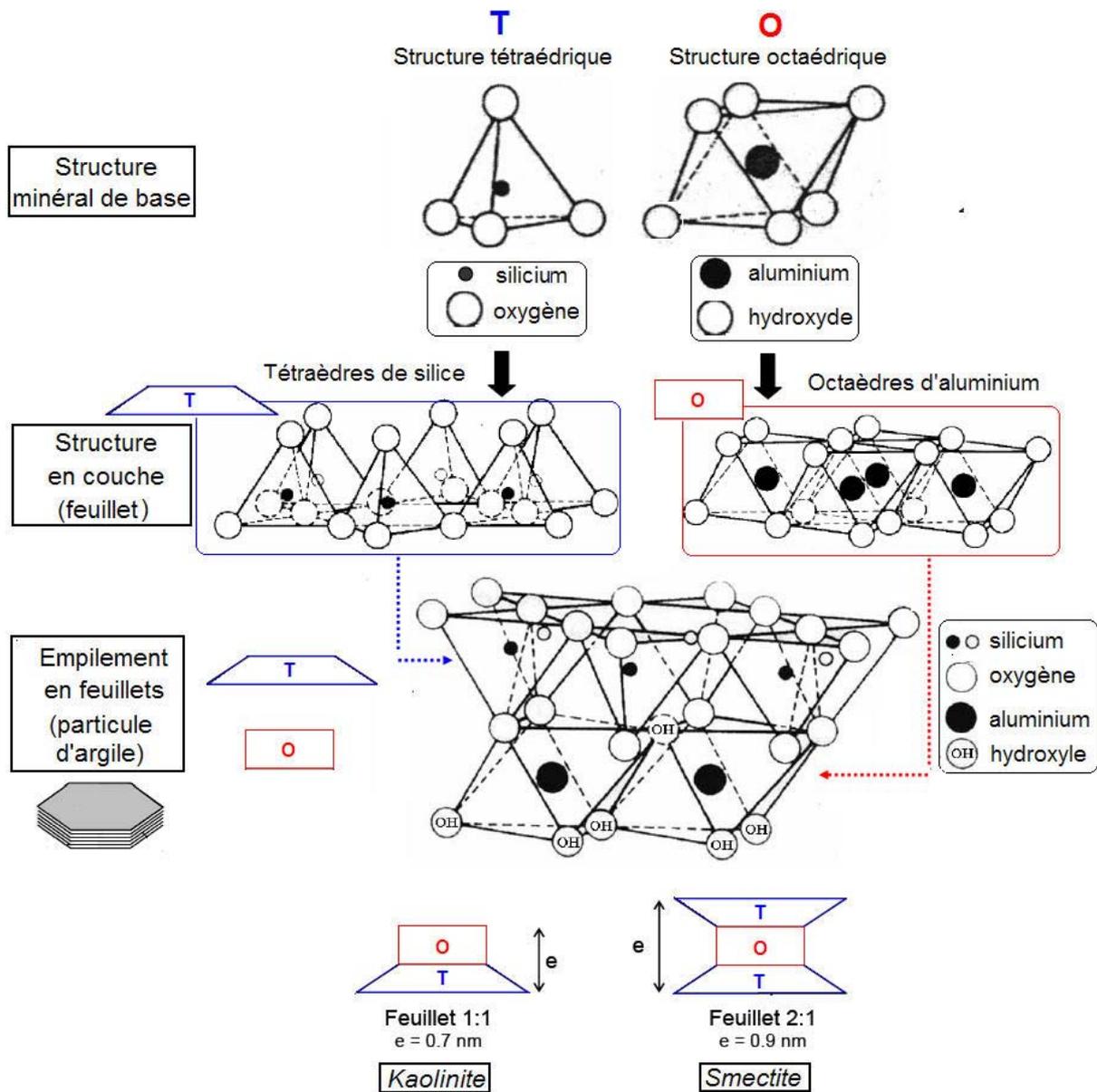


Figure A1.2 Structures des minéraux argileux : structure minéral de base formée par une unité tétraédrique et/ou octaédrique. L'ensemble de ces unités forme la structure en couche (feuillelet). L'empilement des couches (feuillet) constitue ainsi la particule d'argile. On note la représentation symbolique des deux familles de minéraux argileux la Kaolinite (1:1) et la Smectite (2:1). Il existe divers empilements possibles constituant les autres familles de minéraux argileux (dessin utilisées par Coll, 2005 ; Gaombalet, 2004).

Rôle de l'eau sur les argiles : Les constituants minéraux argileux développent une surface spécifique très grande et interagissent très fortement avec l'eau. Consécutivement à l'existence des déficits de charges à la surface des feuillet des minéraux argileux, l'électroneutralité locale à l'échelle du feuillet impose que ce déficit soit compensé par l'adsorption de cations hydratés (les cations compensateurs : K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} le plus souvent) (voir **Figure I.A1** à l'échelle microscopique). L'eau adsorbée sur les surfaces de l'argile donne lieu en particulier à la formation d'une double couche électrique (**voir chapitre 1**), et

qui confère à l'eau au voisinage de ces surfaces des propriétés physico-chimiques particulières (Comparon, 2005).

Chez certaines argiles, l'eau ne peut s'engager entre les feuillets. Ces argiles sont faiblement gonflantes (i.e. kaolinite ou illite). A l'inverse, lorsqu'il s'agit des smectites la faible liaison entre feuillets fait que chaque espace interfoliaire peut s'hydrater ; les smectites font partie des argiles dites « gonflantes ». L'intervention de l'eau écarte les feuillets : le volume du matériau augmente et il en résulte une réorganisation complète de la matrice solide (Tessier, 1978). Ce processus s'appelle *le gonflement*. Notons enfin que le gonflement d'une roche argileuse dépendra non seulement de la minéralogie des constituants argileux, mais aussi de la texture (Bauer-Plaindoux *et al.*, 1998). *Le retrait* est le phénomène inverse du gonflement. Les mécanismes microscopiques expliquant le phénomène de gonflement-retrait, observé pour certaines argiles, sont d'origine physico-chimique.

Capacité d'échanges cationiques des argiles (CEC) Un paramètre chimique important d'un minéral argileux est alors la capacité d'échange cationique (CEC). La mesure de la CEC présente la somme des déficits de charge négative superficielle devant être compensés pour obtenir l'électroneutralité de particules solides constituant le milieu à un moment donné ou autrement dit le nombre de cation échangeable par unité de masse sèche du solide (Velde, 1995). Il est exprimé en milli-équivalent pour 100 g (meq/100 g) d'argile sèche (où 1 meq/g=96,320 C/kg). La CEC varie de 3 et 15 meq/100 g pour les kaolinites à 150 meq/100 g pour certaines smectites.

En conclusion, les argiles présentent souvent un excès de charge électrique au niveau de leur surface. Cet excès de charge est lié à la structure cristalline composée des ions de différentes valences ioniques et aux réactions acide-base induites entre les groupes silanol/aluminol et l'électrolyte. En présence d'eau, cet excès de charge est compensé par les cations compensateurs afin d'assurer l'électroneutralité. L'adsorption de ces cations dépend des propriétés cristallographiques du minéral argileux intégrées dans le paramètre « capacité d'échange cationique ». Notons que le rôle de l'eau sur les argiles a une importance particulière. Une resaturation ou une désaturation peut également s'accompagner de modifications microstructurales.

Références

Bauer-Plaindoux, C., Tessier, D., & Ghoreychi, M., (1998) Propriétés mécaniques des roches argileuses carbonatées : importance de la relation calcite-argile, C.R. Acad. Sci. Paris, série Ila, 326.

Coll, C., (2005) Endommagement des roches argileuses et perméabilité induite au voisinage d'ouvrages souterrain, Thèse de doctorat, l'Université de Joseph-Fourier (Grenoble I), 265 p.

Comparon, L., (2005) Étude expérimentale des propriétés électriques et diélectriques des matériaux argileux consolidés, Thèse de doctorat, l'Institut de Physique du Globe de Paris, 398 p.

Gaombalet, J., (2004) Le gonflement des argiles et ses effets sur les ouvrages souterrains de stockage, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, spécialité mécanique, 326 p.

Jullien, M., Raynal, J., Kohler, E., & Bildstein, O., (2005) Physicochemical Reactivity in Clay-Rich Materials: Tools for Safety Assessment, Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, 60 (1), 107-120, doi: 10.2516/ogst:2005007.

Makki, L., (2009) Comportement de retrait-gonflement des sols en période de sécheresse, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 268 p.

Tessier, D., (1978) Etude de l'organisation des argiles calciques. Evolution au cours de la dessiccation, Annales Agronomiques, 29(4), 319-355.

Velde, B., (ed) (1995) Origin and mineralogy of clays, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Annexe A2 : Mosaïque au radier des galeries Est-96 et Nord-08



Figure A2.1. Mosaïque du radier de la galerie Est-96 entre les cotes 11-22 m. L'incrémentation des numéros de cote indique la direction vers le fond de la galerie dont à l'Est. Les points en couleur rose désignent les positions des électrodes dont le profil transversal en arc (21,10 m) et le profil longitudinal au radier. La première électrode du profil longitudinal au radier intercepte avec une électrode sur le profil transversale en arc. L'espacement entre les électrodes est 20 cm sur les deux profils. Les lignes en bleu et en rouge représentent respectivement les positions des fractures néoformées d'origines mécaniques et les fractures tectoniques.

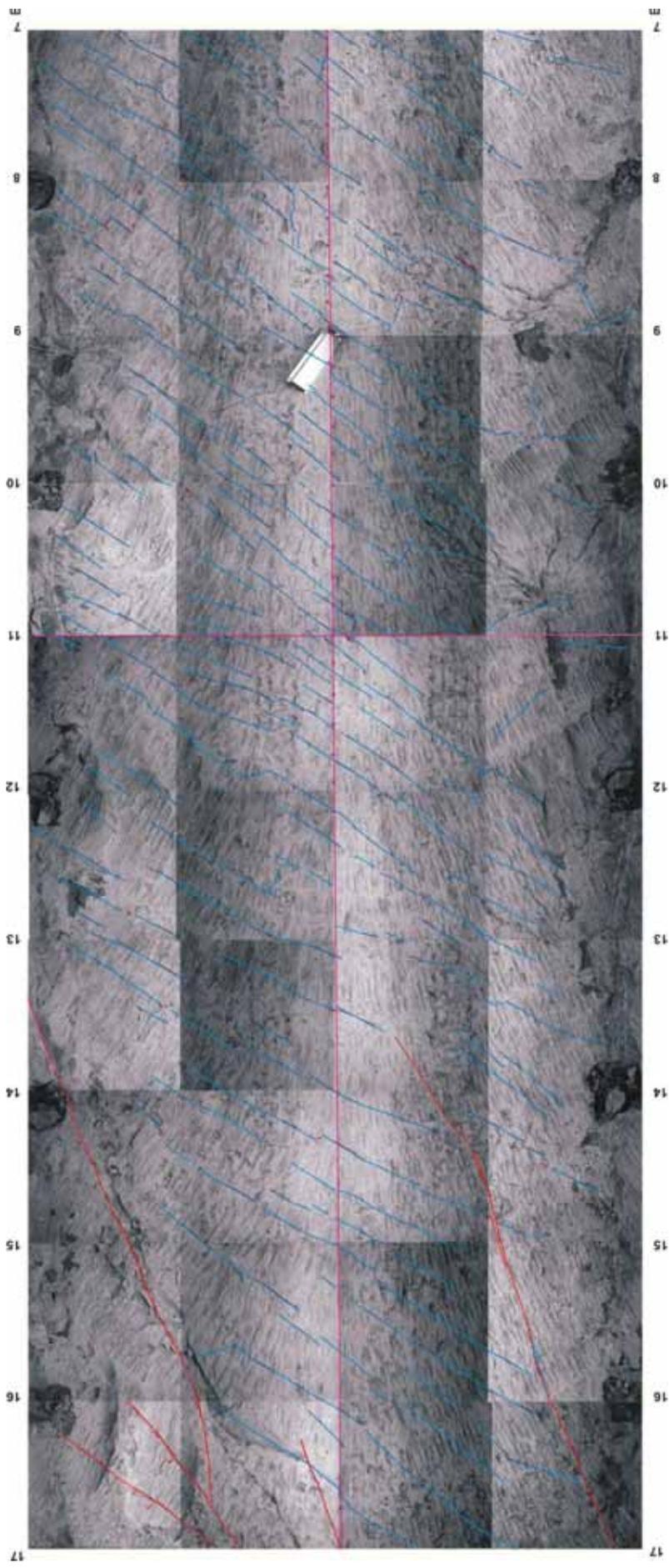


Figure A2.2. Mosaïque du radier de la galerie Nord-08 entre les cotes 7-17 m. L'incrémentation des numéros de cote indique la direction vers le fond de la galerie dont au Nord. Les points en couleur rose désignent les positions des électrodes dont le profil transversal en arc (11 m) et les profils longitudinaux superposés au radier. La première électrode du profil longitudinal au radier se trouve au Nord (cote 18.5 m). Le profil transversal en arc intercepte le profil au radier. L'espacement entre les électrodes est 20 cm sur les deux profils. Les lignes en bleu et en rouge représentent respectivement les positions des fractures néoformées d'origines mécaniques et les fractures tectoniques. A partir de la cote 7 m jusqu' à l'entrée de la galerie (cote 0 m), le radier est bétonné.

Annexe A3 : Étude théorique du couplage électromagnétique (CR1Dmod)

L'effet du couplage électromagnétique est lié à l'interaction entre le circuit d'émission (d'injection), le circuit de réception (pour la mesure de la différence de potentiel électrique), les câblages et le sol. Il est observé usuellement dans la gamme de fréquence étudiée avec la méthode de polarisation provoquée spectrale (PPS) (de l'ordre de quelques Hz à plusieurs dizaines de kHz). Pour étudier cet effet qui masque l'effet PP qui nous intéresse, outre les mesures test expérimentales, une étude théorique a été élaborée afin de comprendre théoriquement l'effet du couplage électromagnétique possible *in-situ* à partir d'une modélisation directe en 1D. Cette étude théorique a été réalisée à l'aide du logiciel de modélisation CR1Dmod 1.6 (Ingeman-Nielson & Baumgartner, 2006). Le logiciel consiste à modéliser les données de PPS (1D), à l'aide du modèle Cole-Cole (p.ex. Vanhala, 1997) en intégrant les effets électromagnétiques. Le logiciel prend en compte les différentes fréquences utilisées, les différentes configurations d'électrode et l'influence liée à la position des câbles (des deux circuits émission et réception). Deux modèles ont été créés pour cette étude. La **Figure A3.1** représente les caractéristiques des deux modèles (nombre, résistivité et épaisseur des couches). Le calcul est réalisé pour le dispositif Wenner- α d'une manière itérative en écartant l'espacement inter-électrode ($a=20$ cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm). L'étude est effectuée pour une gamme de fréquence de 10^{-1} à 10^4 Hz.

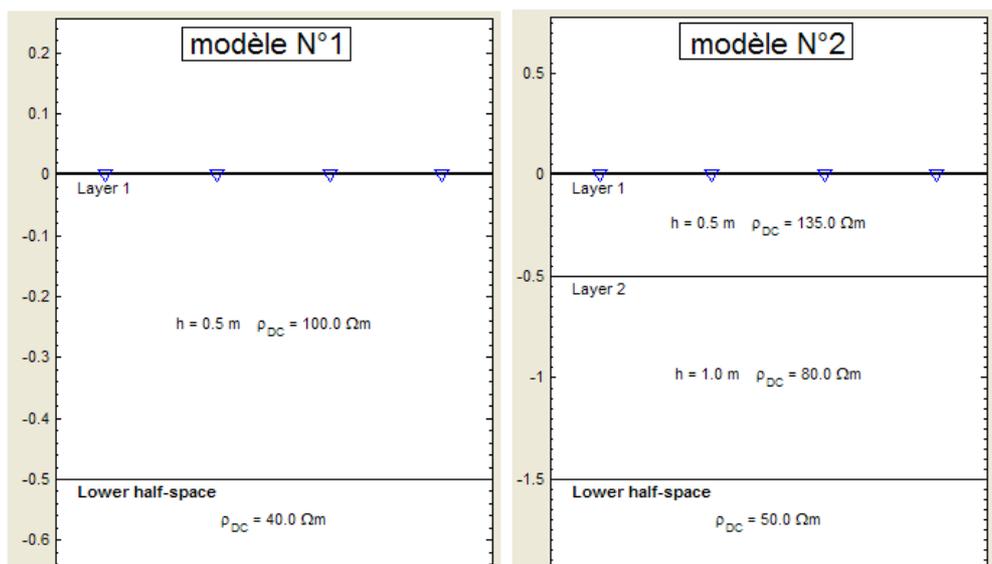


Figure A3.1. Modèles construits pour l'étude théorique du couplage électromagnétique (modèle N°1 : modèle à deux couches, modèle N°2 : modèle à trois couches).

Les premier et deuxième modèles sont composés de deux et de trois couches respectivement. La définition des résistivités et l'épaisseur de ces couches sont choisies par rapport aux modèles de résistivité inversée obtenus par la méthode PPT (**Figure II.45**).

Selon ces modèles, on observe : (1) une couche superficielle de résistivité élevées en surface (100 - 400 $\Omega \cdot m$), (2) une deuxième couche de résistivité intermédiaires (80 - 200 $\Omega \cdot m$), (3) une troisième couche de résistivité faible (15 - 60 $\Omega \cdot m$). En fonction de ces connaissances, dans le modèle 1D, la résistivité de la couche superficielle est choisie la plus faible possible afin d'estimer l'effet du couplage le plus fort possible (plus le milieu est conducteur plus le couplage est important). Le modèle N° 1 présente une couche superficielle plus conductrice qu'au modèle N° 2. Les **Figures A3.2** et **A3.3** affichent les résultats de ces études sous forme de spectres d'amplitude de la résistivité et de la phase conventionnelle.

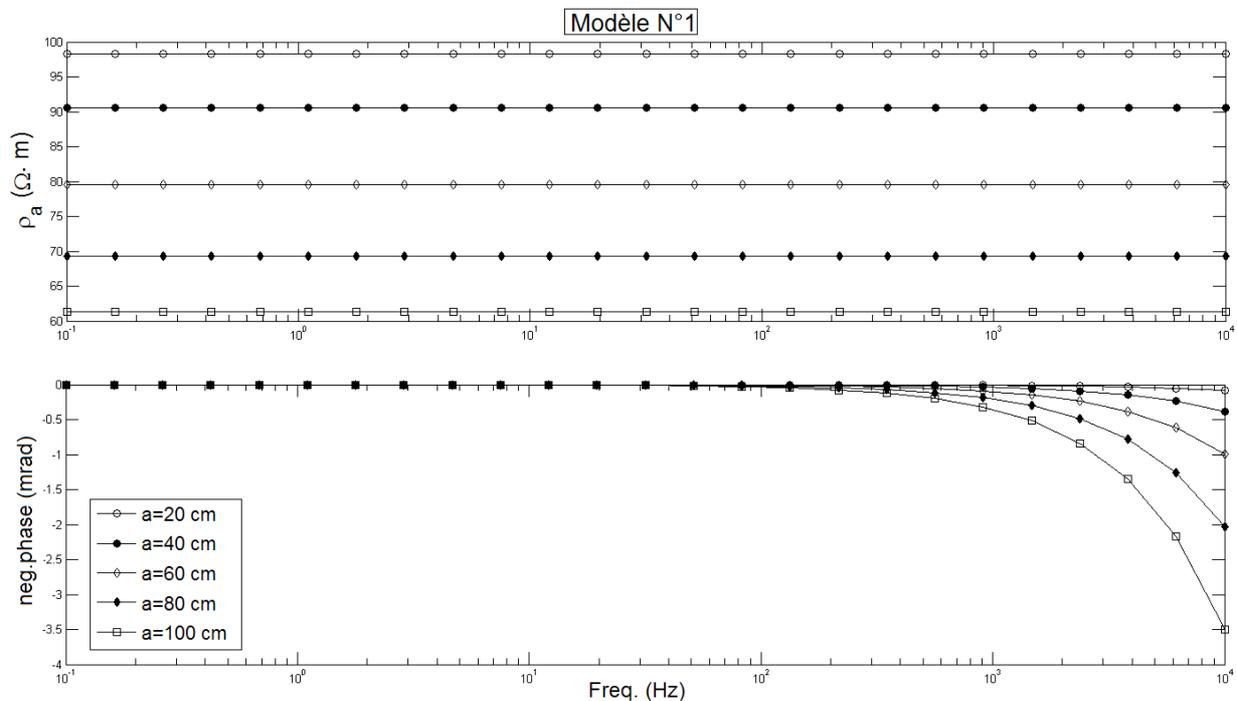


Figure A3.2. Résultats de l'étude de couplage EM du modèle N° 1 (deux couches : 100 $\Omega \cdot m$, 40 $\Omega \cdot m$).

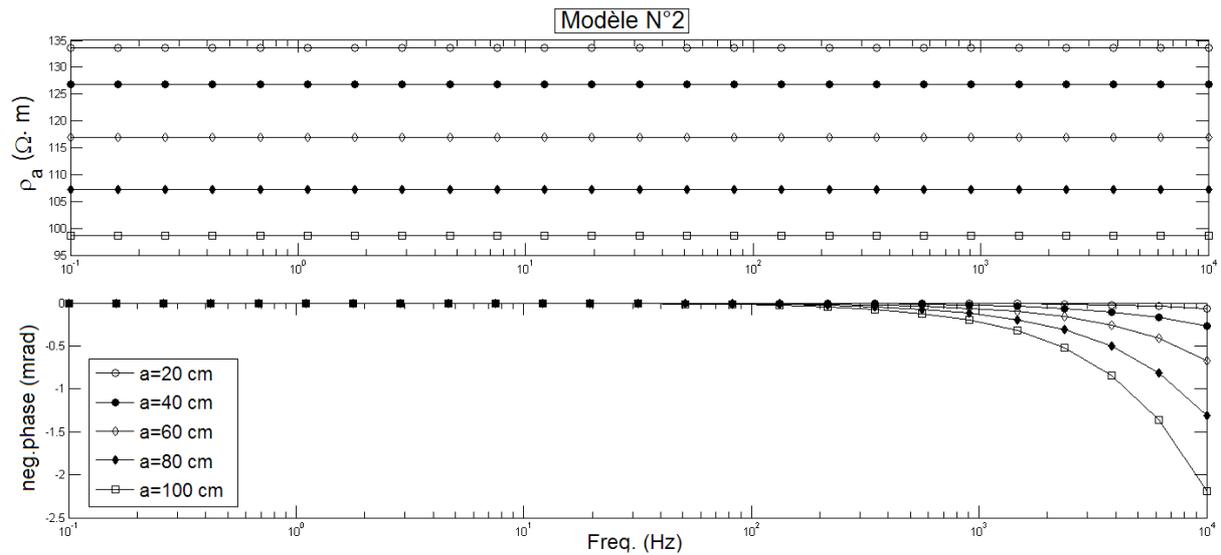


Figure A3.3. Résultats de l'étude de couplage EM du modèle N°2 (trois couches : 135 $\Omega \cdot m$, 80 $\Omega \cdot m$, 50 $\Omega \cdot m$).

Les résultats de ce travail théorique montrent que l'effet du couplage électromagnétique est maximum lorsque l'espacement entre l'électrode est maximum (i.e. pour $a=100$ cm). Les valeurs de phase sont alors de l'ordre de 2.5 - 3.5 mrad à 10^4 Hz. Jusqu'à 1 kHz, l'effet est négligeable ce que confirment les tests menés sur les résistances pures. Nous ne regarderons donc que les données correspondant aux fréquences inférieures à 1 kHz.

Annexe A4 : Calcul du coefficient géométrique sur les profils longitudinaux au radier et en arc des galeries Est-96 et Nord-08

Le calcul du coefficient géométrique a été réalisé à partir du logiciel Comsol Multiphysics (modélisation en éléments finis). Pour cela, trois modèles différents (3D) ont été construits pour représenter la géométrie de chaque galerie (galeries Est-96, Est-03, Nord-08), et les caractéristiques de chaque profil. La **Figure A4.1** représente les modèles de chaque galerie avec les profils longitudinaux au radier, tandis que l'illustration des modèles avec les profils en arc peut être trouvée en **Figure A4.2**. Dans les deux cas (**Figures A4.1** et **A4.2**), les galeries et les profils sont placés dans un parallélépipède de longueur 150 m et de section carrée de 40 m de côté. Ce bloc permet de définir des conditions aux limites au bord des galeries. L'intérêt de définir un bloc suffisamment grand (5 à 10 fois plus grand que la galerie elle-même) est de respecter la condition aux limites que le potentiel devient nul lorsque la distance depuis l'électrode d'injection tend vers l'infini ($V_{\infty} \rightarrow 0$). Sur les **Figures A4.1** et **A4.2**, les points en noir placés sur le radier et en arc désignent les électrodes. La géométrie des modèles dédiés au calcul des coefficients géométriques des profils longitudinaux au radier ne tient pas compte de la topographie de la surface de galerie. Toutefois, les positions des électrodes sur les profils en arc suivent la topographie réelle des parois verticales. Ceci a été réalisé lors de la création de la géométrie par l'intégration des courbes de Bézier du deuxième ordre. A la suite de la reconstruction des modèles, les conditions aux limites sont définies. Nous avons supposé un milieu de résistivité (ou conductivité) constante (milieu homogène et isotrope) égale à $1 \Omega.m$ pour simplifier les calculs. Cette valeur correspond au parallélépipède créé dans les modèles. Les galeries ne sont pas représentées sous forme d'objets solides, mais sous forme de surfaces sur lesquelles la condition de Neumann doit être vérifiée (condition d'isolation électrique, i.e. frontière à flux nul, $n.J = 0$ où n désigne le vecteur normal à la surface). Nous avons imposé deux sources d'injection ponctuelles d'intensité $+1 A$ et $-1 A$. La résolution numérique du potentiel V a été réalisée à partir du module *AC/DC module* → *Conductive Media DC (emdc)* qui résout l'équation suivante :

$$-\nabla(\sigma\nabla V - J^e) = Q_j \quad \text{équation (A4.1)}$$

Où σ désigne la conductivité électrique (S/m) ($\sigma = 1/\rho$ ici $\sigma = 1 S/m$), J^e la densité du courant externe (A/m^2) et Q_j la source de courant (A/m^3).

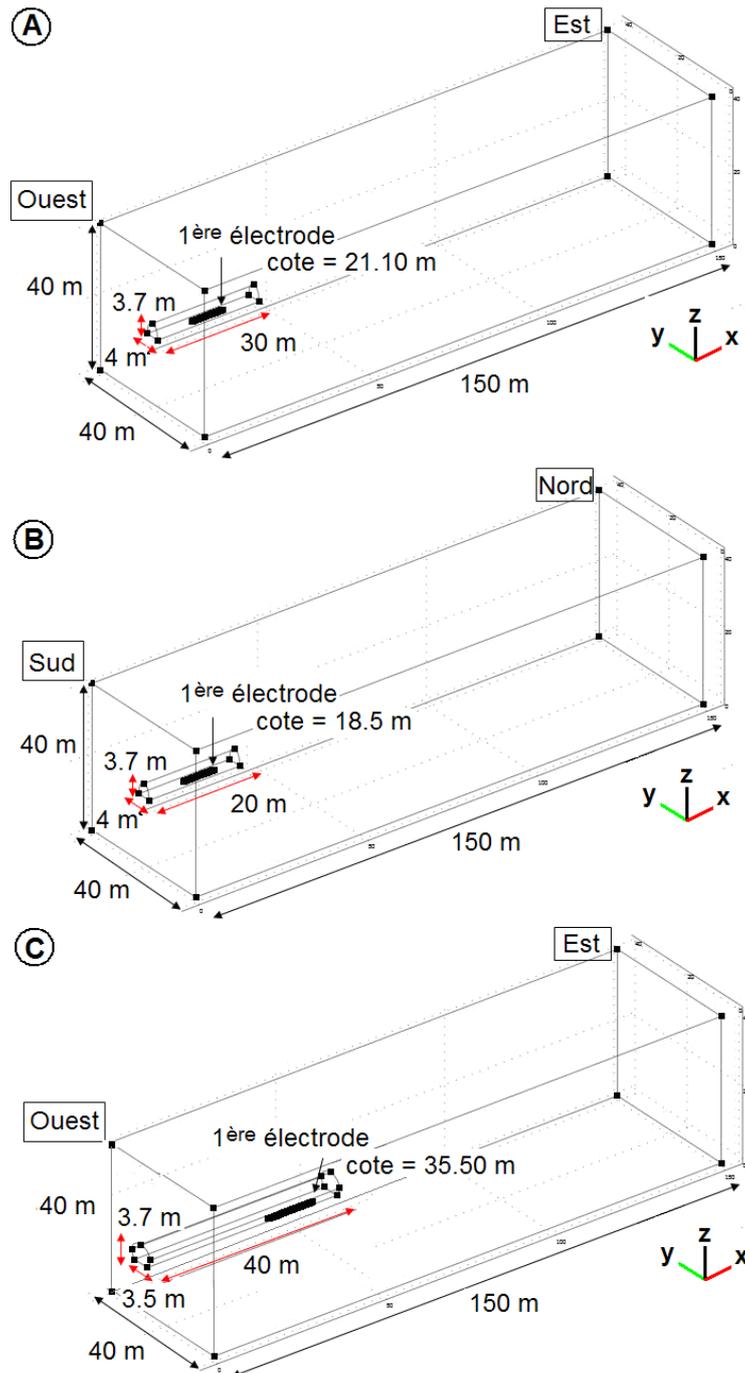


Figure A4.1 Modèles construits pour le calcul des coefficients géométriques concernant les acquisitions effectuées à partir des profils longitudinaux au radier des galeries (A) Est-96, (B) Nord-08, (C) Est-03. Le calcul est fait avec le logiciel Comsol Multiphysics suivant la séquence de mesure optée lors des mesures PPT. Les dimensions et la géométrie des galeries, le nombre d'électrode (48), l'espacement inter-électrode (20 cm) dans les modèles construits respectent la réalité. Les profils sont positionnés sur l'axe des galeries, sauf celui de la galerie Est-03 qui est décalé de 1 m vers le Sud par rapport à l'axe de la galerie. Les points en noir alignés sur le radier représentent les électrodes. Les modèles ne tiennent pas compte de la topographie de la surface de galerie.

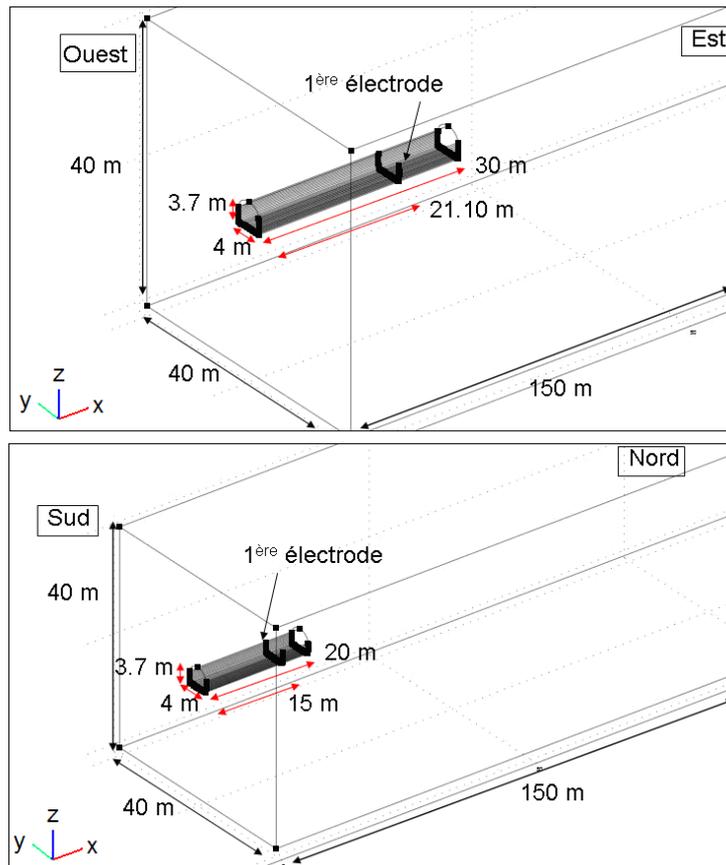


Figure A4.2 Propriétés géométriques des modèles construits avec le logiciel Comsol pour le calcul numérique du coefficient géométrique (k) sur les profils en arc dans la galerie Est-96 (en haut) et dans la galerie Nord-08 (en bas). La géométrie respecte la topographie de la surface des parois verticales où les électrodes sont posées (au total, il y a respectivement 43 et 41 électrodes sur les profils en arc dans la galerie Est-96 et dans la galerie Nord-08).

Le calcul du coefficient géométrique a été répété suivant les différentes séquences de mesure utilisées lors des acquisitions sur des profils longitudinaux au radier ainsi que sur des profils en arc. Par conséquent, à chaque calcul, en fonction de la séquence de mesure, les conditions aux limites ont été changées uniquement au niveau des dipôles d'injection et des mesures de différence de potentiel. Lors de ce calcul, un maillage triangulaire plus fin par rapport à celui proposé par défaut a été utilisé afin d'obtenir le résultat le plus précis possible. Nous avons également testé un maillage plus fin autour des électrodes, mais ce dernier n'a pas apporté une précision plus importante. Les résultats de ces études sont présentés pour les différents dispositifs électriques utilisés (Wenner- α , Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle), dans un premier temps pour les profils longitudinaux au radier dans chaque galerie (**Figures A4.3, A4.4, A4.5**), et dans un deuxième temps pour les profils en arc (**Figures A4.6, A4.7**). Sur les graphiques, en plus des coefficients géométriques calculés (k calculé), nous présentons également les coefficients géométriques dans le cas d'un demi-espace (k demi-espace) et dans celui d'un espace infini (k espace-infini) pour pouvoir identifier dans quelle condition les mesures se trouvent.

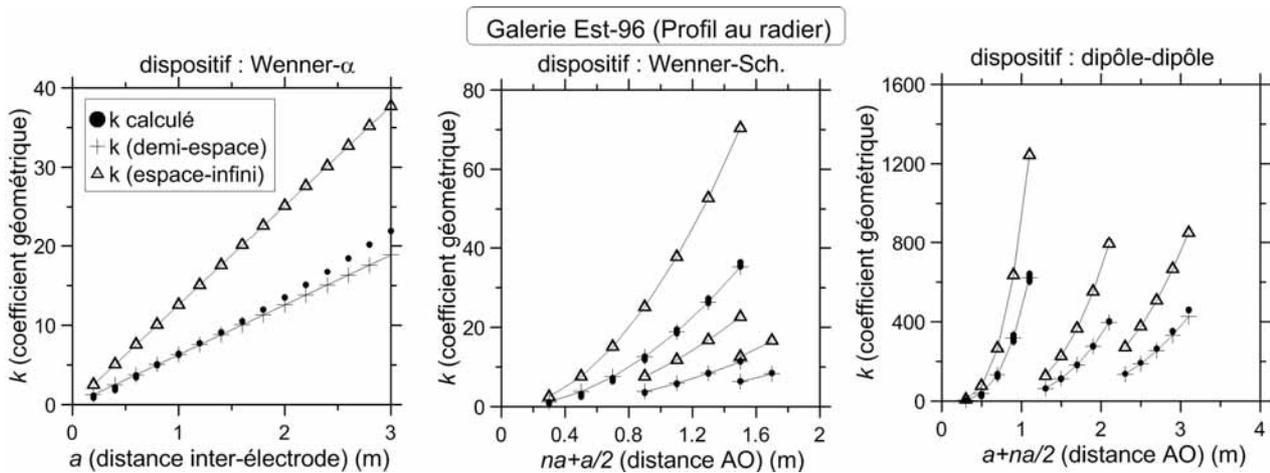


Figure A4.3 Coefficients géométriques calculés (k calculé), théoriques (demi-espace et espace-infini) en fonction des distances correspondant aux paramètres des dispositifs d'électrodes utilisés : Wenner- α , Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle pour le profil au radier dans la galerie Est-96. La distance inter-électrode a (mètre) correspond à des ordres de grandeurs suivant l'hypothèse que le milieu d'étude est une surface plane.

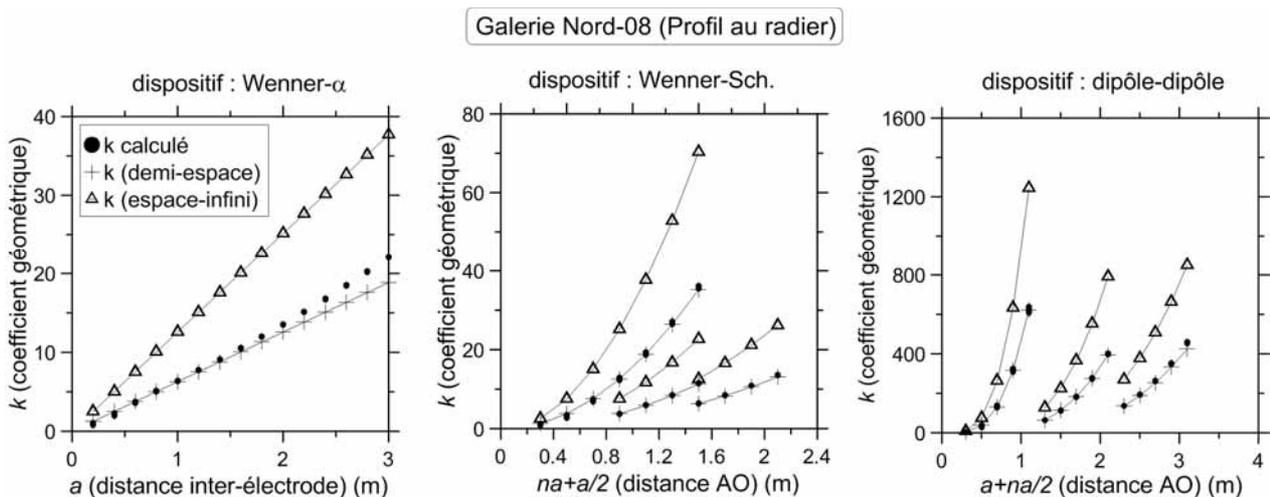


Figure A4.4 Coefficients géométriques calculés (k calculé), théoriques (demi-espace et espace-infini) en fonction des distances correspondant aux paramètres des dispositifs d'électrodes : Wenner- α , Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle pour le profil au radier dans la galerie Nord-08. La distance inter-électrode a (mètre) correspond à des ordres de grandeurs suivant l'hypothèse que le milieu d'étude est une surface plane.

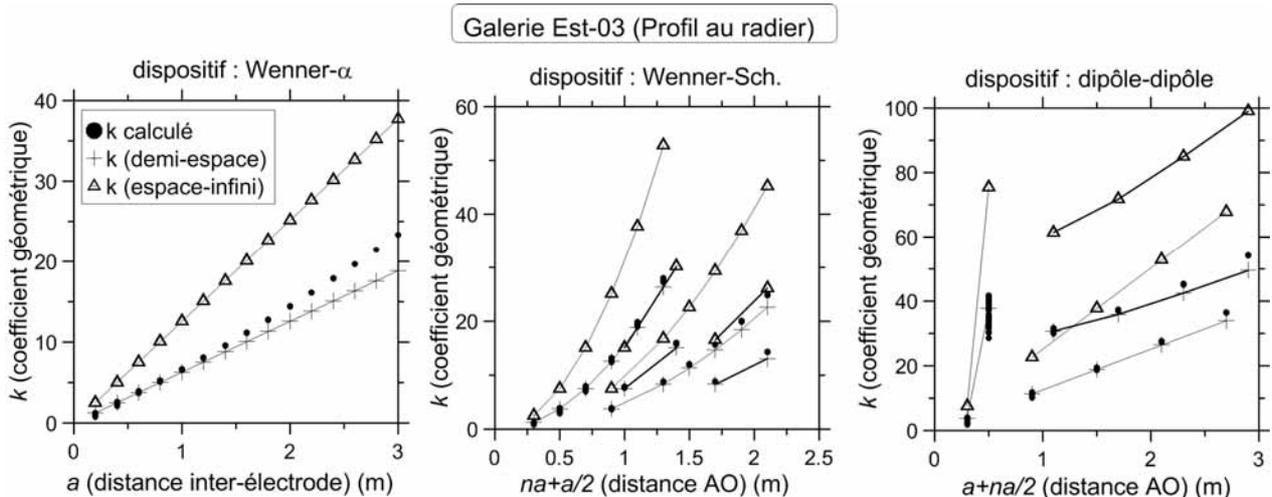


Figure A4.5 Coefficients géométriques calculés (k calculé), théoriques (demi-espace et espace-infini) en fonction des distances correspondant aux paramètres des dispositifs d'électrodes : Wenner- α , Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle pour le profil au radier dans la galerie Est-03. La distance inter-électrode a (mètre) correspond à des ordres de grandeurs suivant l'hypothèse que le milieu d'étude est une surface plane.

Le calcul effectué pour les profils longitudinaux au radier montre que les conditions de mesure se rapprochent plutôt de celles du demi-espace. Ce résultat permet de conclure que la considération d'un espace infini n'est pas nécessaire pour l'interprétation des données dans une telle configuration. Par conséquent, l'utilisation de Res2DInv, conçu pour l'inversion de données acquises dans des milieux semi-infinis, est pertinente et valable.

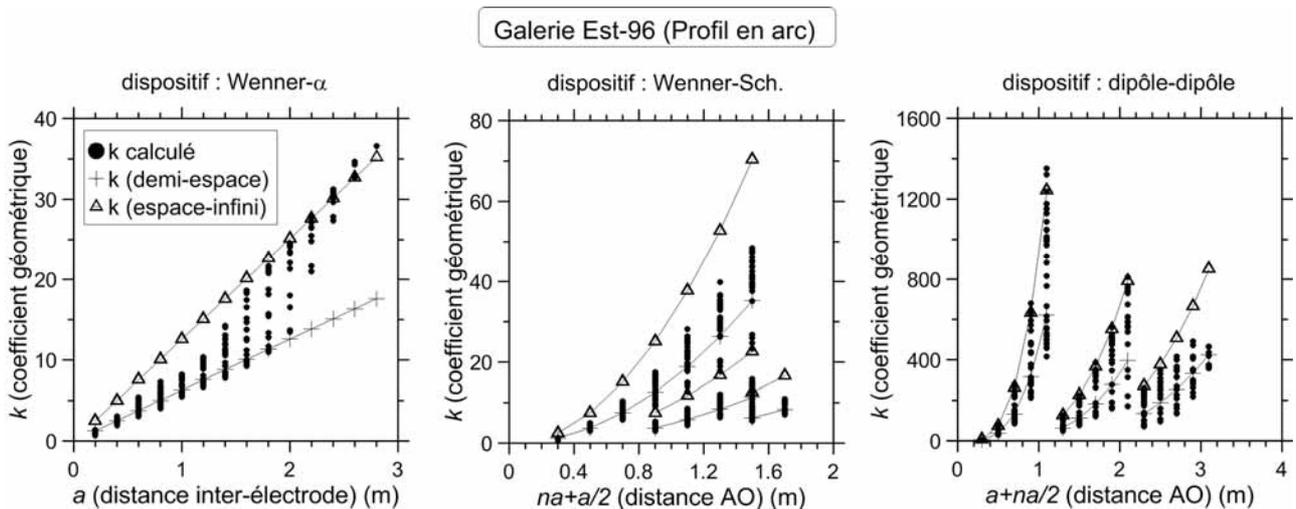


Figure A4.6 Coefficients géométriques calculés (k calculé), théoriques (demi-espace et espace-infini) en fonction des distances correspondant aux paramètres des dispositifs d'électrodes : Wenner- α , Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle pour le profil en arc de la galerie Est-96 (séquences temporelles). La distance inter-électrode a (mètre) correspond à des ordres de grandeurs suivant l'hypothèse que le milieu d'étude est une surface plane.

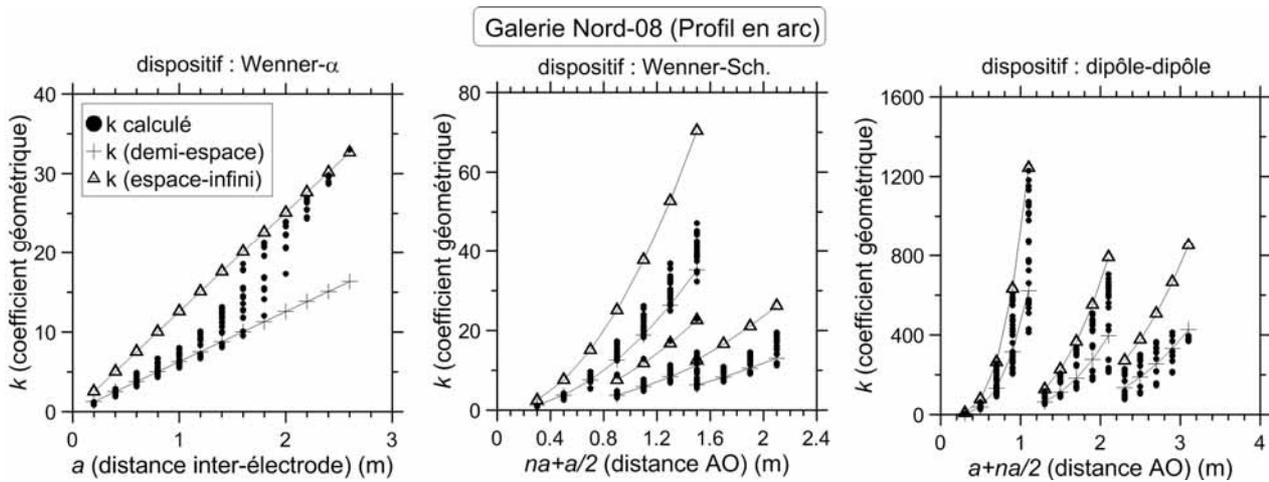


Figure A4.7 Coefficients géométriques calculés (k calculé), théoriques (demi-espace et espace-infini) en fonction des distances correspondant aux paramètres des dispositifs d'électrodes : Wenner- α , Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle pour le profil en arc de la galerie Nord-08 (séquences temporelles). La distance inter-électrode a (mètre) correspond à des ordres de grandeurs suivant l'hypothèse que le milieu d'étude est une surface plane.

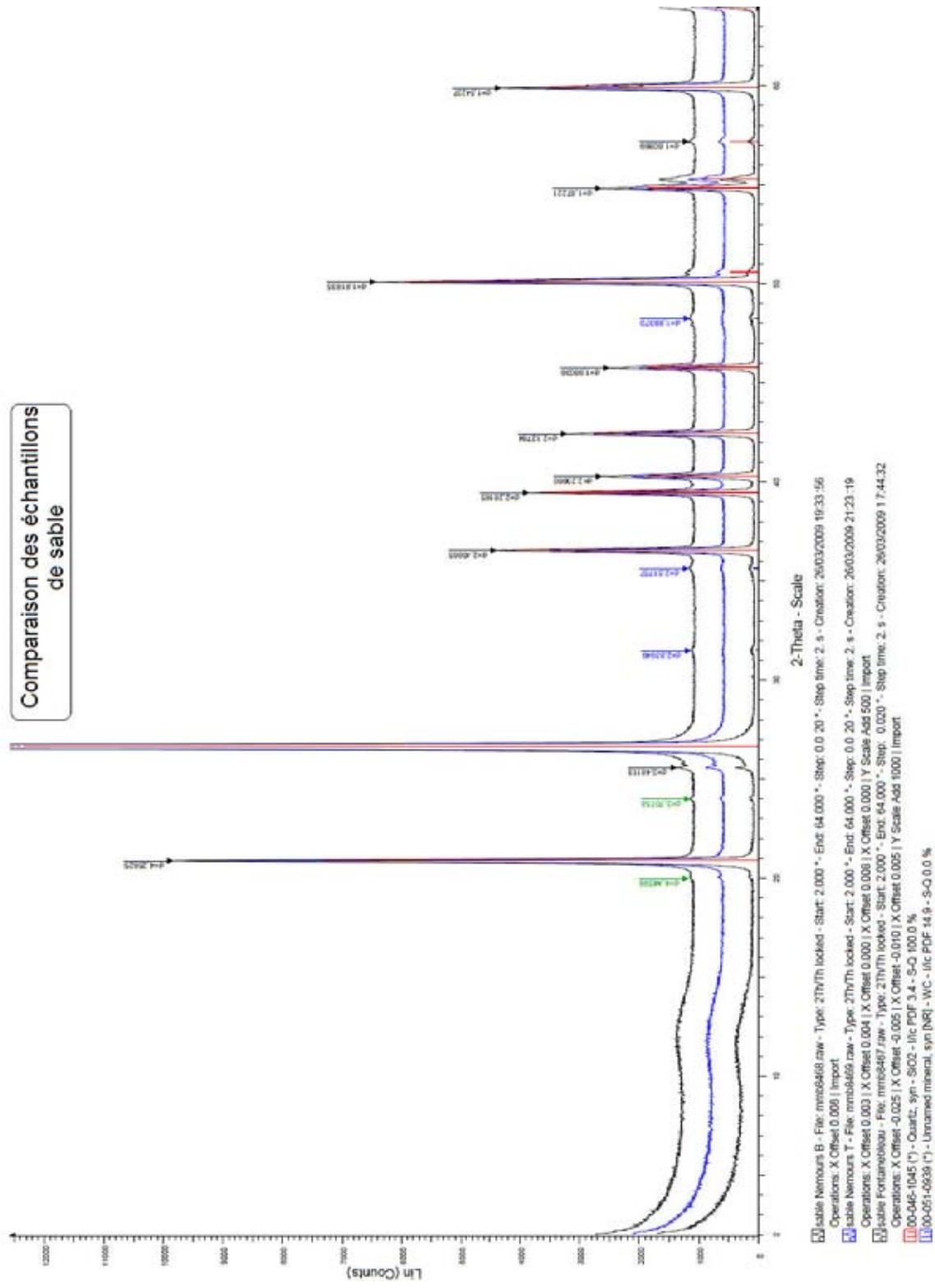
Concernant les calculs effectués pour les profils en arc, avec un espacement inter-électrode égal à 1,6 m (dispositif Wenner- α), les conditions de mesure se rapprochent de celles d'un espace infini (**Figures A4.6, A4.7**). A propos des données préparées pour l'inversion sur les différentes parties des profils en arc (parois verticales, radier), par exemple, l'espacement inter-électrode maximum est égal à environ 0,6 m au niveau des parois verticales, et à environ 1,2 m au radier (dispositif Wenner- α). Nous considérons que l'influence des conditions d'espace infini est négligeable sur les données gardées pour l'inversion. Pour certains résultats obtenus avec le dispositif dipôle-dipôle, des problèmes numériques, liés à des coefficients géométriques calculés inférieurs à ceux du demi-espace, ont été rencontrés.

Annexe A5 : Résultats des analyses de Diffraction des Rayons X

Dans cette annexe, nous présentons les résultats des analyses de diffraction des Rayons X de sept échantillons dont quatre d'argile en poudre et trois de sables à partir de la fraction argileuse et des échantillons bruts respectivement (**Figures A5.1 à A5.5**). Sur les diagrammes respectifs de chaque échantillon brut de sables, les valeurs d (Å) en noir correspondent aux pics suggérés par le logiciel EVA dans son paramétrage classique tandis que les valeurs en bleu ont été rajoutées manuellement (après zoom) pour des pics mal définis (trop larges ou en épaulement). En rose la courbe originale, en noir celle après soustraction du fond continu. Pour mieux voir les pics aux grands angles les échelles (counts) ne sont pas les mêmes entre $2-33$ et $33-64^\circ 2\theta$ (**Figure A5.1**).

Concernant les échantillons d'argile, l'analyse diffractométrique de la fraction argileuse est basée sur la comparaison de trois diffractogrammes sur les pâtes orientées (**Figures A5.2 à A5.5**) :

- un essai à l'état naturel (N en vert) ;
- un essai sur une pâte saturée à l'éthylène glycol pendant 12h sous vide afin de provoquer le gonflement de certains minéraux argileux (G en bleu) ;
- un essai sur une pâte chauffée à 490°C pendant 2h ; ce traitement provoque la destruction de la kaolinite et la déshydratation des minéraux smectitiques (C en rouge).



Caractérisation des hétérogénéités texturales et hydriques des géomatériaux argileux par la méthode de Polarisation Provoquée : Application à l'EDZ de la station expérimentale de Tournemire.

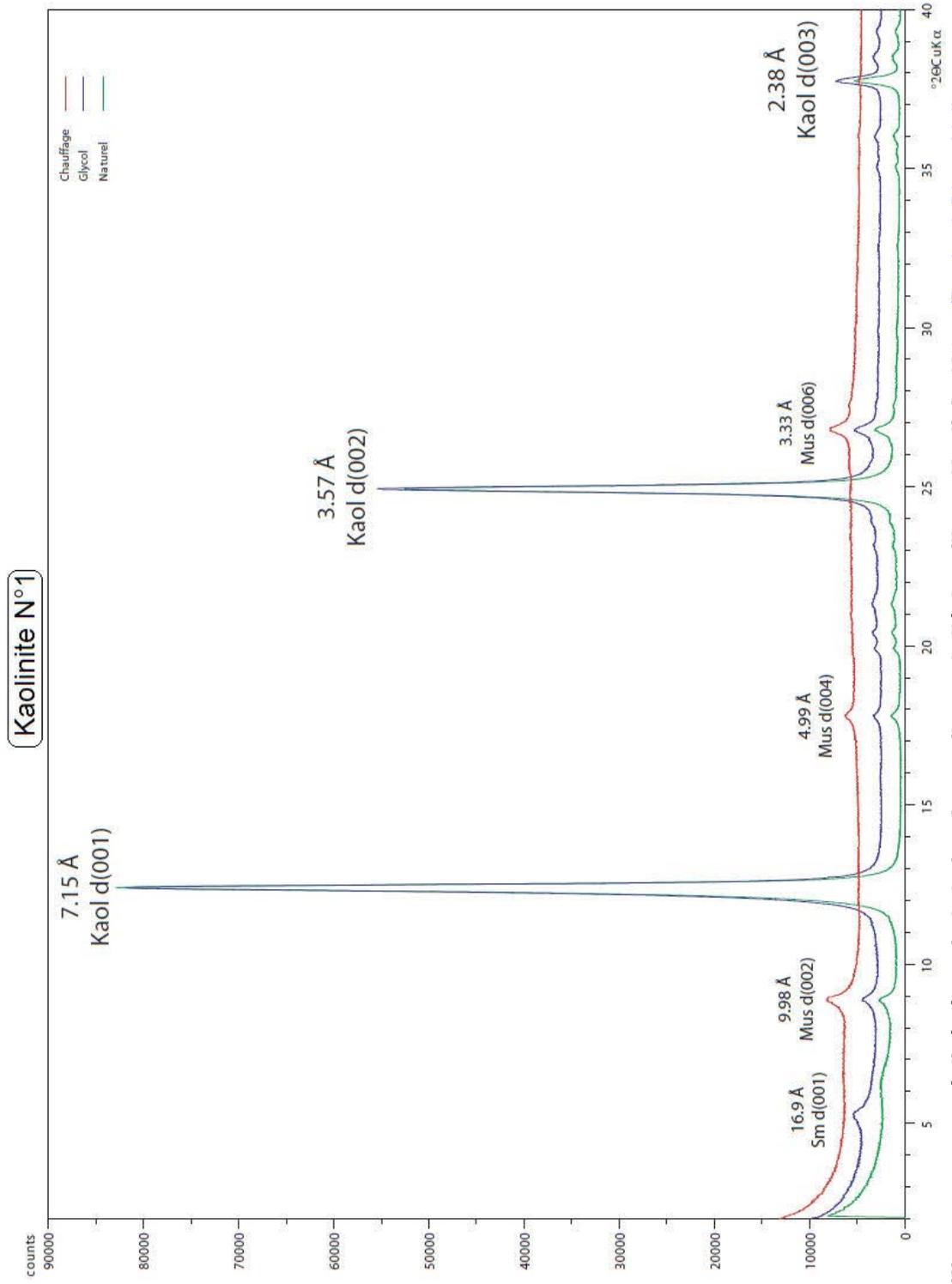


Figure A5.2. Diffractogrammes réalisés à partir de la fraction argileuse de l'échantillon « Kaolinite N°1 » (Bartier & Blanc-Valleron, 2009).

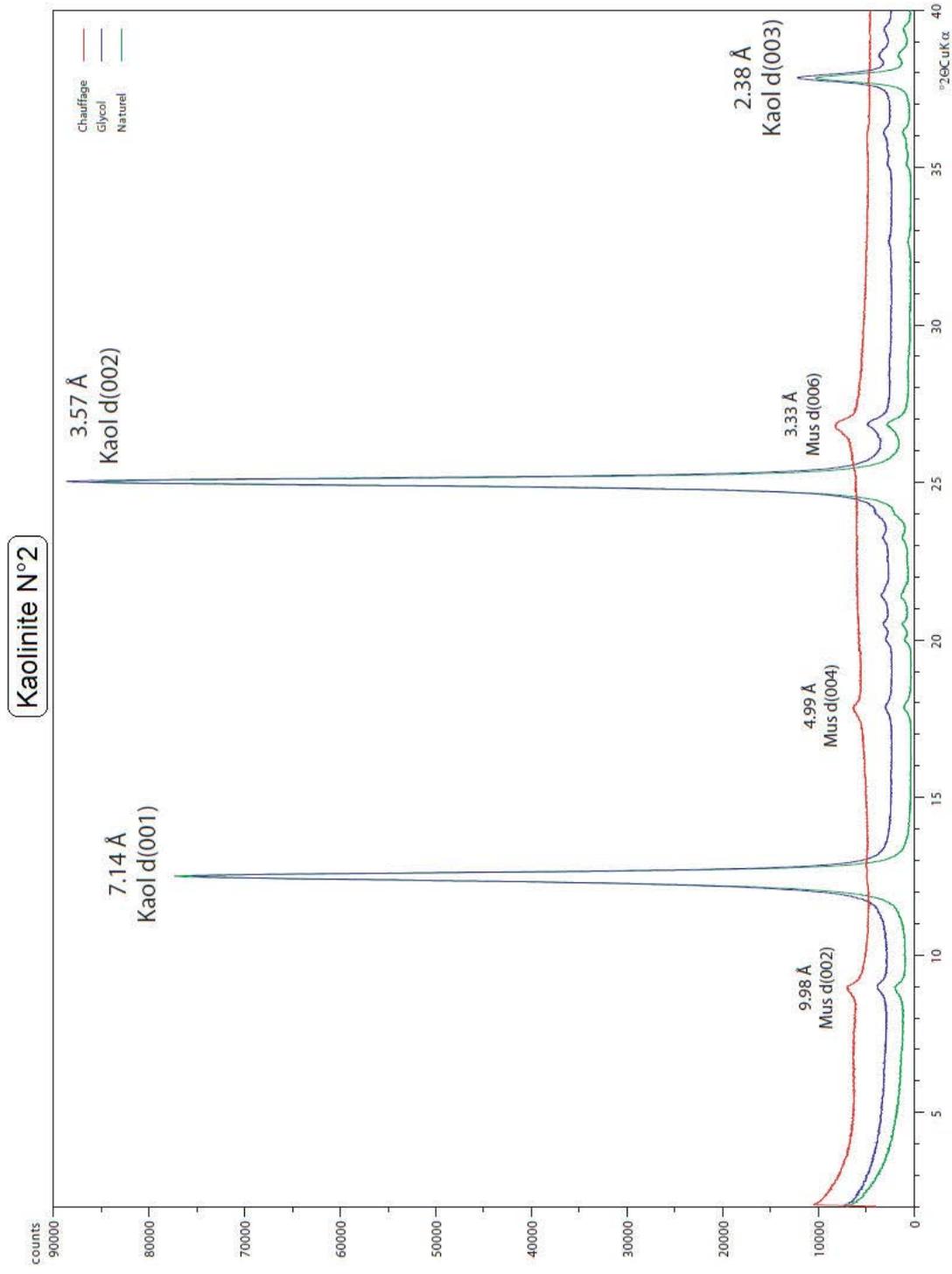


Figure A5.3. Diffractogramme réalisées à partir de la fraction argileuse de l'échantillon « Kaolinite N°2 » (Bartier & Blanc-Valleron, 2009).

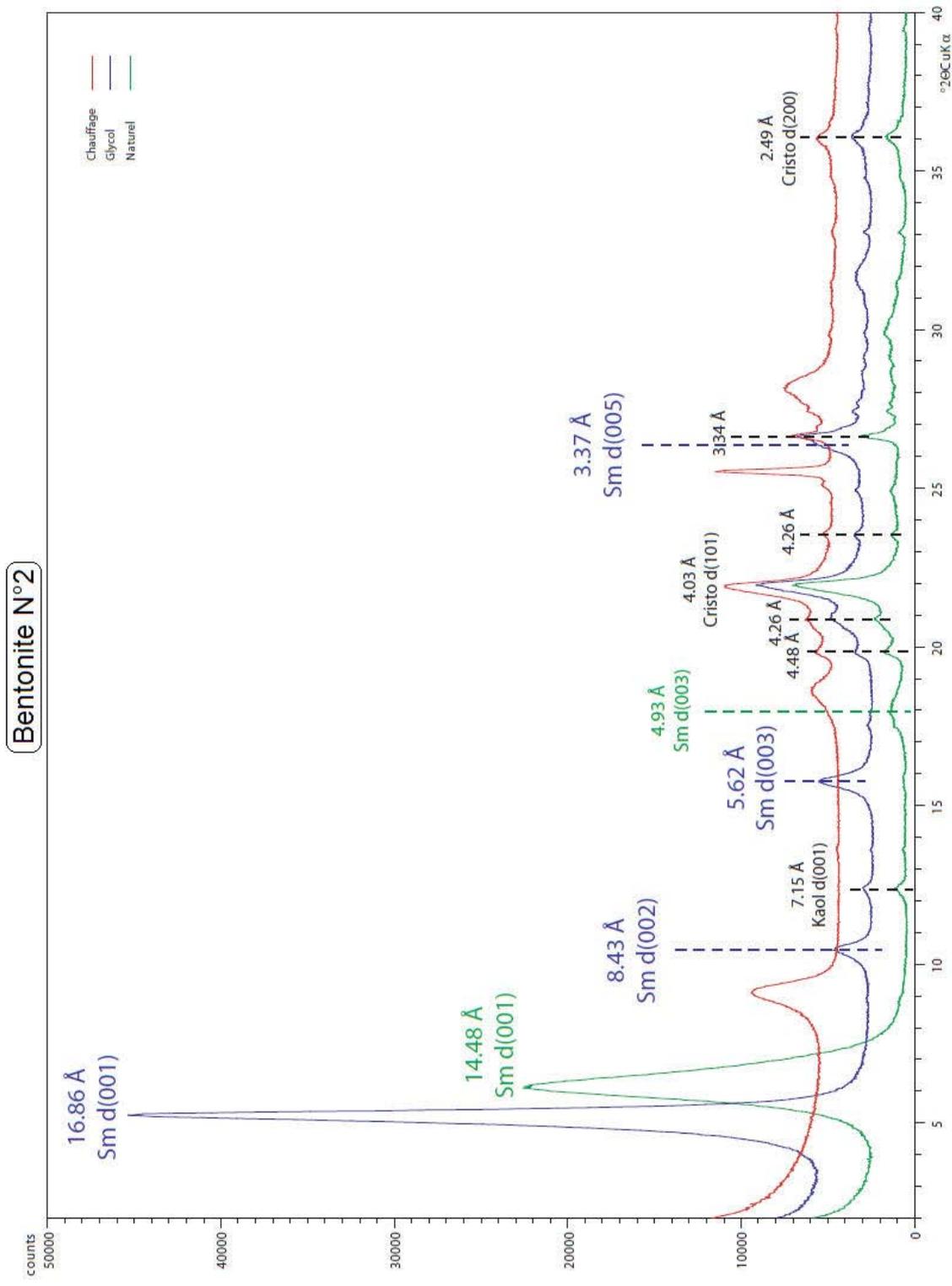


Figure A5.5. Diffractogrammes réalisés à partir de la fraction argileuse de l'échantillon « Bentonite N°2 » (Bartier & Blanc-Valleron, 2009).

Annexe A6 : Synthèse des mesures expérimentales menées en laboratoire

Tableau A6.1. Synthèse des mesures expérimentales menées en laboratoire

Date	Composition de l'échantillon	Conductivité de l'électrolyte	Durée d'expérience (jour)	Nombre de mesure par jour	Humidité Moyenne (%)	Température (°C)	Appareillage
18/05/07	Kaolinite N°1 (100%)	eau déminéralisée	1	1	54	23,9	SIP FUCHS
19/05/07	Kaolinite N°1 (20%) + Sable	eau déminéralisée	1	1	48	22,8	SIP FUCHS
21/05/07	Kaolinite N°1 (5%) + Sable	eau déminéralisée	1	1	58	21,1	SIP FUCHS
11/07/07-16/07/07	Bentonite N°1 (100 %)	eau déminéralisée	5	5	52,6	24,2	SIP FUCHS
16/07/07-17/07/07	Bentonite N°1 (20%) + Sable	eau déminéralisée	2	5	48,2	26,3	SIP FUCHS
17/07/07-18/07/07	Bentonite N°1 (1%) + Sable	eau déminéralisée	2	5	40	25,7	SIP FUCHS
18/07/07-19/07/07	Kaolinite N°1 (1%) + Sable	eau déminéralisée	2	5	38,6	26	SIP FUCHS
09/08/07	Kaolinite N°1 (5%) + Sable (étude chauffa ge)	eau déminéralisée	1	5	43	21,9	SIP FUCHS
10/08/07-11/08/07	Bentonite N°1 (5%) + Sable	eau déminéralisée	1	5	61	21,7	SIP FUCHS
22/12/07 & 08/01/08	Kaolinite N°1 (100 %)	(0,1g/l salinité)	2	2	***	***	SIP FUCHS
08/01/08-10/07/08	Kaolinite N°1 (100 %)	15,5 mS/cm	3	2	33,7	19,8	SIP FUCHS
11/01/08-15/01/08	Bentonite N°1 (100 %)	191,0 µS/cm	5	5	43,5	18,3	SIP FUCHS
20/01/08-21/01/08	Kaolinite N°1 (100 %)	1758,54 µS/cm	2	2	41	19,6	SIP FUCHS
23/01/08-25/01/08	Kaolinite N°1 (100 %) _2ème campagne	15,5 mS/cm	3	2	33,7	19,8	SIP FUCHS
30/01/08-31/01/08	Kaolinite N°1 (20%) + Sable	180,6 µS/cm	2	2	33,7	19,4	SIP FUCHS
31/01/08-01/02/08	Kaolinite N°1 (20%) + Sable	1685,6 µS/cm	2	2	39,1	18,9	SIP FUCHS
04/02/08-05/02/08	Kaolinite N°1 (20%) + Sable _2ème campagne	eau déminéralisée	2	2	48	22,8	SIP FUCHS
06/02/08-07/02/08	Kaolinite N°1 (20%) + Sable	15,5 mS/cm	2	2	36,4	20	SIP FUCHS
09/02/08-10/02/08	Kaolinite N°1 (1%) + Sable	180,6 µS/cm	2	2	50,5	24,8	SIP FUCHS
11/02/08-12/02/08	Kaolinite N°1 (1%) + Sable	1685,6 µS/cm	2	2	53,5	25	SIP FUCHS
12/02/08-13/02/08	Kaolinite N°1 (1%) + Sable	15,5 m S/cm	2	2	51	24,9	SIP FUCHS
14/02/08-15/02/08	Bentonite N°2 (100 %)	eau déminéralisée	2	2	32,2	19,3	SIP FUCHS
15/02/08-16/02/08	Bentonite N°2 (100 %)	184,8 µS/cm	2	2	31,1	17,5	SIP FUCHS
19/02/08-20/02/08	Bentonite N°2 (20%) + Sable	eau déminéralisée	2	2	32	19,8	SIP FUCHS
20/02/08-21/02/08	Bentonite N°2 (20%) + Sable	189,3 µS/cm	2	2	39,6	20,7	SIP FUCHS
07/03/08 & 10/03/08	Bentonite N°2 (20%) + Sable	1759,9 µS/cm	2	10	33,1	20,3	NUMETRIQ
14/03/08	Bentonite N°2 (20%) + Sable	15,6 mS/cm	1	1	39,4	20,9	SIP FUCHS
25/03/08-26/03/08	Bentonite N°2 (20%) + Sable (300- 400µm)	eau déminéralisée	2	2/appareil	35,2	19,7	NUMETRIQ/SIP FUCHS

01/04/08-02/04/08	Bentonite N°2 (5%) + Sable	eau déminéralisée	2	2	44	20,9	NUMETRIQ/SIP FUCHS
03/04/08-04/04/08	Kaolinite N°2 (20%) + Sable (300- 400µm)	eau déminéralisée	2	2/appareil	35,8	19,9	NUMETRIQ/SIP FUCHS
17/04/08-18/04/08	Bentonite N°2 (5%) + Sable	182,4 µS/cm	2	2/appareil	36,2	19,7	NUMETRIQ/SIP FUCHS
27/04/08-28/04/08	Bentonite N°2 (5%) + Sable	1809,3 µS/cm	2	2/appareil	37,3	21,8	NUMETRIQ/SIP FUCHS
01/05/08-02/05/08	Bentonite N°2 (5%) + Sable	14,8 m S/cm	2	2/appareil	44,7	18,6	NUMETRIQ/SIP FUCHS
20/07/09-21/07/09	Bentonite N°2 (1%) + Sable	eau déminéralisée	2	2	44,5	24,4	NUMETRIQ
21/07/09-22/07/09	Bentonite N°2 (1%) + Sable	215,5 µS/cm	2	2	50,5	24,8	NUMETRIQ
22/07/09-23/07/09	Bentonite N°2 (1%) + Sable	1956,9 µS/cm	2	2	53,5	25	NUMETRIQ
23/07/09-24/07/09	Bentonite N°2 (1%) + Sable	17,6 mS/cm	2	2	51	24,9	NUMETRIQ
20/10/09	Kaolinite N°2 (100%)	eau déminéralisée	1	2 /5	32	22,4	NUMETRIQ/ SECR-1
27/10/09	Kaolinite N°2 (20%) + Sable	eau déminéralisée	1	2 /5	45	24,5	NUMETRIQ/ SECR-1
03/11/09	Kaolinite N°2 (5%) + Sable	eau déminéralisée	1	2 /5	43	24,3	NUMETRIQ/ SECR-1
10/11/09	Kaolinite N°2 (1%) + Sable	eau déminéralisée	1	2 /5	32	22,3	NUMETRIQ/ SECR-1
17/11/09	Kaolinite N°2 (100%)	212,9 µS/cm	1	2	43	23	NUMETRIQ
17/11/09	Kaolinite N°2 (20%) + Sable	202,08 µS/cm	1	2	42	23,6	NUMETRIQ
24/11/09	Kaolinite N°2 (5%) + Sable	230,28 µS/cm	1	2	43	23,9	NUMETRIQ
24/11/09	Kaolinite N°2 (1%) + Sable	218,01 µS/cm	1	2	42	24	NUMETRIQ
01/12/09	Kaolinite N°2 (100%)	1938,42 µS/cm	1	2	32	22,9	NUMETRIQ
01/12/09	Kaolinite N°2 (20%) + Sable	1940,59 µS/cm	1	2	31	23,4	NUMETRIQ
08/12/2009	Kaolinite N°2 (5%) + Sable	1891,62 µS/cm	1	2	33	22,1	NUMETRIQ
15/12/2009	Kaolinite N°2 (1%) + Sable	1845,9 µS/cm	1	2	24	20,9	NUMETRIQ

Caractérisation des hétérogénéités texturales et hydriques des géomatériaux argileux par la méthode de Polarisation Provoquée : Application à l'EDZ de la station expérimentale de Tournemire.