

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la technologie

Département : Génie Civil et d'Hydraulique

Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية والري
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en Génie Civil

Spécialité : Modélisation Numérique des Géomatériaux

Intitulé
**Contribution à la reconnaissance du sol par
tomographie électrique**

Présentée par :
HEBBACHE Kamel

Directeur de thèse :
Professeur : **MELLAS Mekki**

Soutenue publiquement le
25/05/2017

Devant le jury composé de :

Mr. CHEBILI Rachid	Professeur	Président	Université de Biskra
Mr. MELLAS Mekki	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Mr. BOUBAYA Djamel	Maitre de Conférences 'A'	Co-rapporteur	Université de Tébessa
Mr. FEHDI Chemseddine	Professeur	Examineur	Université de Tébessa
Mr. BENMEDDOUR Djamel	Maitre de Conférences 'A'	Examineur	Université de Biskra
Mr. ZATAR Abdallah	Maitre de Conférences 'A'	Examineur	Université de Biskra

Avant-Propos

La présente thèse de doctorat intitulée « Contribution à la reconnaissance du sol par tomographie électrique » a été réalisée à l'Université Mohamed Khider (Biskra), au sein du Laboratoire de Recherche en Génie Civil (LRGC). Cette thèse, est considérée la première du genre au département de Génie Civil et d'Hydraulique, dans laquelle a utilisé la géophysique appliquée dans le domaine de Génie Civil.

L'interprétation des données géophysiques peut être entièrement objective ou fortement subjective. Elle peut s'étendre d'une simple inspection d'une carte ou d'un profil à une opération très sophistiquée faisant participer un personnel qualifié et un équipement bien élaboré.

Quelques interprétations exigent peu de connaissances en géologie, mais la qualité de la plupart des interprétations est améliorée si le géophysicien a une bonne connaissance en géologie. Bien que quelques individus sont à la fois de bons géophysiciens et de bons géologues, une coopération entre les géologues et les géophysiciens est l'approche la plus efficace pour l'interprétation correct des données géophysiques.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

*Mes parents, mes frères et mes sœurs pour leurs soutiens, leurs encouragements et leurs
patiences.*

Remerciements

Ces travaux de thèse ont été principalement effectués au sein de département de Génie Civil et d'Hydraulique et au Laboratoire de Recherche en Génie Civil de l'Université de Mohamed Khider (Biskra).

Tout d'abord, je tiens à remercier Allah (الله) le clément et le miséricordieux pour m'avoir donné la santé, le courage et la patience de mener à bien ce travail.

En premier lieu, je souhaite remercier vivement mon directeur de thèse *Mr. Mellas Mekki*, je le remercie pour tout ce qu'il a fait pour la réussite de ce travail. Il n'a pas cessé de me conseiller et de m'orienter. Je le remercie pour les conseils et les encouragements au cours de mes études doctorales. Le soutien qu'il m'avait accordé m'a permis de réaliser ce travail dans de très bonnes conditions.

Au terme de ce travail, je tiens à remercier aussi *Mr. Boubaya Djamel*, mon co-directeur de thèse (Laboratoire Eau et Environnement, Université de Larbi Tébessi (Tébessa)). Qu'il reçoit l'expression des mes remerciements les plus chaleureux, pour m'avoir dirigé durant ce travail de thèse. Ses conseils et ses encouragements étaient pour moi un fil conducteur tout au long de mes recherches scientifiques durant le parcours de doctorat. Il a su encadrer ce travail de thèse, en y apportant son expérience scientifique. J'ai beaucoup apprécié sa disponibilité et ses performances professionnelles, ainsi que la confiance qu'il a voulu m'accorder.

Je tiens tout particulièrement à remercier messieurs : *Mr. Meng Heng Lok* de l'Université de Sains Malaysia (Malaisie), le directeur de la compagnie *Geotomosoft* pour son aide, *Mr. David Gomez Ortiz* de l'Université King Juan Carlos (Espagne), *Mr. Jassim M. Thabit* de l'Université de Baghdad (Iraq) et *Mr. Torleif Dahlin* de l'Université de Lund (Suède), je le remercie une deuxième fois pour leur aide scientifique inestimable.

Je tiens à exprimer mes remerciements à *Mr. Chebili Rachid*, de l'Université de Biskra, pour avoir accepté de présider la soutenance de cette thèse.

Mes remerciements :

Aux membres du jury qui ont accepté d'être les rapporteurs de cette thèse et me donner de leur temps et de leur attention pour évaluer ce travail. Je les remercie infiniment de l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

À *Mr Fehdi Chemseddine* de l'Université de Larbi Tébessi, Tébessa.

À *Mr. Zatar Abdallah* et à *Mr. Benmeddour Djamel* de l'Université de Mohamed Khider, Biskra.

Je remercie vivement la faculté des *Sciences et de la Technologie* de l'Université Mohamed Khider, pour m'avoir donné l'occasion de bénéficier de deux stages de perfectionnement à l'étranger (Suède). Ainsi que son aide financière lors de mes participations aux conférences.

Je remercie aussi toute l'équipe *Géomécanique et Ouvrages (GÉO)* de département de Génie Civil et d'Hydraulique.

Je n'oublie pas à remercier tout mes enseignants durant mon cursus éducatif.

Je remercie tous mes amis.

Enfin, je voudrais exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin pour réaliser ce travail.

Kamel

Résumé

Les méthodes électriques par courant continu en géophysique, ont pour objectif de déterminer les propriétés électriques du sol par la mesure de sa résistivité. La technique de tomographie électrique est la reconnaissance multi-dimensionnelle des propriétés électriques intrinsèques du milieu étudié. En géophysique, cette technique permet de traduire les données acquises en surface ou en sub-surface en une image interprétable en termes géologique. La tomographie électrique est fréquemment employée dans différents domaines (géologie, hydrogéologie, génie civil et environnement, etc.).

Notre travail est basé sur l'utilisation de la méthode dite: la résistivité de tomographie électrique selon l'acquisition 2D. D'une part, pour tester la capacité de la méthode de tomographie électrique, afin de localiser et de déterminer les cavités souterraines dans le proche sous-sol et la caractérisation du sol par des mesures in situ, et d'autre part pour faire des comparaisons par simulation numérique. En utilisant les logiciels Res2Dmod et Res2Dinv, pour différents dispositifs d'électrodes de mesure utilisés en tomographie électrique (Wenner, Dipôle-dipôle, Pôle-dipôle, Pôle-pôle, Schlumberger et Gradient). Les cavités modélisées ont des sections circulaires et rectangulaires avec différentes résistivités du milieu encaissant, ainsi que d'évaluer le comportement de ces dispositifs d'électrodes et déduire leurs avantages et leurs inconvénients.

L'étude a conclu que cette technique de tomographie électrique est efficace et a montré son efficacité pour la reconnaissance du sol. Les résultats de la modélisation numérique, ont montré que le dispositif d'électrode dipôle-dipôle a donné de bons résultats pour la détection des cavités souterraines dans le proche sous-sol, en l'absence de bruit. Mais, en présence de bruit, les dispositifs d'électrodes: gradient, pôle-pôle et pôle dipôle ont donné de bons résultats.

Mots clés : Tomographie électrique, Dispositif d'électrode, Cavité, Résistivité

Abstract

In geophysics, the resistivity methods aim to determine the properties of ground by taking a measurement of their resistivity. Electrical resistivity tomography (ERT) is a straightforward extension of the traditional electrical resistivity method. The ERT method is the multi dimensional reconnaissance of the intrinsic electric properties of the studied area. In geophysics, this technique makes to present the data gathered on surface or sub-surface in an interpretable image in geological term. Electrical resistivity is widely used geophysical method to solve the problems encountered in geology, hydrogeology, civil engineering and environment...etc.

In this study, we have concentrated to use this method according to the 2D acquisition. On the one hand, to test the capacity of ERT to determine the underground cavities near the ground surface and to characterize the soil, and on the other hand to make a comparison by numerical modeling of different electrode arrays used in resistivity tomography (Wenner, Dipole-dipole, Pole-dipole, Pole-pole, Schlumberger and Gradient) by using Res2Dmod and Res2Dinv software's and to evaluate their behaviour, in order to detect the underground cavity, at different depths and different resistivity of background environment, and to deduce the advantages and the disadvantages of each array.

The study concluded that the technique of electrical tomography is effective and has shown its effectiveness for soil characterisation. The results of numerical modeling showed that the electrode array Dipole-dipole gave good results for detecting the underground cavities near to the surface, in the absence of noise. But, in the presence of noise, the electrode arrays: gradient, pole-pole and pole-dipole gave the best results.

Keywords: Electrical tomography, Electrode array, Cavity, Resistivity

تهدف الطرق الكهربية عن طريق التيار المستمر في الجيوفيزياء، لتحديد خواص التربة وفحصها عن طريق قياس مقاومتها النوعية. تقنية المقاومة الكهربية أو التصوير المقطعي؛ هي المعرفة المتعددة الأبعاد من حيث الخواص الكهربية أثناء أخذ القياسات في الحقل. في علم الجيوفيزياء، تسمح هذه التقنية بترجمة البيانات المأخوذة من على أو تحت سطح الأرض في صورة مفسرة جيولوجيا. تعتبر طريقة التصوير الكهربي المقطعي واحدة من التقنيات الواعدة المناسبة تماما للتطبيقات في مجالات العلوم، الهندسة البيئية، الجيولوجيا، الهيدروجيولوجيا والهندسة المدنية. العمل الحالي يهدف إلى إظهار كفاءة تقنية التصوير الكهربي المقطعي، عن طريق قياس المقاومة الكهربية التصويرية ثنائية الأبعاد.

ركزنا في هذا العمل، من جهة لاختبار قدرة هذه الطريقة من أجل تحديد موقع التجايف القريبة من سطح الأرض و وصف التربة عن طريق قياسات ميدانية في موقعين مختلفين، ومن جهة أخرى لإجراء مقارنات بين مختلف الترتيبات المستخدمة في التنقيب الكهربي (فتر، ثنائي القطب-ثنائي القطب، أحادي القطب-ثنائي القطب، أحادي القطب-أحادي القطب، فتر- شلمبرجير والمتدرج) باستخدام أحدث برنامج محاكاة القياس Res2Dmod و برنامج Res2Dinv لتحليل انعكاس البيانات ثنائية الأبعاد و تقييم سلوك هذه الترتيبات للكشف عن التجايف في باطن الأرض، على أعماق مختلفة والتي تضم خلفيات مختلفة من حيث القياسات، بالإضافة إلى تسليط الضوء على مزايا و عيوب هذه الترتيبات.

أشارت نتائج دراسات المسح، أن التصوير الكهربي المقطعي هي أداة جيوفيزيائية فعّالة وأظهرت كفاءتها في كشف ورصد الفجوات وأيضا في وصف التربة. نتائج النمذجة العددية أظهرت أيضا، أن الترتيب ثنائي القطب-ثنائي القطب هو الترتيب الذي أعطى نتائج جيدة في الكشف عن التجايف القريبة من سطح الأرض، في غياب الضوضاء، لكن في وجود الضوضاء، كل من الترتيبات؛ المتدرج، أحادي القطب-أحادي القطب و أحادي القطب-ثنائي القطب أعطوا نتائج جيدة.

كلمات مفتاحية: التصوير الكهربي المقطعي، ترتيب القطب، تجويف، المقاومة

Table des matières

Avant Propos	
Remerciements	
Résumé	
Table des matières	I
Liste des acronymes et symboles	V
Liste des abréviations	VI
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	XI

Introduction générale

Introduction générale.....	2
----------------------------	---

Chapitre I : Rappels théoriques

I.1 Introduction.....	6
I.2 Historique de la prospection électrique.....	6
I.3 Equations fondamentales pour les méthodes électriques.....	8
I.3.1 La formulation de Maxwell pour l'électromagnétisme	8
I.3.2 L'aspect théorique simplifié (Loi d'Ohm)	10
I.4 La polarisation provoquée (PP)	14
I.4.1 Les Mécanismes de polarisation	14
I.4.1.1 La polarisation métallique (Polarisation d'électrode).....	15
I.4.1.2 La polarisation de membrane.....	16
I.4.1.3 La polarisation électrochimique.....	16
I.4.2 Principe de la méthode.....	16
I.4.3 Domaine temporel.....	17
I.4.4 Domaine fréquentiel.....	17
I.5 Conclusion	19

Chapitre II : La tomographie électrique

II.1 Introduction	21
II.2 Présentation de la tomographie électrique.....	21
II.2.1 La tomographie électrique 2D	22
II.2.1.1 Pseudo-section.....	24
II.2.2 La tomographie électrique 3D	25

II.2.3 La tomographie électrique 4D (Suivi temporel)	26
II.3 Les différents dispositifs de mesures	26
II.3.1 Le dispositif Wenner	28
II.3.2 Le dispositif Wenner-Schlumberger	29
II.3.3 Le dispositif Dipôle-dipôle	32
II.3.4 Le dispositif Pôle-pôle	33
II.3.5 Le dispositif Pôle-dipôle	34
II.3.6 Le dispositif Gradient	36
II.3.7 Conclusion sur les types de dispositifs	38
II.4 Applications	40
II.5 Quelques cas d'Étude	41
II.6 Conclusion	44

Chapitre III : Propriétés électriques des roches et des matériaux

III.1 Introduction	46
III.2 Généralités sur les propriétés électriques des roches et des matériaux	46
III.3 Profondeur d'investigation	50
III.4 Paramètres géoélectriques	52
III.4.1 Principe d'équivalence	54
III.4.2 Principe de suppression	54
III.5 Conclusion	55

Chapitre IV : Traitement, inversion et interprétation des données de tomographie électrique

IV.1 Introduction	57
IV.2 Traitement et interprétation des données	57
IV.2.1 Théorie	58
IV.3 Concept d'inversion en géophysique	60
IV.3.1 Méthodologie de l'inversion	62
IV.3.2 Inversion des données dans Res2Dinv	62
IV.3.3 Élimination des mauvaises mesures	65
IV.4 Paramètres utilisés lors de l'inversion	65
IV.5 Modèles synthétiques	67
IV.5.1 Théorie	67
IV.6 Conclusion	68

Chapitre V : Modèles synthétiques

V.1 Simulations de pseudo-sections	70
V.1.1 Première Partie.....	70
V.1.2 Résultats.....	71
V.2.1 Deuxième Partie.....	79
V.2.2 Méthodologie	79
V.2.3 Modélisation synthétique.....	79
V.2.4 Résultats synthétique	83
V.2 Conclusion.....	88

Chapitre VI : Applications de la tomographie électrique

VI.1 Matériel d'acquisition et traitement des données.....	90
VI.2 Instrumentation	90
VI.2.1 Description du résistivimètre.....	90
VI.3 Application de l'imagerie électrique 2D pour la caractérisation du sol à Tiaret (Nord-Ouest de l'Algérie)	94
VI.3.1 Introduction	94
VI.3.2 Géologie et hydrogéologie de la zone d'étude	95
VI.3.3 Matériels et méthodes.....	97
VI.3.3.1 Méthodologie d'acquisition des données d'imagerie 2D.....	97
VI.3.4 Traitement des données d'imagerie 2D	98
VI.3.5 Résultats et discussion.....	100
VI.3.5.1 Interprétation des résultats de tomographie électrique	100
VI.3.6 conclusion.....	102
VI.4 Application de la tomographie électrique pour la détection des cavités souterraines (Exemple de la ville de Tolga)	103
VI.4.1 Introduction	103
VI.4.2 Méthodologie	104
VI.4.3 Résultats et discussions	105
VI.4.4 Investigations géotechniques.....	109
VI.4.5 Conclusion.....	109

Conclusion générale

Conclusion générale et perspectives	112
Bibliographie.....	115

Annexe

Utilisation du programme Res2Dinv.....	126
Utilisation du programme Res2Dmod.....	128
Description du clavier de resistivimètre SARIS	130
Paramètres d'inversion	133

Liste des acronymes et symboles

Notations

B	Induction magnétique (Wb/m ²)
D	Champ de déplacement (C/m ²)
E	Champ électrique (V/m)
H	Champ magnétique (A/m)
I_s	Source de courant (Amp)
J	Densité de courant (A/m ²)
K	Facteur géométrique (m)
L	Longueur (m)
R	Résistance (Ohm ou Ω)
S	Section (m ²)
S	Conductance longitudinale (S/m)
T	Résistance transversale (Ohm.m ²)
V	Potentiel électrique (Volts)
φ	Porosité
ρ	Résistivité (Ohm.m)
ρ_L	Résistivité longitudinale (Ohm.m)
ρ_t	Résistivité transversale (Ohm.m)
σ	Conductivité (S/m)
φ	Déphasage (mrad)
λ	Anisotropie
C1, C2, A, B	Électrodes de courant
P1, P2, M, N	Électrodes de potentiel

Liste des abréviations

CC	Courant continu
DC	Direct current
ERT/I	Electrical Resistivity Tomography/Imaging
MEF	Méthode des éléments finis
MDF	Méthode des différences finies
PP	Polarisation provoquée
PS	Polarisation spontanée
RMS	Root-Mean-Square
SEV	Sondage électrique vertical
1D	Une Dimension
2D	Deux Dimensions
3D	Trois Dimensions
4D	Quatre Dimensions (Cas de suivi temporel)

Liste des figures

Fig.I.1 Schéma illustratif de la résistivité ρ définie à partir d'un courant " I " circulant à travers un parallélépipède de résistance R et de surface S (Parkhomenko 1967).....	11
Fig.I.2 Dispositif des électrodes pour la prospection électrique sur un terrain homogène (C_1 , C_2 , P_1 et P_2 dans la littérature Anglaise) (http://en.openei.org).....	12
Fig.I.3 Répartition des lignes de courant et des lignes équipotentiels à la surface d'un terrain homogène (Source de courant A et B) (Kunetz 1966).....	12
Fig.I.4 Dispositif à quatre électrodes en surface.....	13
Fig.I.5 Forme du courant	14
Fig.I.6 Polarisation métallique ou d'électrode (Telford et al. 1990).....	15
Fig.I.7 Chargeabilité (Parasnis 1986).....	17
Fig.I.8 Les valeurs de polarisation provoquée pour certaines roches et minéraux (Loke 2015)	18
Fig.II.1 Dispositif de mesures de tomographie électrique. L'image obtenue après l'inversion correspond à une tomographie électrique 2D (D'après Aning 2012 , modifié).....	22
Fig.II.2 Arrangement des électrodes pour une acquisition 2D et séquence de mesure pour le dispositif Wenner (D'après Marescot 2004).....	24
Fig.II.3 Carte de pseudo-section (Exemple d'un dyke vertical).....	25
Fig.II.4 Les trois différents modèles géoélectriques utilisés pour l'interprétation des mesures de résistivité. a) modèle 1-D, b) modèle 2-D, et c) modèle 3-D (D'après Loke 2015 , modifié)	26
Fig.II.5 Arrangement des électrodes pour différents dispositifs (D'après Aizebeokhai 2010 , modifié).	27
Fig.II.6 Les sections de sensibilité pour le dispositif Wenner. Les sections de sensibilité pour a) Wenner-Alpha, b) Wenner-Bêta et c) Wenner-Gamma (Loke 2011).....	29
Fig.II.7 Les sections de sensibilité 2D pour le dispositif Wenner-Schlumberger avec a) $n=1$, b) $n=2$, c) $n=4$ et d) $n=6$ (Loke 2011).....	30
Fig.II.8 Comparaison entre les dispositifs Wenner et Schlumberger, ainsi les modèles de pseudo-sections	31

Fig.II.9 Les sections de sensibilité 2D pour le dispositif Dipôle-dipôle avec a) $n=1$, b) $n= 2$, c) $n=4$ et d) $n=6$ (Loke 2011)	33
Fig.II.10 Section de sensibilité 2D pour le dispositif Pôle-pôle (Loke 2011)	34
Fig.II.11 Les sections de sensibilité 2D pour le dispositif Pôle-dipôle a) $n=1$, b) $n= 2$, c) $n=4$ et d) $n=6$ (Loke 2011).....	35
Fig.II.12 Comparaison entre les pseudosections pour les dispositifs : a) Wenner, b) Wenner-Schlumberger et c) Dipôle-dipôle (D'après Loke 2011, modifié)	36
Fig.II.13 Les sections de sensibilité 2D pour le dispositif Gradient (Loke 2015).....	38
Fig.III.1 Résistivité des roches et des minéraux (Loke 2011).....	46
Fig.III.2 Gamme des résistivités des principaux matériaux géologiques (Palacky 1987).....	49
Fig.III.3 Principe d'équivalence (Parasnis 1986)	54
Fig.IV.1 Arrangement des blocs utilisés en modèle 2D avec les points de données dans la pseudo-section	58
Fig.IV.2 Etapes du traitement des données d'imagerie électrique 2D (http://theses.ulaval.ca).	61
Fig.IV.3 Modalité d'inversion de la tomographie électrique dans le Res2Dinv	63
Fig.IV.4 Élimination des mesures douteuses (D'après Loke 2014, modifié).....	65
Fig.IV.5 Schéma de maillage généré par le programme Res2Dmod (Loke 2016).....	67
Fig.V.1 Les trois modèles synthétiques modélisés avec RES2Dmod. a) Modèle 1: une cavité de 2 m de haut sous une couche de 1 m d'épaisseur. b) Modèle 2: une cavité de 2 m de haut sous une couche de 3 m d'épaisseur. c) Modèle 3: une cavité de 2 m de haut sous une couche de 5 m d'épaisseur.	70
Fig.V.2 Pseudo-sections calculées pour le modèle 1 avec quatre configurations de mesure a) Modèle 1, b) Dipôle-dipôle, c) Pôle-pôle, d) Wenner Alpha et e) Wenner-Schlumberger.....	73
Fig.V.3 Pseudo-sections calculées pour le modèle 2 avec quatre configurations de mesure a) Modèle 1, b) Dipôle-dipôle, c) Pôle-pôle, d) Wenner Alpha et e) Wenner-Schlumberger.....	74

Fig.V.4 Pseudo-sections calculées pour le modèle 3 avec quatre configurations de mesure a) Modèle 1, b) Dipôle-dipôle, c) Pôle-pôle, d) Wenner Alpha et e) Wenner-Schlumberger.....	75
Fig.V.5 Pseudo-sections inversées pour le modèle 1 avec quatre configurations de mesure a) Dipôle-dipôle, b) Pôle-pôle, c) Wenner Alpha et d) Wenner-Schlumberger.....	76
Fig.V.6 Pseudo-sections inversées pour le modèle 2 avec quatre configurations de mesure a) Dipôle-dipôle, b) Pôle-pôle, c) Wenner Alpha et d) Wenner-Schlumberger.....	77
Fig.V.7 Pseudo-sections inversées pour le modèle 3 avec quatre configurations de mesure a) Dipôle-dipôle, b) Pôle-pôle, c) Wenner Alpha et d) Wenner-Schlumberger.....	78
Fig.V.8 Les trois modèles synthétiques modélisés. a) modèle 1, b) modèle 2 et c) modèle 3. Le centre chaque cavité est $x = 5, 11, \text{ et } 17 \text{ m}$	81
Fig.V.9 Pseudo-sections du bruit contaminé par voltage dépendant pour le premier modèle synthétique a) Pôle-pôle, b) pôle-dipôle, c) Wenner- α , d) Schlumberger, e) dipôle-dipôle et f) gradient.....	82
Fig.V.10 Modèles de distribution de résistivité inversés pour le modèle 1 avec les dispositifs suivants : a) Pôle-pôle, b) pôle-dipôle, c) Wenner- α , d) Schlumberger, e) dipôle-dipôle et f) gradient.....	85
Fig.V.11 Modèles de distribution de résistivité inversés pour le modèle 2 avec les dispositifs suivants : a) Pôle-pôle, b) pôle-dipôle, c) Wenner- α , d) Schlumberger, e) dipôle-dipôle et f) gradient.....	86
Fig.V.11 Modèles de distribution de résistivité inversés pour le modèle 3 avec les dispositifs suivants : a) Pôle-pôle, b) pôle-dipôle, c) Wenner- α , d) Schlumberger, e) dipôle-dipôle et f) gradient.....	87
Fig.VI.1 Matériel d'acquisition multi-électrodes.	90
Fig.VI.2 a et b résistivimètre SARIS de Scintrex.....	90
Fig.VI.3 Mauvaise connexion entre l'électrode et le câble (ou la pince) (AL-Menshed 2011)	92
Fig.VI.4 Enfouissement incorrect de l'électrode dans le sol (AL-Menshed 2011).....	92
Fig.VI.5 Touchée du câble pendant l'opération de mesure(AL-Menshed 2011).....	92
Fig.VI.6 Touchée la pince pendant l'opération de mesure(AL-Menshed 2011).....	93
Fig.VI.7 Mettre la pince près de la surface du sol (AL-Menshed 2011).....	93

Fig.VI.8 a et b Carte de localisation montrant la zone d'étude.	94
Fig.VI.9 Carte géologique de la zone d'étude (Extrait de la carte géologique de Frenda. Échelle 1:50000).	96
Fig.VI.10 Localisation des profils électrique (Image, 21 Août 2013).	98
Fig.VI.11 Exemple d'élimination des mesures douteuses sur le profil L1	99
Fig.VI.12 Sections inversées de résistivité 2D pour les profils électriques L1 et L2	101
Fig.VI.13 Vues générales des cavités et fractures	102
Fig.VI.14 Illustration d'une cavité souterraine de la ville de Tolga (25 mars 2013).....	103
Fig.VI.15 Disposition de l'ensemble des panneaux électriques	105
Fig.VI.16 Résultats des mesures géophysiques des profils P1, P2 et P3.....	106
Fig.VI.17 Résultats des mesures géophysiques des profils P4, P5 et P6.....	107
Fig.VI.18 Résultats des mesures géophysiques des profils P7 et P8.....	108
Fig.VI.19 Résultats des mesures géophysiques des profils P9 et P10.....	109

Liste des tableaux

Tableau II.1 Caractéristiques des différents dispositifs Wenner, W-S et Dipôle-dipôle (D'après Reynolds 1997 , modifié).....	39
Tableau III.1 Tableau des coefficients pour déterminer la profondeur d'investigation pour différents dispositifs (D'après Edwards 1977 , modifié).	50
Tableau VI.1 Caractéristiques des profils électriques.....	104

Introduction générale

Introduction générale

Les méthodes de prospection géophysiques de surface sont nombreuses (électriques, électromagnétiques, gravimétriques et sismiques, etc.) et sont largement utilisées dans les domaines d'étude du sous-sol. La prospection électrique est parmi les techniques d'explorations géophysiques les plus utilisées pour les prospections non-destructives du sol et sous-sol. Plusieurs prospections de ce genre ont été réalisées. Ainsi, il y a un nombre très important d'études et de recherches établis par plusieurs compagnies et chercheurs pour divers objectifs. Le but de cette thèse est de caractériser par tomographie électrique : les fractures et les effondrements, de détecter les cavités souterraines et également la caractérisation du sol.

La méthode électrique est une technique géophysique largement utilisée pour la prospection des ressources naturelles. Des applications importantes comprennent la prospection minière de l'eau souterraine et du gravier. La méthode a été testée aux contextes archéologiques et géotechniques (Carrara et al. 2001; Long et al. 2012; Nouioua et al. 2013), aussi bien, pour des applications environnementales (Metwaly et al. 2013), et pour le contrôle de la qualité des eaux souterraines (Ebraheem et al. 2009).

La résistivité électrique, varie entre différents matériaux géologiques terrestres, et dépend essentiellement de la variation de la teneur en eau et les ions dissous dans l'eau (Dahlin 1993). Les méthodes électriques peuvent ainsi être utilisées pour identifier les zones avec différentes propriétés électriques. Une raison, pour utiliser la méthode de résistivité est que cette méthode est non-destructrice : elle peut être utilisée pour étudier un objet à l'intérieur sans modifier sa structure. Aussi, la méthode peut donner une couverture de surface qui est impossible et pas pratique à réaliser par d'autres méthodes, comme par exemple le sondage mécanique.

Dans certaines applications, cette méthode est supérieure comparativement aux autres méthodes géophysiques. Par exemple, elle peut donner des résultats utiles où la profondeur de pénétration du radar géologique est limitée par une couche de surface très conductrice. En outre, étant donné que les propriétés électriques sont les seules propriétés physiques directement liées à la composition chimique, la mesure des propriétés électriques par l'utilisation des méthodes électriques ou électromagnétiques est normalement le seul moyen pour cartographier la contamination chimique de terrain. Souvent une combinaison de la méthode de résistivité électrique avec d'autres méthodes peut être un outil très puissant (El-Qady et al. 2005; El Khammari et al. 2007; Nouioua et al. 2013).

La tomographie électrique est l'extension directe de la méthode classique de résistivité (Fehdi et al. 2011). La tomographie électrique est une méthode d'imagerie qui permet de définir un milieu en termes de résistivité électrique à partir de mesures du potentiel. La tomographie électrique tend à devenir l'outil indispensable de toute personne concernée par des problèmes d'environnement, d'hydrogéologie, de génie civil, de géologie, de recherche de matière première ou d'archéologie (Dahlin 1993).

Les méthodes électriques semblent bien adaptées à la mise en évidence d'anomalies de porosité ou à la présence de fissuration, grâce au fort contraste de propriétés électriques. Le contrôle non-destructif de galeries, puits, piliers de ponts nécessite également l'utilisation de méthodes peu invasives, rapides à mettre en œuvre et de faible coût.

Des applications se développent actuellement de plus en plus dans le domaine de la recherche minière et pétrolière. Des développements techniques relativement récents, en particulier dus aux progrès en informatique, ont permis de mettre en œuvre des dispositifs d'acquisition comptant un grand nombre d'électrodes, selon les besoins de l'acquisition.

Cette thèse est subdivisée en six chapitres comprenant : la revue bibliographique, le traitement des données géophysiques et les applications effectuées.

Le premier chapitre présente les notions fondamentales de la physique et les connaissances théoriques de base sur lesquels repose le calcul de la résistivité électrique en courant continu. On présente ainsi, la méthode de polarisation provoquée et les mécanismes de polarisation distingués. Le deuxième chapitre traite de façon relativement claire la méthode de tomographie électrique, les différentes géométries d'acquisition de résistivité électrique, les propriétés électriques des matériaux, les avantages et les limitations de cette technique et les applications de la méthode de tomographie électrique.

Dans le troisième chapitre, on présente les propriétés physiques des matériaux qui affectent la valeur de résistivité, par ailleurs la notion de la profondeur d'investigation dans la prospection électrique et les paramètres géoélectriques. Le quatrième chapitre présente la procédure du traitement, inversion et interprétation des données de tomographie électrique. Dans ce chapitre, une partie est consacrée à la présentation des logiciels d'inversion et de modélisation afin de résoudre les problèmes inverse et direct.

Le cinquième chapitre présente deux études numériques pour déterminer la capacité de la méthode de tomographie électrique à détecter les cavités souterraines à différentes

Introduction générale

profondeurs et pour différents milieux encaissants à partir de mesures de surface. Le sixième chapitre présente les applications effectuées dans le cadre de cette thèse pour la reconnaissance des cavités souterraines, les fractures et également la caractérisation des sols par tomographie électrique.

Enfin, une conclusion générale et des perspectives dans l'axe de contribution clôturent cette thèse.

Chapitre I.

Rappels théoriques

I.1 Introduction

I.2 Historique de la prospection électrique

I.3 Equations fondamentales pour les méthodes électriques

I.4 La polarisation provoquée (PP)

I.5 Conclusion

I.1 Introduction

En géophysique appliquée (*Applied geophysics*), la méthode géoélectrique est considérée parmi les techniques d'exploration les plus répandues, et ceci grâce à sa facilité d'exécution et la simplicité de son instrumentation. Cette technique se base essentiellement sur la mesure de la différence de potentiel ou la mesure du champ électrique associé au passage du courant électrique dans la sub-surface. La grandeur physique mesurée est la résistivité électrique. Celle-ci, caractérise la capacité d'un matériau à s'opposer au passage du courant électrique. Ce chapitre a pour objectif de reprendre, les bases théoriques de la méthode électrique, de décrire et de quantifier les mesures de résistivité électrique d'un terrain, ainsi que les techniques complémentaires de cette méthode.

I.2 Historique de la prospection électrique

Les premiers travaux en prospection électrique ont été établis par [Daft](#) et [Williams](#) en Suède ([Petersson 1907](#)). Ils utilisèrent un dipôle fixe d'injection de courant et un dipôle mobile de mesure du potentiel pour localiser les anomalies conductrices, puis les travaux établis par [Bergström \(1913\)](#). Pour des raisons pratiques, la prospection électrique est née au cours de l'été 1912, pendant les vacances scolaires de la même année, [Conrad Schlumberger \(1878-1936\)](#), ingénieur minier en 1900 et puis professeur de physique à l'école des Mines de Paris, a perfectionné son travail pionnier en France ([Schlumberger 1920](#)). La procédure a été le fruit d'une longue période de réflexion, après quoi il a choisi son équipement et mena les premières expériences dans les sites de Normandie (Nord-Ouest de la France).

[Kunetz \(1966\)](#), reporta que les Anglais : [Gray](#) et [Wheeler](#) en 1720 et [Watson](#) en 1746, s'intéressèrent eux-mêmes aux propriétés électriques des roches et mesurèrent la conductivité de certaines roches, le premier travail important dans la prospection électrique doit être attribué à [Robert W. Fox \(1789-1877\)](#), qui grâce à sa connaissance de la géologie et de ses études sur la température de la terre, l'électricité et le magnétisme terrestre, mérite d'être considéré le grand père des géophysiciens ([Kunetz 1966](#); [Van Nostrand and Cook 1966](#)).

Dans les mines de Cornwall en Angleterre, [Fox](#) observa l'existence de courant électrique naturel qu'il attribue aux dépôts de sulfures métalliques en 1830. En 1833, [Fox](#) construisit le premier potentiomètre, bien qu'il était l'inventeur du phénomène au même temps que [Conrad Schlumberger](#). Ce dernier phénomène était appelé plus tard la polarisation spontanée (en anglais, *Self Potential*). Le problème de la détermination de la résistivité électrique d'un milieu non homogène a été discuté par [Maxwell](#) 1891. En 1918, [Conrad Schlumberger](#) initia

la première expérience in situ aboutissant à la création d'une carte d'équipotentiels sur un dépôt de pyrite à Sain-Bel (Rhône). En Amérique : Bernes, Brown et Wells (1880-1914) de l'institut d'études géologiques des États-Unis, étudièrent le phénomène de polarisation spontanée dans les mines de Nevada, et sont les premiers qui ont développé les électrodes non polarisables.

Les travaux mentionnés ci-dessus portent sur l'aspect particulier de la prospection électrique relatif au phénomène naturel. Conrad Schlumberger, qui a initié l'aspect dynamique de l'introduction du courant électrique dans le sol et son idée reste à ce jour la base de toutes les méthodes de prospection électrique à courant continu (*Direct current*). Cette idée consistait à comparer la distribution de potentiel produite d'un courant appliqué au sol à celui qui existerait si le même courant a été appliqué au sol homogène, et tirer des conclusions des différences observées concernant la nature du sol (Kunetz 1966).

Le concept de résistivité apparente, qui sera défini plus tard dans ce chapitre, est le produit de cette comparaison. Il faut rappeler que le physicien Frank Wenner (*National Bureau of Standards*) aux États-Unis, a développé cette même idée en 1915, en faisant l'analyse des propriétés d'un dispositif de mesure qui porte encore son nom. Le brevet de Wenner a été précédé par Brown en 1883, Daft et Williams en 1902, qui ont été les premiers à accorder les brevets sur les méthodes de prospection par l'utilisation des courants alternatifs à basses fréquences.

Les principes essentiels de la prospection électrique ont été définis avant la première guerre mondiale, et les investigations ont été principalement développées entre les deux guerres mondiales. En 1920, les frères Schlumberger, Conrad et Marcel réalisèrent les premiers relevés de résistivité électrique appliqués à la détection des minerais métalliques, les études géologiques et l'exploration pétrolière. Les succès de la méthode électrique pour l'exploration aboutirent à la constitution en 1926, la Société de Prospection Électrique, surnommée la *Pros* qui deviendra plus tard la *Compagnie Générale de Géophysique* (C.G.G) en 1931.

Durant la seconde guerre mondiale, une nouvelle variante de ces méthodes a été développée à l'école de Schlumberger en utilisant un courant naturel. Leur grande profondeur de pénétration sans aucune source d'énergie extérieure permet la simplicité des instruments et l'exécution rapide, ce qui rend cette méthode de résistivité particulièrement attractive.

Jusqu'aux années 1970, la méthode a peu évolué et l'effort a été porté sur la mise en œuvre et l'interprétation des sondages électriques et des cartes de résistivité. Au cours des années 1970,

une représentation apparut en deux dimensions (2D) des données électriques sous la forme de panneaux électrique (Edwards 1977). Le développement des outils numériques dans les années 1990 et le développement conjoint d'algorithmes d'inversion rapides (Loke and Barker 1996) ont permis l'essor considérable des méthodes d'imagerie électrique 2D, 3D et 4D.

I.3 Equations fondamentales pour les méthodes électriques

Dans ce premier chapitre, nous rappelons et présentons les notions fondamentales de la physique et les équations mathématiques de base qui régissent le comportement du champ électrique dans les milieux homogènes et hétérogènes. Ces équations vont permettre de prédire les réponses des milieux d'étude à l'aide de calculs analytiques ou numériques.

I.3.1 La formulation de Maxwell pour l'électromagnétisme

Tout phénomène électromagnétique (EM) est régi par les quatre équations fondamentales de l'électromagnétisme, proprement dit, les lois fondamentales de la physique établies par le physicien Anglais J.C. Maxwell (1831-1879). Ces lois lient le comportement du champ électrique \mathbf{E} (V/m), du champ magnétique \mathbf{H} (A/m), du champ de déplacement \mathbf{D} (C/m²), de la densité de courant \mathbf{J} (A/m²) et de l'induction magnétique \mathbf{B} (Tesla ou Wb/m²). Tous ces champs sont des grandeurs vectorielles, et en présence de source de courant I_s , on a :

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (\text{I. 1})$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J} \quad (\text{I. 2})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = I_s \quad (\text{I. 3})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{I. 4})$$

Dans les méthodes électriques utilisées pour calculer la distribution de la résistivité dans le sous-sol, on se place dans l'hypothèse des courants continus. De plus, le champ magnétique (\mathbf{H}) peut souvent être ignoré (Telford et al. 1990; Zhdanov 2002). De même, les composantes temporelles peuvent également être négligées, et les quatre équations ou les lois de Maxwell se réduisent à :

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (I.5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = I_s \quad (I.6)$$

D'après l'équation (I.5), on sait que le champ électrique \mathbf{E} dérive d'un champ de potentiel scalaire V et on peut écrire \mathbf{E} sous la forme suivante :

$$\mathbf{E} = \frac{\partial V}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \hat{k} = -\nabla V \quad (I.7)$$

Comme les méthodes électriques ont pour but de déterminer la résistivité électrique ρ dans le sous-sol, ce paramètre est défini par la loi d'Ohm généralisée, on a :

$$\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E} \Rightarrow \mathbf{J} = \frac{\mathbf{E}}{\rho} \quad (\text{loi de Coulomb}) \quad (I.8)$$

La loi de Coulomb, est le rapport entre le champ électrique \mathbf{E} et la résistivité électrique (ρ). La conductivité électrique (σ) correspond à la constante de proportionnalité entre le champ électrique \mathbf{E} appliqué en un point du milieu et la densité de courant \mathbf{J} . En combinant les équations (I.6), (I.7) et (I.8), on obtient :

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = I_s \quad (I.9)$$

Lorsque le milieu est homogène, c'est-à-dire, que la conductivité est la même dans tout l'espace, et en absence de sources, l'équation (I.9) devient :

$$\nabla^2 V = 0 \quad (\text{équation de Laplace}) \quad (I.10)$$

Dans le cas d'un milieu homogène et isotrope, le champ électrique du à une source peut être calculé analytiquement en intégrant l'équation (I.6), en remplaçant \mathbf{J} par son expression dans la loi d'Ohm, on obtient :

$$\mathbf{E}(r) = \frac{I\rho}{4\pi r^2} \quad (\text{I. 11})$$

Comme le champ électrique est le gradient d'un potentiel, on déduit de (I.11), le potentiel électrique dû à une source ponctuelle, on a :

$$V(r) = \frac{I\rho}{4\pi r} \quad (\text{I. 12})$$

L'intérêt des méthodes électriques par courant continu (CC) réside dans le fait qu'en gardant fixe le centre du dispositif et en augmentant régulièrement sa longueur (l'espacement entre les pôles d'injection du courant et les pôles de mesure du potentiel), on prend en compte la distribution de la résistivité d'un volume croissant du sous-sol dans la mesure. Ceci se traduit par une résolution verticale permettant de décrire les structures en fonction de la profondeur (Parasnis 1986; Telford et al. 1990).

I.3.2 L'aspect théorique simplifié (Loi d'Ohm)

La propriété d'un conducteur de s'opposer plus ou moins au mouvement ordonné des charges électriques, c'est-à-dire, au passage du courant électrique, est appelé résistance électrique. La loi d'Ohm est une loi fondamentale dans la physique, elle présente les propriétés électriques d'un flux de courant électrique qui traverse un milieu donné. Elle montre que la différence de potentiel ou la tension entre deux pôles d'une résistance R est proportionnelle à l'intensité du courant électrique " I ", elle est définie par l'équation suivante :

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{I. 13})$$

Connaissant un matériau ayant la forme d'un parallélépipède (Fig.I.1) de longueur (l), et de section (S), la résistivité électrique du parallélépipède est la résistance *Ohmique* (R) de sa section et sur toute la longueur. La résistivité électrique est une propriété physique définie comme la capacité d'un milieu à s'opposer au passage du courant électrique. La résistivité s'exprime par l'équation suivante :

$$\rho = \frac{V S}{I l} \quad (\text{I. 14})$$

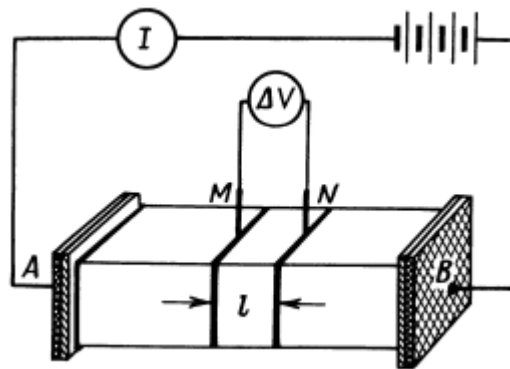


Fig.I.1 Schéma illustratif de la résistivité ρ définie à partir d'un courant " I " circulant à travers un parallélépipède de résistance R et de surface S (Parkhomenko 1967).

L'inverse de la grandeur physique de résistivité électrique (exprimée en Ohm.m ou $\Omega \cdot m$) est la conductivité électrique, notée σ , qui est évaluée en siemens par mètre (S/m). Autrement dit, plus la résistivité est faible, plus la conductivité est élevée.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (\text{I. 15})$$

Donc d'après la loi d'Ohm, la résistivité est définie par : $\rho = k \frac{V}{I}$

où k est appelé le facteur géométrique (en mètre). Il dépend en effet des positions des quatre électrodes sur le sol. Le principe de la prospection électrique est de déterminer, à partir de mesures effectuées depuis la surface du sol, une caractéristique géoélectrique des couches profondes et d'en déduire des indications sur leur constitution.

Cette méthode consiste à injecter dans le sol un courant électrique continu d'intensité " I " ou alternatif à très basse fréquence par le biais de deux électrodes C_1 et C_2 et de mesurer la différence de potentiel induite entre une autre paire d'électrodes conventionnellement notées P_1 et P_2 (Fig.I.2). La répartition des lignes de courant dans le sol se fait en volume (Fig.I.3).

Si l'hémisphère est homogène et isotrope, le flux de courant sera radial et symétrique, et les lignes de courant sont perpendiculaires aux lignes d'équipotentiels (Fig.I.3). La densité de courant est plus forte près de la surface qu'en profondeur (Fig.I.2).

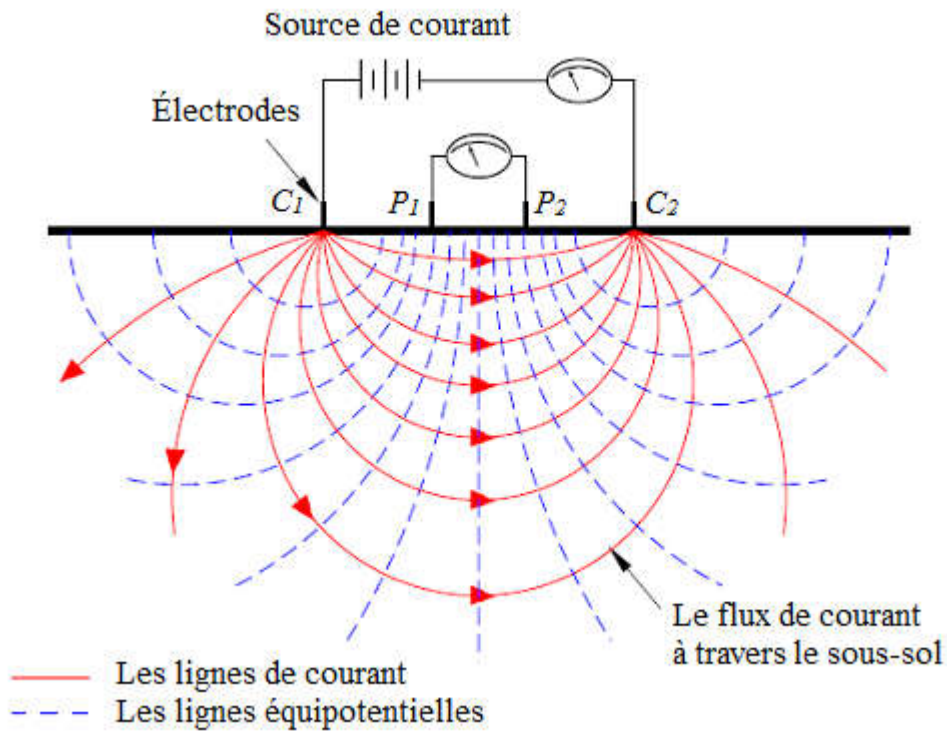


Fig.I.2 Dispositif des électrodes pour la prospection électrique sur un terrain homogène (C_1 , C_2 , P_1 et P_2) (<http://en.openei.org>).

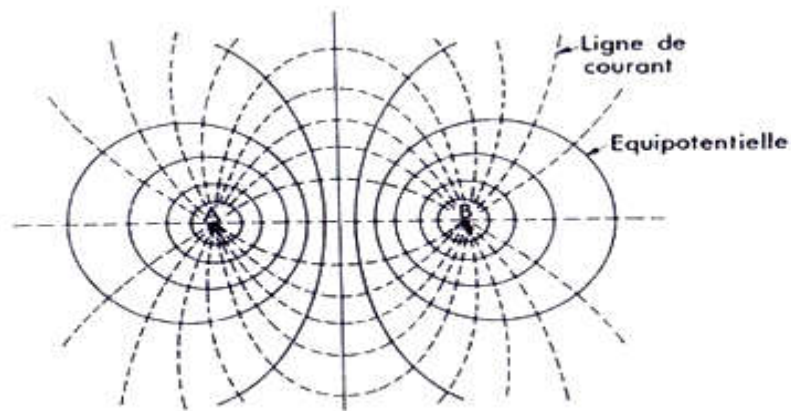


Fig.I.3 Répartition des lignes de courant et des lignes équipotentielles à la surface d'un terrain homogène (source de courant A et B) (Kunetz 1966).

Par conséquent, le potentiel (V) sera directement proportionnel au courant (I) et à la résistivité (ρ) du milieu, mais inversement proportionnel à la distance (r), qui est la distance entre l'électrode de courant et l'électrode de potentiel. Ainsi (V) est définie par :

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} \tag{I.16}$$

En prospection électrique, en utilisant quatre électrodes C_1 , C_2 , P_1 et P_2 (ou quadripôle) (Fig.I.4), la distance (r_i) entre les électrodes change selon l'emplacement d'électrodes de courant et de potentiel. D'après la figure ci-dessous (Fig.I.4), le potentiel (V) au point (P_1) dû à l'électrode de courant (C_1) est :

$$V_{C_1}^{P_1} = \left[\frac{I\rho}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{r_1} \right) \right] \quad (I.17)$$

Pour l'électrode de potentiel (P_1) dû à l'électrode de courant (C_2) l'équation sera : -

$$V_{C_2}^{P_1} = \left[\frac{I\rho}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{r_2} \right) \right] \quad (I.18)$$

Le signe négatif (-) correspond au courant émi par l'électrode (C_2).

On peut écrire que " I_1 " de l'électrode C_1 = - " I_2 " de l'électrode C_2 .

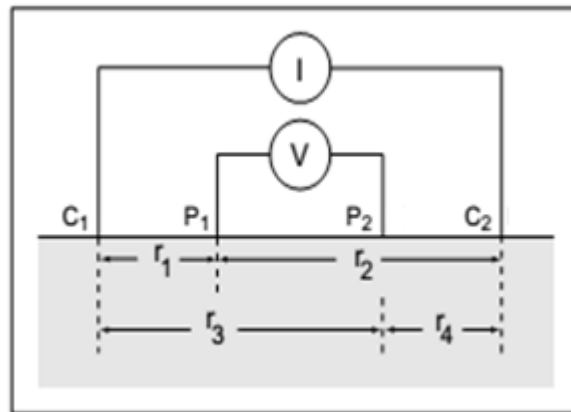


Fig.I.4 Dispositif à quatre électrodes en surface.

Par conséquent, la différence de potentiel au point (P_1) causée par les électrodes C_1 et C_2 est :

$$\Delta V_{C_1 C_2}^{P_1} = \left[\frac{I\rho}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right] \quad (I.19)$$

Par la même manière, on peut calculer la différence de potentiel au point de l'électrode (P_2), dû aux électrodes de courant (C_1 et C_2), ainsi.

$$\Delta V_{C_1 C_2}^{P_2} = \left[\frac{I\rho}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (I.20)$$

Ainsi, la différence de potentiel (ΔV) entre les deux électrodes P_1 et P_2 sera :

$$\Delta V_{C_1 C_2}^{P_1 P_2} = \Delta V_{C_1 C_2}^{P_1} - \Delta V_{C_1 C_2}^{P_2} \quad (I.21)$$

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (I.22)$$

En simplifiant l'équation (I.22), la résistivité demi-espace homogène est donnée par :

$$\rho = \underbrace{\left[\frac{2\pi}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}} \right]}_K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (I.23)$$

$$\rho = K \cdot R \quad (I.24)$$

Dans le cas d'un milieu homogène et isotrope, la résistivité correspond à la résistivité vraie du sol, ce qui n'est pas valable pour les milieux hétérogènes ou anisotropes. Dans les milieux hétérogènes, la résistivité mesurée est appelée *résistivité apparente* (Loke 2011).

I.4 La polarisation provoquée (PP)

I.4.1 Les Mécanismes de polarisation

Le phénomène de la polarisation provoquée PP ou la polarisation induite (en anglais, *Induced Polarization*) a été noté par Conrad Schlumberger en 1912 (Schlumberger 1920; Parasnis 1986). La PP est une technique relativement récente en géophysique, son utilisation a été introduite à la fin des années 1940. Elle a été principalement appliquée à la recherche des minerais métalliques disséminés, les minéraux argileux, l'exploration géothermale, en pollution : panaches contaminants (Leroux and Dahlin 2002; Shokri et al. 2016), la recherche des formations aquifères (les eaux souterraines) et en environnement (Dahlin et al. 2010). La PP est mesurée à l'aide d'un appareillage, en utilisant un courant électrique sous forme de créneaux bipolaires séparés par des interruptions d'injection (Fig.I.5).

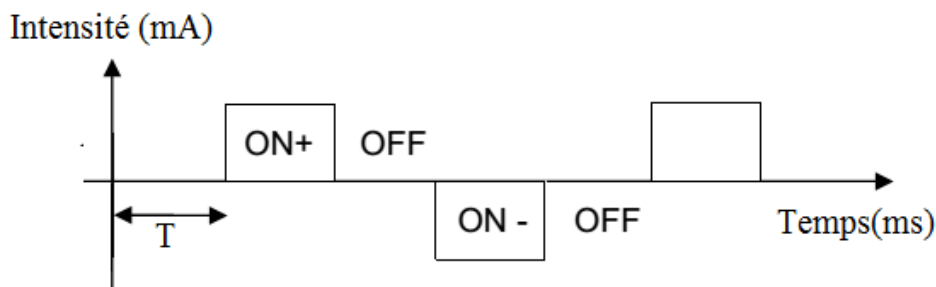


Fig.I.5 Forme du courant.

Si on envoie un courant électrique dans le sous-sol entre deux électrodes A et B et qu'on le coupe brusquement, on constate l'existence d'une différence de potentiel décroissante entre

deux autres électrodes M et N (Fig.I.4). Cette différence de potentiel représente la polarisation provoquée dans le sol par le courant circulant dans A et B. Elle se dissipe rapidement, mais sa disparition complète demande toutefois quelques dizaines de secondes si la durée du courant d'excitation est de plusieurs minutes. Le potentiel résiduel est appelé la polarisation provoquée (PP). Le paramètre physique calculé à travers cette méthode est la *Chargeabilité* (Parasnis 1986). La chargeabilité s'exprime généralement en millivolt par volt (mV/V) ou en milliseconde. On distingue trois mécanismes de polarisation : la polarisation métallique (Polarisation d'électrode), la polarisation de membrane et aussi appelée la polarisation électrolytique et la polarisation électrochimique.

I.4.1.1 La polarisation métallique (Polarisation d'électrode)

La polarisation métallique se crée à la surface des particules métalliques en contact avec une solution ionique (Parasnis 1986; Telford et al. 1990). La conductibilité dans le sous-sol est généralement de type électrolytique, donc les ions de l'électrolyte vont s'accumuler sur la surface de la particule, attirant ou repoussant les électrons dans la particule métallique (Fig.I.6). Cette distribution de charges crée ainsi un contre-courant qui vient s'opposer au courant primaire. Par conséquent, avec l'arrêt du courant les charges accumulées (ions) se dissipent, les ions vont retrouver leur distribution d'équilibre initiale d'une manière lente, créant ainsi un phénomène de relaxation du potentiel électrique, mesurable par la méthode de PP. Ce phénomène est connu par la polarisation d'électrode. Les minéraux ont une bonne conductibilité (Graphite, bornite, galène, pyrite, magnétite et les sulfures métalliques), contribuent à ce phénomène (Parasnis 1986).

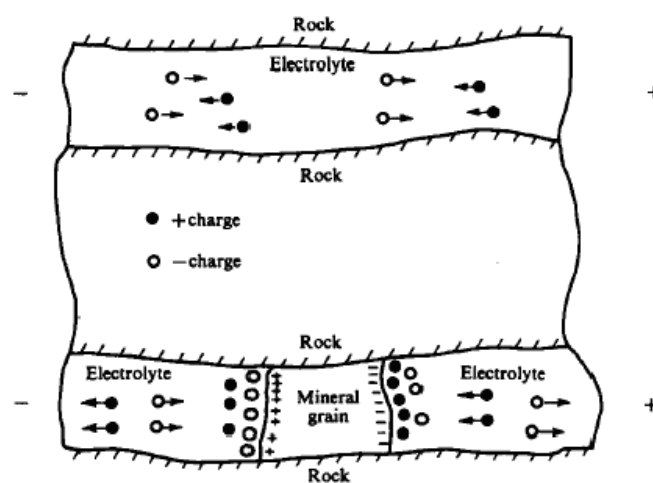


Fig.I.6 Polarisation métallique ou d'électrode (Telford et al. 1990).

I.4.1.2 La polarisation de membrane

Le passage du courant dans les roches ou dans les sols est généralement électrolytique (Parasnis 1986; Telford et al. 1990). Cet effet est surtout présent dans les argiles qui ont une surface chargée négativement (leurs minéraux possèdent une charge électrique négative) (Telford et al. 1990). Les charges positives de l'électrolyte viennent se placer à proximité de la surface du minéral pour compenser sa charge négative (Telford et al. 1990; Reynolds 1997; Naudet 2004). L'effet de membrane aussi augmente avec la salinité des fluides dans les pores (Telford et al. 1990).

Cette importante accumulation de charges positive au voisinage de l'interface minéral/électrolyte est connue sous le nom de phénomène de double couche électrique. Ce phénomène est plus important en présence de particules argileuses, pour lesquelles la taille des pores est extrêmement petite (Naudet 2004; Telford et al. 1990). Lors de l'application d'un champ électrique, les anions et les cations ne vont pas pouvoir se déplacer à la même vitesse car leur mobilité effective est différente. Ce phénomène est surtout présent dans les argiles ou dans les électrolytes à très faible salinité car l'épaisseur du nuage de cations compensateur de la charge de surface du minéral est importante. Lorsque l'injection du courant s'arrête, les charges se redistribuent dans leur état d'équilibre premier, causée par la décroissance graduelle du voltage, produisant ainsi une relaxation du potentiel électrique et donc un signal de polarisation provoquée (Parasnis 1986; Reynolds 1997; Naudet 2004).

I.4.1.3 La polarisation électrochimique

Le phénomène le plus intéressant dans l'étude de sites contaminés concerne la polarisation électrochimique. Cette polarisation est fonction de la chimie de surface et des propriétés texturales des minéraux (Lesmes and Morgan 2001). Sous l'effet d'un champ électrique, les ions de la double couche électrique vont migrer tangentiellement à la surface des grains. La double couche électrique se déforme et les grains se polarisent. A l'arrêt du champ électrique, la double couche électrique se relaxe jusqu'à son équilibre initial. La relaxation dipolaire se manifeste par un retard de phase entre le champ appliqué et la polarisation. La présence de contaminants absorbés à la surface des minéraux va perturber cette relaxation. Ainsi, selon le type de contaminants, la relaxation et donc les signaux PP seront différents.

I.4.2 Principe de la méthode

Le principe de la méthode PP consiste à polariser le sous-sol en y injectant un courant électrique d'intensité I à l'aide d'un couple d'électrodes. Le sol se charge ainsi électriquement

comme un condensateur jusqu'à atteindre un équilibre. Le courant est ensuite coupé de façon instantanée imposant ainsi un déséquilibre électrique. Un faible potentiel résiduel transitoire associé à cet effet capacitif peut alors être mis en évidence lors de la remise à l'équilibre du système. L'injection du courant peut se faire sur une ou plusieurs fréquences. Les mesures de polarisation provoquée se font en domaine temporel ou fréquentiel.

I.4.3 Domaine temporel

Sur le terrain, la PP est essentiellement utilisée dans le domaine temporel avec un temps de polarisation de quelques secondes. Le rapport de l'intégrale de la tension mesurée pendant le temps de relaxation sur la tension initiale donne accès à la chargeabilité du sol (Fig.I.7). Ce paramètre caractérise la capacité du sous-sol à se polariser électriquement.

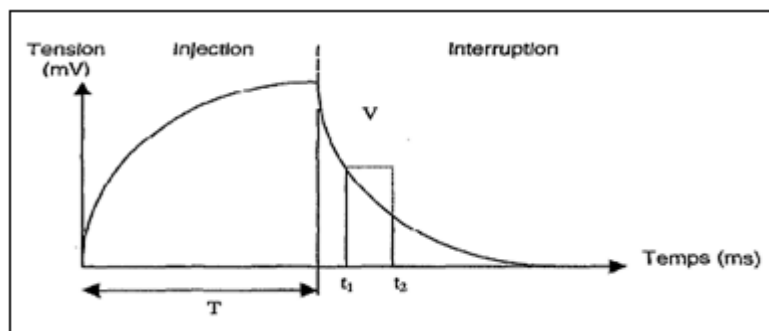


Fig.I.7 Chargeabilité (Parasnis 1986).

Des techniques d'inversion permettent de déterminer la distribution de *chargeabilité* dans le milieu qui explique au mieux les mesures de relaxation ou de déphasage observées sur le terrain. Une forte chargeabilité indique la présence de sulfures ou d'oxydes métalliques ou encore certain type d'argiles comme l'illite ou la montmorillonite, ou la présence de contaminants organiques (Leroux and Dahlin 2002; Chambers et al. 2003). Le temps de polarisation dépend du milieu et des phénomènes étudiés. Plus le temps de polarisation est grand (i.e. aux basses fréquences, en général de l'ordre 0.005 à 0.5 Hz), plus on prend en compte de phénomènes polarisables. Généralement les valeurs usuelles de la durée d'injection sont comprises dans la gamme 1-20s (Parasnis 1986).

I.4.4 Domaine fréquentiel

La polarisation du sous-sol peut se faire dans le domaine fréquentiel, typiquement du MHz à la dizaine de KHz.). En domaine fréquentiel la résistivité apparente du sol est mesurée à deux fréquences F et f , avec $f < F$. Sur le terrain, il est difficile d'utiliser les basses

fréquences car les temps d'acquisition sont extrêmement longs (plusieurs heures). L'étude de la réponse PP des contaminants aux basses fréquences se fait donc essentiellement en laboratoire.

➤ Facteur métal

Ce facteur, qui permet lui aussi de quantifier la polarisation provoquée, est obtenu en divisant l'effet de fréquence par la résistivité apparente à haute fréquence.

➤ Déphasage (ϕ)

Il s'agit de la différence de phase entre le voltage entre C_1 et C_2 et le courant injecté dans le sol. Les valeurs maximales de déphasage (ϕ) sont en général de quelques centièmes ou dixièmes de radians à une fréquence de l'ordre d'environ un hertz. Le déphasage s'exprime en milliradian. L'amplitude du voltage C_1 - C_2 est aussi mesurée et donne la résistivité apparente.

La figure ci-dessous (Fig.I.8) représente les valeurs de polarisation provoquée (en mV/V) de plusieurs minéraux et roches. On note, que l'effet de PP due à la minéralisation de sulfure (l'effet de polarisation d'électrode est dans la gamme de 100 à 200 mV/V) est beaucoup plus grand à celui due aux minéraux argileux (polarisation de membrane). L'effet élevé de PP pour les sulfures métalliques disséminés rend les levés de polarisation provoquée comme outil standard d'exploration de tels minéraux (Loke 2015). Le faible contraste de résistivité pour certains dépôts disséminés rend la détection par des investigations électriques et électromagnétiques difficiles.

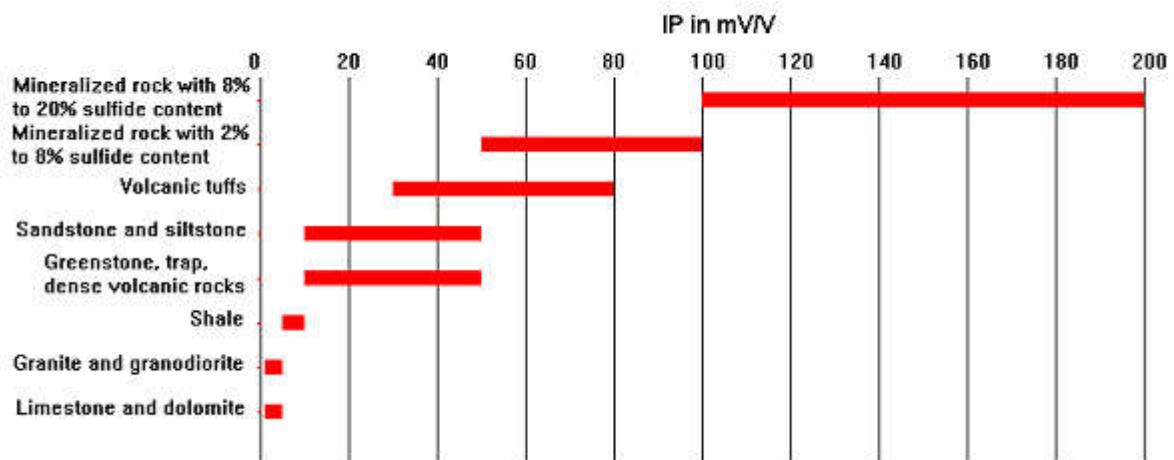


Fig.I.8 Les valeurs de polarisation provoquée pour certaines roches et minéraux (Loke 2015).

I.5 Conclusion

L'objectif principal de ce premier chapitre est de décrire l'historique de la méthode de résistivité électrique et son évolution. Nous avons étudié de façon théorique comment un courant électrique injecté à la surface du sol peut se répartir en profondeur. C'est par la mesure d'une différence de potentiel d'une part et d'une intensité de courant d'autre part que l'on accède à la valeur de la résistivité électrique. Nous avons présenté une synthèse de l'une des méthodes complémentaires qui est la méthode de polarisation provoquée (PP).

Avec le développement continu de la méthode électrique, l'acquisition multi-dimensionnelle à haute résolution permet d'obtenir un modèle plus réaliste de la variation de la résistivité du sous-sol où la répartition de la résistivité varie verticalement et horizontalement le long du profil comparativement au sondage électrique vertical (1D). Donc on parle, de la technique de tomographie électrique, qui sera discutée dans le chapitre suivant.

Chapitre II.

La tomographie électrique

II.1 Introduction

II.2 Présentation de la tomographie électrique

II.3 Les différents dispositifs de mesures

II.4 Applications

II.5 Quelques cas d'Étude

II.6 Conclusion

II.1 Introduction

L'exploration géophysique (*Geophysical exploration*) a évolué au cours des trente dernières années en général et les méthodes géoélectriques en particulier. Celles-ci sont plus diversifiées (sondage électrique vertical, polarisation provoquée, polarisation spontanée et tomographie électrique) que les autres méthodes géophysiques (électromagnétiques, gravimétriques et sismiques, etc.). Cette évolution a compris l'exploration 1D et 2D à l'exploration 3D et 4D. De même, que le développement des logiciels utilisés dans le traitement des données et les travaux de modélisation et l'interprétation des données. Dans ce deuxième chapitre nous présenterons la méthode de tomographie électrique, les dispositifs de mesures utilisés et les travaux antérieurs ont été effectués.

II.2 Présentation de la tomographie électrique

La méthode de tomographie ou imagerie électrique « *Electrical Resistivity Tomography or Electrical Resistivity Imaging* » est une technique géophysique apparue à la fin des années 1980, dérivant des méthodes classiques de résistivité utilisées pour identifier les terrains de subsurface. La tomographie électrique permet d'obtenir des images 2D, 3D et 4D de haute résolution du sous-sol ausculté (Dahlin 2001; Hammoum et al. 2015).

Les développements récents de techniques géophysiques électriques consistant les appareils automatisés afin de contrôler l'acquisition automatiquement (Dahlin 1993) et les différents algorithmes mathématiques d'inversion itératifs (DC2DInvRes, EarthImager 2D, Res2Dinv, Res3Dinv, ZondRes2D, etc.), ont donné un essor considérable à la tomographie électrique (Loke and Barker 1996). Ce progrès a mené cette méthode à se diversifier et se perfectionner. La tomographie électrique permet d'obtenir un modèle de la résistivité du sous-sol, où la répartition de la résistivité varie horizontalement et verticalement le long du profil (2D) et parfois transversalement (3D) (Fig.II.1).

La résistivité électrique du sous-sol dépend de la teneur en eau de la roche, de la salinité de l'eau interstitielle et de la teneur en argile des roches (ex, les sédiments) (Zohdy et al. 1974; Loke 2011). Le principe de la méthode repose essentiellement sur la mesure de différences de potentiel électrique associées au passage du courant électrique (Fig.I.2). L'objectif de la méthode est la caractérisation des propriétés électriques invariables du sol. La loi d'Ohm permet de calculer la résistivité électrique dite « apparente ». Cette valeur résulte de la contribution de toutes les portions du milieu qui sont traversées par le courant émis en

surface. Ainsi, la mesure représente une valeur qui intègre les résistivités sur un certain volume du sous-sol (3D).

La technique d'acquisition consiste à réaliser des profils en augmentant l'espacement entre les électrodes. L'espacement inter-électrodes définit le volume de sol exploré. Les mesures de terrain permettent ainsi d'obtenir une pseudo-section de la résistivité apparente du sous-sol (Edwards 1977).

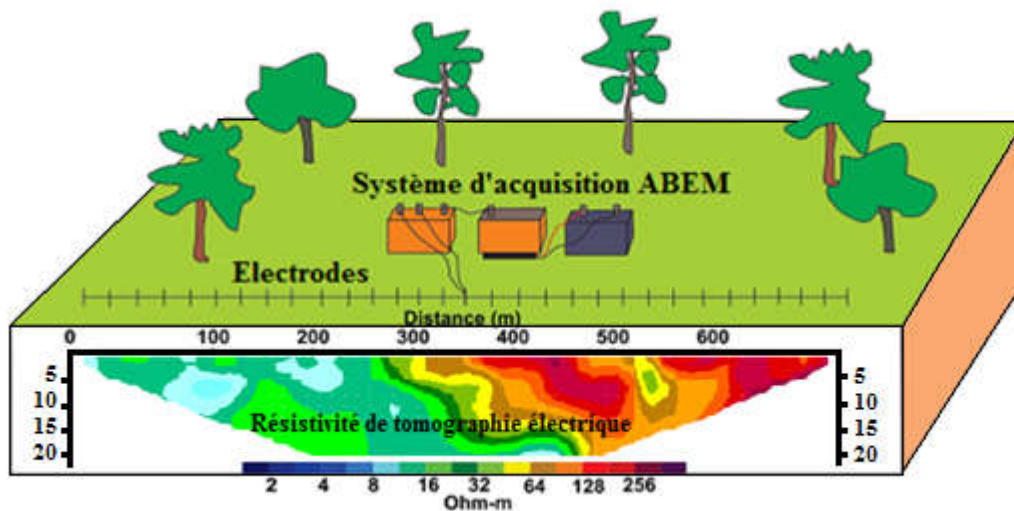


Fig.II.1 Dispositif de mesure de tomographie électrique. L'image obtenue après l'inversion correspond à une tomographie électrique 2D (D'après Aning 2012, modifié).

II.2.1 La tomographie électrique 2D

Cette méthode dite non-destructive et non-invasive est apparue au cours des années 1980. Elle combine à la fois les avantages de deux méthodes, le sondage électrique vertical et le profilage (Edwards 1977). Avec la méthode SEV, nous obtenons la variation verticale de la résistivité en 1D et avec le profilage, nous étudions les variations latérales (Fig.II.2). Cela, permet d'obtenir une image de la résistivité du sous-sol, en particulier dans les régions à géologie complexe (Griffiths and Barker 1993; Dahlin 1996; Loke and Barker 1996; Aizebeokhai 2010) caractérisée par des variations latérales qui rendent l'utilisation des SEV inadéquate (Loke 2011). Son développement a été possible grâce aux progrès réalisés en termes de traitement informatique (algorithmes d'inversion rapides) et de matériel d'acquisition. En pratique, l'opération d'acquisition se réalise grâce à une série d'électrode métallique que l'on plante dans le sol entre 10 et 20 cm, avec un espacement régulièrement constant entre elles le long d'un profil. L'ensemble des électrodes est ensuite connecté à l'appareil de mesure (résistivimètre) qui va réaliser des mesures pour différents dispositifs selon un protocole de mesure préétabli (Edwards 1977; Penz 2012). La technique de tomographie électrique consiste à faire varier la position et l'espacement d'un grand nombre

de quadripôles afin d'obtenir des valeurs de résistivités apparentes correspondant à différentes positions et profondeurs. Les données recueillies peuvent être présentées sous forme des panneaux de résistivité apparente ou de pseudo-sections (Hallos 1957) (Fig.II.3), sur lesquels les mesures sont reportées au milieu du dispositif d'acquisition. Cette méthode suppose les variations de la résistivité électrique non seulement verticales mais également latérales d'un milieu. Les acquisitions se font généralement perpendiculairement à la dimension ne présentant pas de variation. Typiquement un levé de résistivité électrique 1D peut impliquer environ 10–20 lectures, tandis que une tomographie électrique 2D impliquer environ 100 – 1000 mesures ou plus (Loke 2011). On peut également effectuer une tomographie électrique en forage (*Cross-hole resistivity tomography*) (Park et al. 2014).

Pour obtenir une image de résistivité électrique 2D du sous-sol, il est nécessaire que la couverture des mesures soit également 2D et uniforme. Prenons comme exemple le dispositif Wenner avec 19 électrodes (le dispositif Wenner sera discuté dans la section II.3.1). Dans ce dispositif (Fig.II.2), la distance entre deux électrodes est notée a , la première mesure du fichier d'acquisition va se faire à l'aide des électrodes 1, 2, 3 et 4; les électrodes 1 et 4 serviront à l'injection du courant (conventionnellement nommées **A** et **B**), et les électrodes 2 et 3 à la mesure du potentiel (nommées **M** et **N**). Le point de mesure est reporté à l'aplomb du centre de dispositif. Tout le dispositif va ensuite se déplacer d'une distance a (Marescot 2008; Loke 2011; Nouioua et al. 2013).

Les électrodes 2 et 5 serviront alors à l'injection du courant et les électrodes 3 et 4 pour la mesure du potentiel. L'opération se répète sur toute la ligne d'électrodes jusqu'aux électrodes 17, 18 et 19. Le calcul de la résistivité apparente se fait automatiquement dans la boîte de commutation. On a donc pour le premier niveau d'acquisition 16 possibilités, c'est-à-dire $(19-3*a)$. Comme la caractéristique du dispositif Wenner est de garder une distance constante entre toutes les électrodes, on va donc, pour le niveau suivant, prendre un écartement inter-électrodes égal à $2*a$ (Fig.II.2). La première mesure du 2^{ème} niveau impliquera donc les électrodes 1 et 7 pour l'injection du courant et 3 et 5 pour la mesure du potentiel. L'opération se répète à nouveau jusqu'à l'électrode 19. On a donc pour le deuxième niveau d'acquisition 13 possibilités, c'est-à-dire $(19-3*2*a)$ et 10 possibilités pour le troisième niveau d'acquisition $(19-3*3*a)$. La profondeur d'investigation est réglée en faisant varier la distance entre les électrodes (Marescot 2008).

On effectue les mesures de chaque niveau d'acquisition avec $4*a$, $5*a$, etc...(Il y a 6 pour 19 électrodes pour Wenner (Fig.II.2) et 8 pour Wenner-Schlumberger). En effet, plus la distance

inter-électrode augmente, plus le nombre de possibilités diminue (Loke 2011). Le nombre de mesure dépend du type de dispositif utilisé (Marescot 2008; Loke 2011).

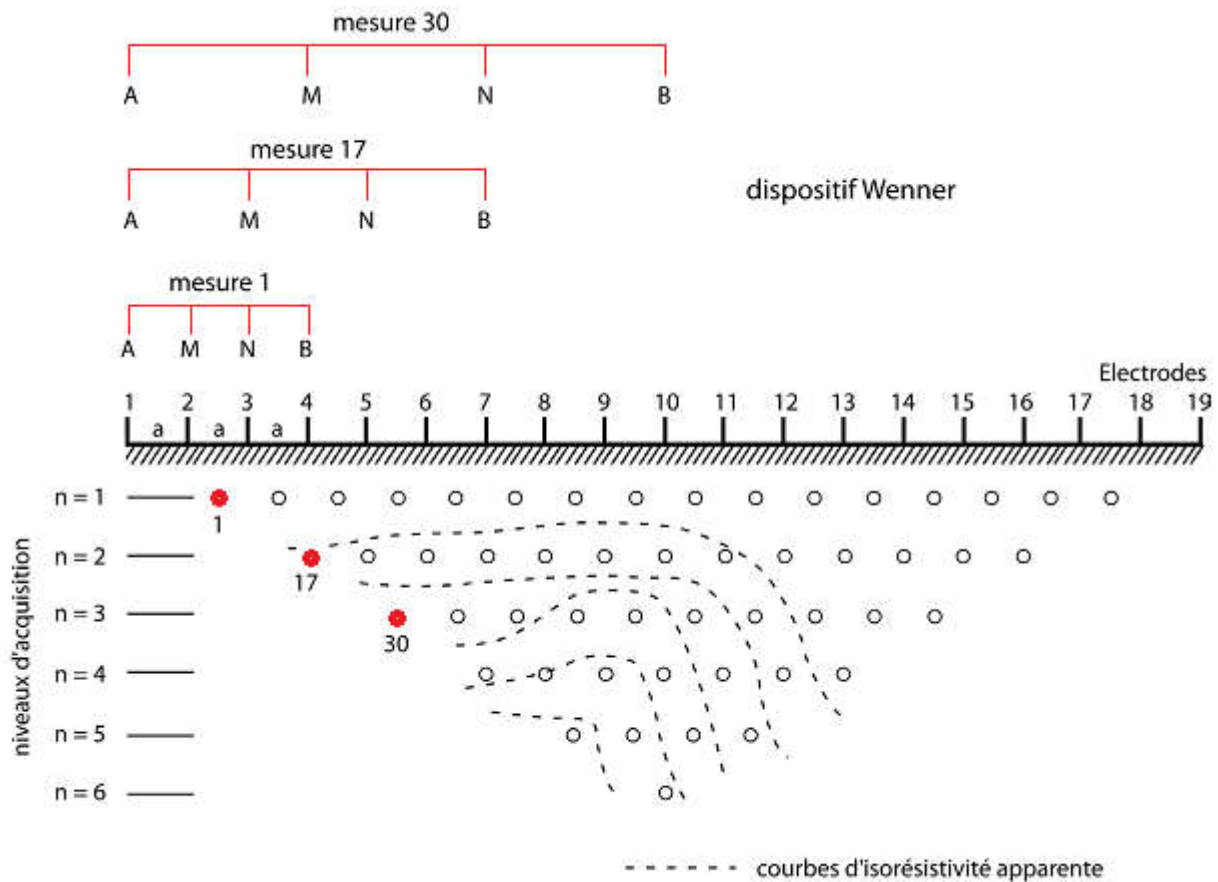


Fig.II.2 Arrangement des électrodes pour une acquisition 2D et séquence de mesure pour le dispositif Wenner (D'après Marescot 2004, modifié).

II.2.1.1 Pseudo-section

Les points de mesure sont habituellement représentés en 2D sous la forme de pseudo-section (coupe électrique du sous-sol) (Hallov 1957). La première étape dans l'interprétation des données en tomographie électrique consiste à construire une pseudo-section (Fig.II.3). La pseudo-section est une carte de résultat qui présente les valeurs des résistivités apparentes calculées à partir de la différence de potentiel mesurée aux bornes de deux électrodes de mesure ainsi que de la valeur du courant injecté entre les deux électrodes d'injection. C'est une représentation géophysique simple des données (Morison et al. 2004). La couleur d'un point sur la pseudo-section représente donc la valeur de la résistivité apparente en ce point. On représente ainsi l'ensemble des valeurs mesurées aux bornes de chaque quadripôle par des points. La profondeur de ces points augmente avec l'écartement entre les électrodes de mesure et leur position indique le quadripôle de mesure le long du profil. La représentation

conventionnelle de pseudo-section est placée à chaque valeur mesurée dans l'intersection de deux lignes de 45° à travers les centres du dipôle (Edwards 1977).

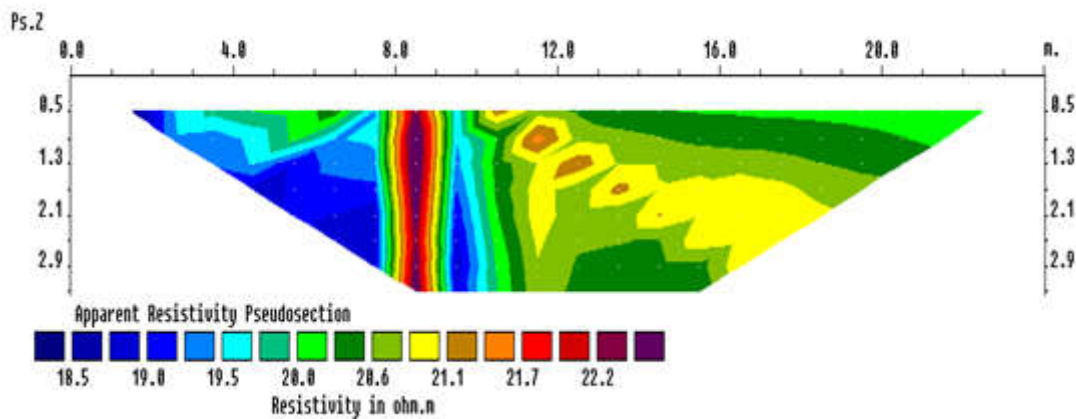


Fig.II.3 Carte de pseudo-section (Exemple d'un dyke vertical).

II.2.2 La tomographie électrique 3D

Étant donné que la majorité des structures géologiques étudiées en tomographie électrique présente des variations de leurs résistivités et de leurs géométries en trois dimensions (3D). La tomographie électrique en 2D ne semble pas idéale pour obtenir une couverture complète de la zone à traiter (Loke 2011). Cela nécessite le développement d'outils de modélisation et d'inversion 3D adaptés. En effet, l'application de séries d'inversions 2D par exemple, s'avère peu adaptée et occasionne la présence d'artéfacts après inversion du fait de la mauvaise prise en compte du domaine (Penz 2012).

L'inversion dans un domaine 3D présente un grand nombre de degrés de liberté, il est donc nécessaire d'acquérir un nombre important de données afin de mieux contraindre le problème inverse et obtenir des modèles plus réalistes (Loke 2011; Penz 2012). L'avantage de la tomographie électrique en 3D est de restituer la géométrie des objets géologiques complexes (Dahlin 1996). Dans la pratique, les électrodes sont disposées régulièrement et espacées selon une grille à maille carrée ou rectangulaire. Les mesures de la résistivité électrique sont régulièrement réalisées selon les deux axes X et Y, ainsi que dans la direction à 45° de sorte à couvrir efficacement le volume à reconnaître (discrétisation de sub-surface en blocs). Cette mesure correspond au *cross-diagonal survey* définie par (Loke 2002, 2011). Le regroupement des panneaux électriques 2D indépendants fournissant ainsi une information qui s'appelle le *quasi 3D* (Loke 2011). Les données sont ensuite acquises selon un protocole préétabli comme en 2D. Les résultats sont présentés sous la forme d'un bloc 3D, ou bien des tranches horizontales (*Depth slices*). Les dispositifs les plus utilisés en imagerie électrique 3D sont : Pôle-pôle, Pôle-dipôle et Dipôle-dipôle.

II.2.3 La tomographie électrique 4D (Suivi temporel)

La tomographie électrique de suivi temporel (En anglais, *time lapse*) n'est plus à la différence des méthodes mentionnées ci-dessus (2D et 3D), de s'intéresser directement à la résistivité électrique mais à son changement associé au cours du temps. Cette approche de suivi est particulièrement bien adaptée au suivi de fluides (surveillance d'infiltration d'eau, l'intrusion de l'eau salée, les fuites dans les barrages) ou polluants chimiques induisant de forts contrastes de résistivité (Shokri et al. 2016), et au changement de la nappe phréatique lors l'extraction de l'eau (Barker and Moore 1998). Ainsi, la surveillance de comblement de cavités souterraines (Farooq et al. 2014). Cela, nécessite de réaliser la même acquisition 2D ou 3D à des instants différents (laps de temps) puis à comparer leurs résultats d'inversions. Les inversions peuvent être soit réalisées séparément soit ensemble afin de limiter les artéfacts liés aux différences de données propres aux acquisitions (Penz 2012). La figure ci-dessous (Fig.II.4) présente les trois différents modèles géoélectriques utilisés pour l'interprétation des mesures de résistivité.

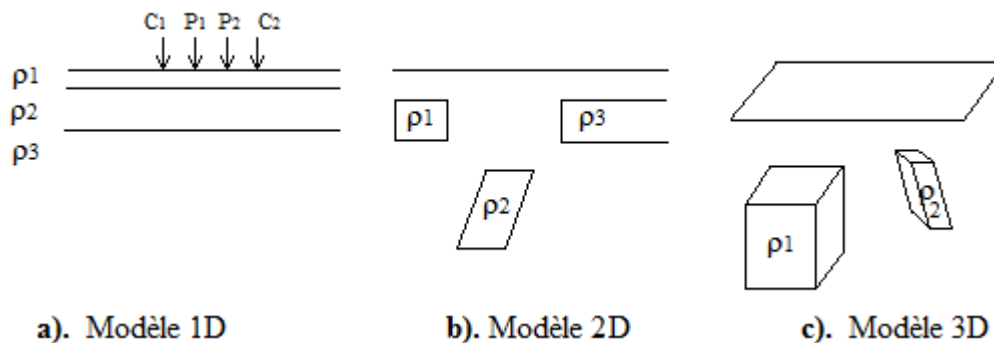


Fig.II.4 Les trois différents modèles géoélectriques utilisés pour l'interprétation des mesures de résistivité. **a)** modèle 1D, **b)** modèle 2D et **c)** modèle 3D (D'après Loke 2015, modifié).

II.3 Les différents dispositifs de mesures

La configuration géométrique des électrodes est appelée dispositif. Chaque configuration d'électrode mesure la sensibilité, c'est-à-dire, de mesurer la distribution des résistivités dans le sous-sol. Dans la littérature, il existe une gamme de dispositifs ou montages (Aizebeokhai 2010) qui se différencient par l'écartement des électrodes et par la position respective des électrodes d'injection et de mesure, adaptés pour le sondage électrique vertical (SEV), le trainé et l'imagerie électrique.

Les dispositifs les plus couramment utilisés en tomographie électrique comprennent : Wenner, Wenner-Schlumberger, Dipôle-dipôle, Pôle-pôle, Pôle-dipôle et Gradient (Aizebeokhai 2010;

Loke 2015). Ces dispositifs sont basés sur l'arrangement et/ou la séparation des électrodes de courant et de potentiel. Il existe d'autres dispositifs de mesures mais ils sont en général moins répandus. La disposition des électrodes dans la tomographie électrique 2D est rectiligne. Chaque dispositif possède ses propres caractéristiques (Dahlin and Zhou 2004; Bayrak and Şenel 2012), telle que la résolution horizontale et verticale, le nombre de points à l'acquisition, la profondeur d'investigation et la sensibilité de mesure. Le choix de l'un ou de l'autre va dépendre de quelques facteurs importants comme : la géologie, la profondeur d'investigation suffisante, la résolution verticale et horizontale désirée et la faisabilité de terrain (Loke 2011, 2015).

Le type de dispositif peut aussi influencer l'image de résistivité finale (Seaton and Burbey 2002), car chaque dispositif présente une différente sensibilité au bruit et une différente qualité de résolution (Nguyen et al. 2005). La disposition des électrodes permet de déterminer la résistivité électrique du sous-sol à travers les électrodes d'injection de courant et les électrodes de mesure de potentiel. La figure ci-dessous (Fig.II.5) illustre les différentes combinaisons d'électrodes possibles utilisées en tomographie électrique. Pour les dispositifs Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle, pôle-dipôle et gradient, l'opération d'acquisition est légèrement différente.

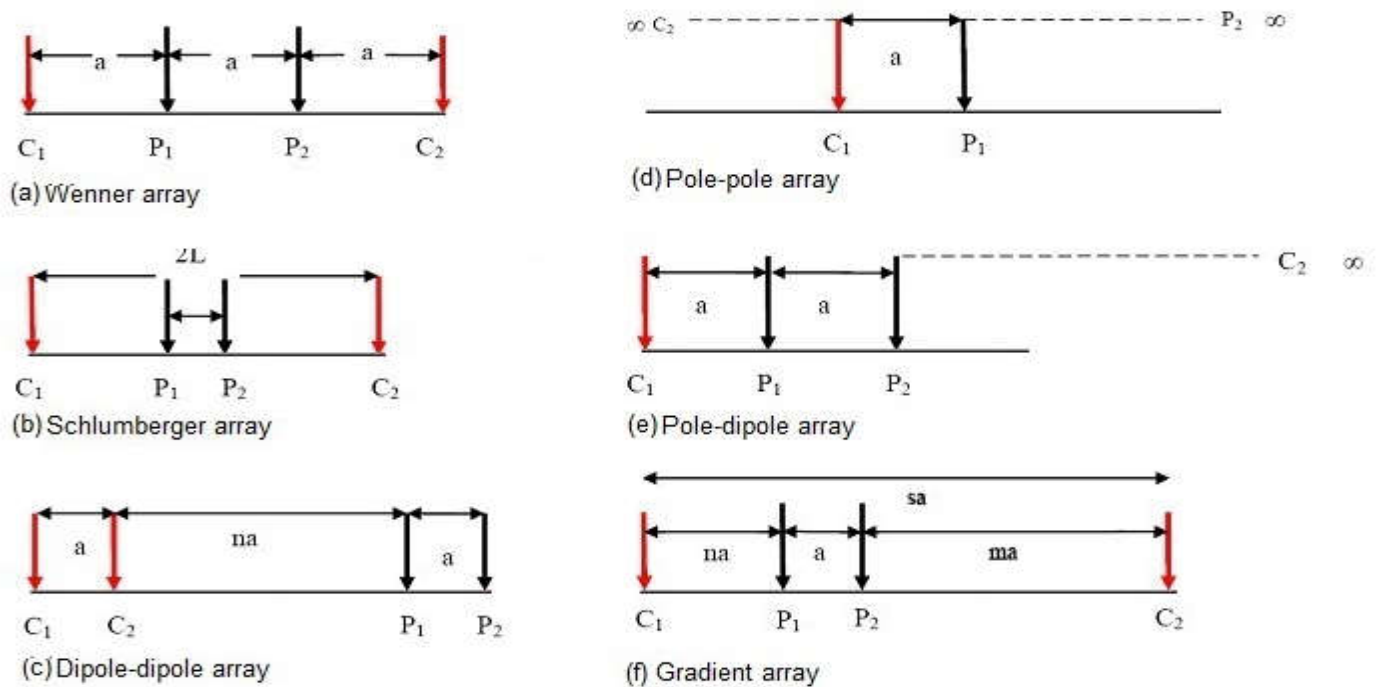


Fig.II.5 Arrangement des électrodes pour différents dispositifs (D'après Aizebeokhai 2010, modifié).

II.3.1 Le dispositif Wenner

Le dispositif Wenner est le plus largement utilisé en tomographie électrique, l'espacement inter-électrodes pour ce dispositif est constant sur toute la longueur du panneau électrique. Ce dispositif possède une bonne résolution verticale, il est recommandé pour détecter les structures horizontales telles que les milieux sédimentaires (Dahlin and Zhou 2004), mais il est déconseillé pour la détection des structures verticales (mauvaise résolution horizontale).

Le dispositif Wenner a une profondeur d'investigation égale à la moitié du plus grand écartement entre les électrodes. Cependant, le Wenner a une faible densité de points (couverture) par rapport à celui du Dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger. Le facteur géométrique (k) de Wenner est de loin le plus petit par rapport aux autres dispositifs. L'équidistance entre les électrodes permet un bon rapport signal/bruit. Wenner est préféré pour les investigations dont les sites sont bruités (Dahlin and Zhou 2004), et moins sensible aux structures 3D (Dahlin and Loke 1997). On distingue trois différents types de configurations colinéaires possibles pour ce dispositif : Wenner Alpha (WA), Wenner Bêta (WB) et Wenner Gamma (WG).

Le Wenner Alpha (WA) (Fig.II.6a) est relativement sensible aux changements verticaux qu'horizontaux de la résistivité sous la surface au-dessous du centre de dispositif. Cependant, il est moins sensible aux changements horizontaux de la résistivité sous la surface (Loke 2011). On voit sur la figure (Fig.II.6a), que les contours des valeurs de sensibilité sont quasiment horizontaux à l'aplomb du centre du dispositif. La force du signal est inversement proportionnelle au facteur géométrique utilisé pour calculer la valeur de résistivité apparente (Ebraheem et al. 2014). Par ailleurs, le Wenner Alpha possède une force du signal la plus forte. Le dispositif Wenner Bêta (Fig.II.6b) est en fait un cas particulier du dispositif Dipôle-dipôle où les espacements entre les électrodes sont identiques. Ainsi, ce dispositif sera discuté dans la section suivante dans la configuration Dipôle-dipôle. La configuration Wenner Gamma a une disposition relativement inhabituelle où les électrodes du courant et du potentiel sont intercalées. La section de sensibilité montre que les régions les plus profondes projetées par ce dispositif sont au-dessous des deux électrodes externes C_1 et P_2 (Fig.II.6c), et pas au-dessous de centre du dispositif.

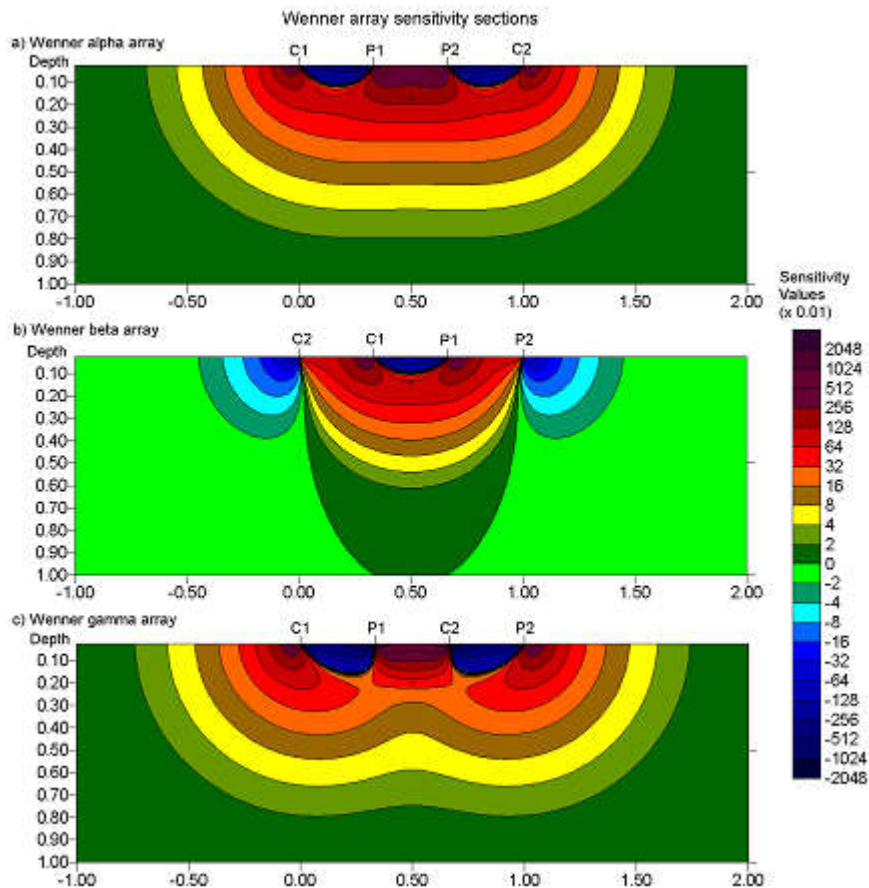


Fig.II.6 Les sections de sensibilité pour le dispositif Wenner. Les sections de sensibilité pour a) Wenner-Alpha, b) Wenner-Bêta et c) Wenner-Gamma (Loke 2011).

II.3.2 Le dispositif Wenner-Schlumberger

Ce dispositif est un hybride entre le Wenner et le Schlumberger (Pazdirek and Blaha 1996), (Fig.II.7). C'est une combinaison des dispositifs Wenner et Schlumberger, pour une disposition linéaire, et avec un espacement constant (utilisé dans la tomographie électrique 2D). Lors la mesure, il est moins sensible aux variations verticales et horizontales, le nombre de points d'acquisition est plus grand que pour le Wenner, mais inférieur à celui du Dipôle-dipôle. Ce qui implique un bon compromis entre ces derniers dispositifs. Il est recommandé à la fois pour la recherche des structures verticales et horizontales. La profondeur d'investigation de ce dispositif est, d'un point de vue plus grande d'environ 10 % qu'avec le Wenner.

La force de signal est approximativement inversement proportionnelle pour une valeur quadratique de n . Le facteur n pour W-S est le rapport de distance entre les électrodes (C_1-P_1 ou P_2-C_2) et les électrodes de potentiel (P_1-P_2). On note que le Wenner est un cas spécial dans

ce dispositif quand le facteur n est égal à 1. La force de signal est inférieure au Wenner, mais elle est supérieure au Dipôle-dipôle (Marescot 2004, 2008). Ce dispositif est très utilisé en hydrogéologie dans les milieux complexes (Dahlin and Zhou 2004). Le modèle de sensibilité de la configuration Wenner-Schlumberger montre que le facteur n a augmenté de 1 (configuration de Wenner) jusqu'à 6 (configuration classique de Schlumberger). Le contour de la sensibilité positive la plus élevée est au-dessous du centre du dispositif, qui devient bien concentré sous les électrodes de centre (P_1 - P_2) pendant l'accroissement du facteur n . Avec un facteur de séparation égal à 6, la sensibilité positive élevée sous les électrodes (P_1 - P_2), devient plus séparée à partir des valeurs élevées positives de sensibilité proches aux électrodes C_1 et C_2 . Cela signifie que ce dispositif est modéré à deux structures horizontales pour un facteur n faible et verticales pour un facteur n élevé (Loke 2011).

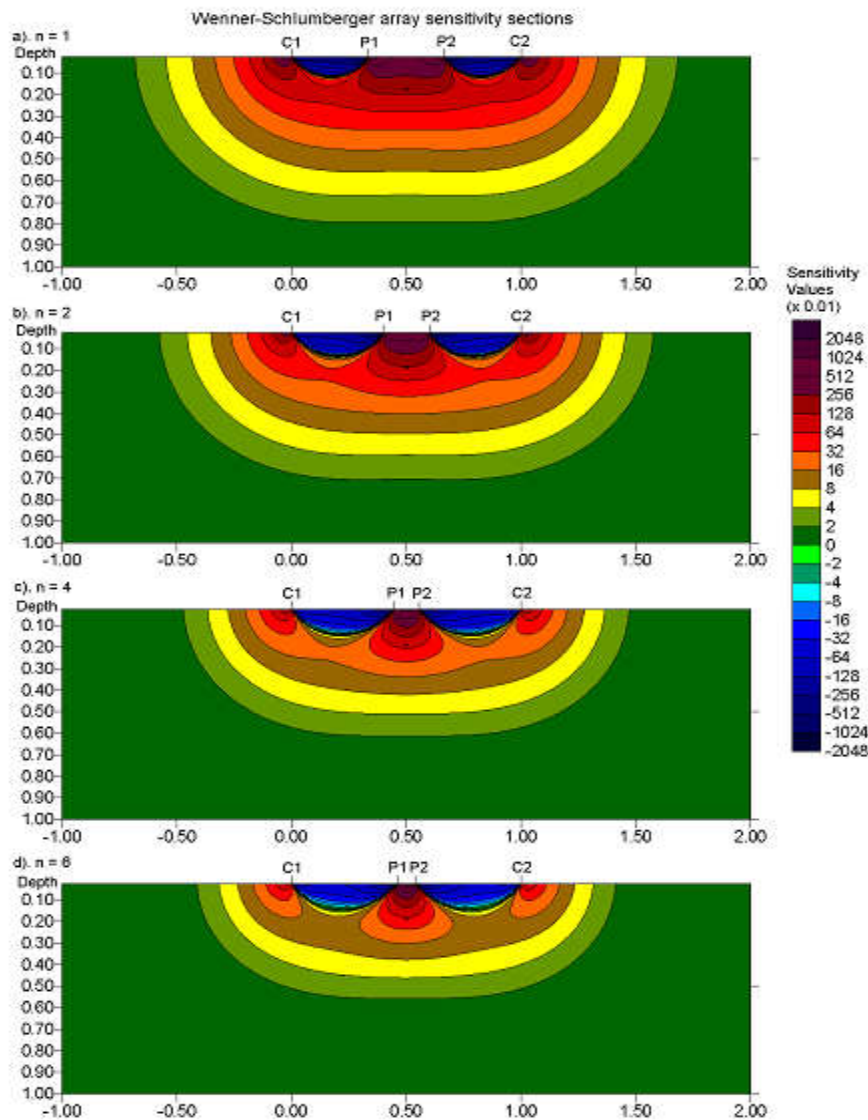


Fig.II.7 Les sections de sensibilité 2D pour le dispositif Wenner-Schlumberger avec a) $n = 1$, b) $n = 2$, c) $n = 4$ et d) $n = 6$ (Loke 2011).

La force du signal de ce dispositif est approximativement inversement proportionnelle au carré de la valeur n . La force du signal pour le Wenner-Schlumberger est plus faible que celle de Wenner, mais la force est plus haute que le Dipôle-dipôle et plus deux fois celui du Pôle-pôle (Loke 2011).

La figure suivante (Fig.II.8) représente la répartition des points de données en pseudo-section pour les dispositifs Wenner et Wenner-Schlumberger. On remarque que le W-S possède une couverture horizontale légèrement meilleure à celui que Wenner. Pour le dispositif Wenner chaque niveau d'acquisition des données plus profond perd trois points de données moins que le niveau d'acquisition précédent, alors pour le dispositif Wenner-Schlumberger, il y a une perte de deux points de données avec chaque niveau d'acquisition plus profond. La couverture horizontale des données pour W-S est légèrement large que le dispositif Wenner, mais elle est plus étroite que celle obtenue avec dispositif Dipôle-dipôle.

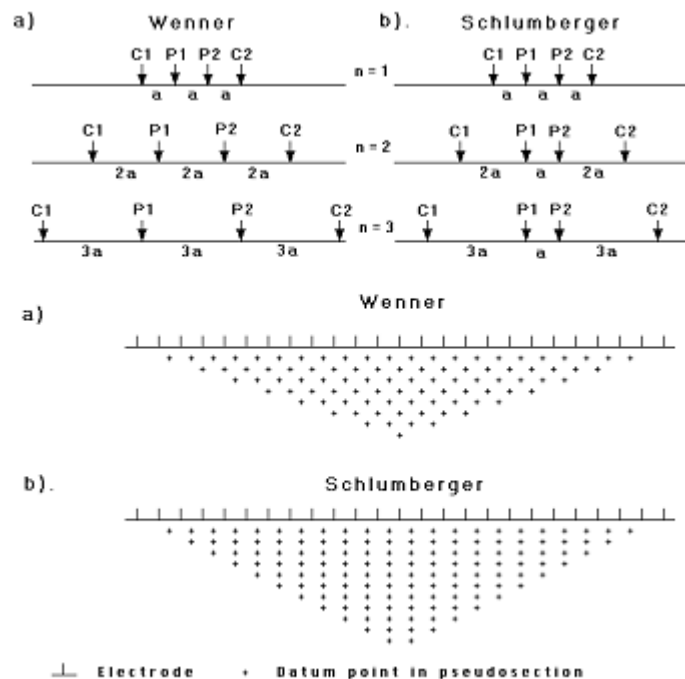


Fig.II.8 Comparaison entre les dispositifs Wenner et Wenner-Schlumberger, ainsi que les modèles de pseudo-sections (Loke 2011).

II.3.3 Le dispositif Dipôle-dipôle

Ce dispositif est largement utilisé en résistivité et en polarisation provoquée (PP), car il permet d'obtenir un très faible couplage électromagnétique (EM), entre les circuits de courant et de potentiel. Les deux dipôles sont séparés l'un de l'autre par une distance na (Fig.II.5c). L'espacement entre les électrodes de courant C_1-C_2 est donné par a , qui est identique comme la distance entre les autres électrodes de potentiel P_1-P_2 . Le facteur n c'est le rapport de distance entre les électrodes C_1-P_1 et les électrodes (C_2-C_1 ou P_1-P_2), ayant la longueur a . Le dispositif Dipôle-dipôle est très sensible aux variations horizontales de la résistivité, donc il est recommandé surtout pour détecter des structures verticales (milieux fracturés) et les structures en 3D (Dahlin and Loke 1997; Dahlin and Zhou 2004). En général, la profondeur d'investigation est légèrement inférieure au Wenner, prenons un exemple pour $n = 1$, la profondeur d'investigation est égale $0.416 \cdot a$ par rapport au Wenner est égale $0.512 \cdot a$.

Il dépend aussi des paramètres n et a , ce dispositif a une couverture d'acquisition plus grand que ces derniers dispositifs, en général le Dipôle-dipôle a une profondeur d'investigation presque égale à celle de Wenner lorsque la valeur de n est faible, c'est-à-dire, pour une valeur de $n = 1$, la profondeur d'investigation = $0.416 \cdot a$ par contre Wenner (α) = $0.512 \cdot a$, tandis que pour $n = 6$ la profondeur de l'enquête est 1,730 m. Le Dipôle-dipôle est fortement affecté par les inhomogénéités superficielles et les inhomogénéités latérales que les autres dispositifs. L'inconvénient majeur de ce dispositif a une faible force de signal, avec l'augmentation de distance entre les électrodes (Aizebeokhai 2010). En effet le voltage est inversement proportionnel au cube de facteur n , l'utilisation de ce dispositif nécessite une bonne condition d'acquisition, c'est-à-dire, des appareils sensibles et un bon couplage des électrodes avec le sol.

La section de sensibilité de ce dispositif pour des valeurs de (n) varie entre 1 et 6 (Fig.II.9). Les plus grandes valeurs de sensibilité sont généralement localisées entre les électrodes (C_2-C_1) et (P_1-P_2). Ce dispositif est très sensible au changement de résistivité au-dessous des électrodes paires. Comme le facteur n augmente, les valeurs élevées de sensibilité deviennent de plus en plus concentrées sous les dipôles (C_2-C_1) et (P_1-P_2), tandis que les valeurs de sensibilité sous le centre de dispositif sont diminuées. En outre, le modèle de sensibilité devient presque vertical. Par conséquent, il est très sensible aux changements horizontaux de la résistivité mais il est aussi relativement sensible aux changements verticaux. Ainsi c'est un bon dispositif pour détecter les structures verticales et est très faible pour détecter les structures horizontales (Loke 2001; Dahlin and Zhou 2004).

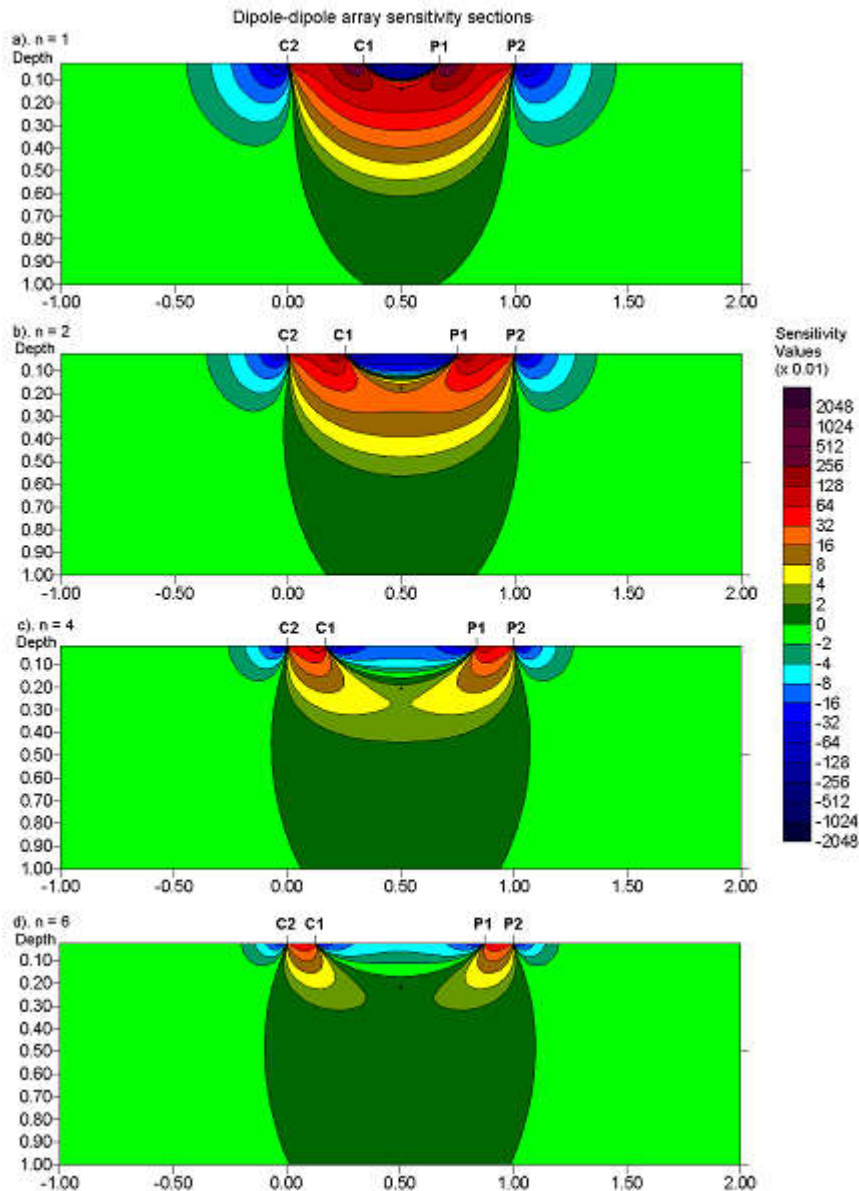


Fig.II.9 Les sections de sensibilité 2D pour le dispositif Dipôle-dipôle avec a) $n=1$, b) $n= 2$, c) $n=4$ et d) $n=6$ (Loke 2011).

II.3.4 Le dispositif Pôle-pôle

Ce dispositif n'est pas couramment utilisé par rapport aux Wenner, Dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger en mode de tomographie électrique 2D. Il est fréquemment utilisé en tomographie 3D (Li and Oldenburg 1992). Ce dispositif possède la plus grande couverture horizontale, ainsi une profondeur d'investigation la plus grande (Loke 2000, 2015), mais il a une faible résolution (Dahlin and Loke 1997), le Pôle-pôle nécessite de mettre deux électrodes théoriquement à l'infini, il est aussi sensible au bruit et au courant tellurique. L'inconvénient du dispositif Pôle-pôle est la grande distance entre P_1 et P_2 , qui peut dégrader la qualité des

mesures, mais il est très utilisé dans l'archéologie. Ainsi ce dispositif est principalement utilisé dans les enquêtes où les espacements relativement petits entre les électrodes (moins que quelques mètres) sont utilisés (Li and Oldenburg 1992).

Cette configuration possède une couverture horizontale la plus grande et aussi la plus profondeur d'investigation. Cependant, elle a la résolution la plus faible, qui est reflétée par l'espacement comparativement grand entre les contours de la fonction de sensibilité (Fig. II.10).

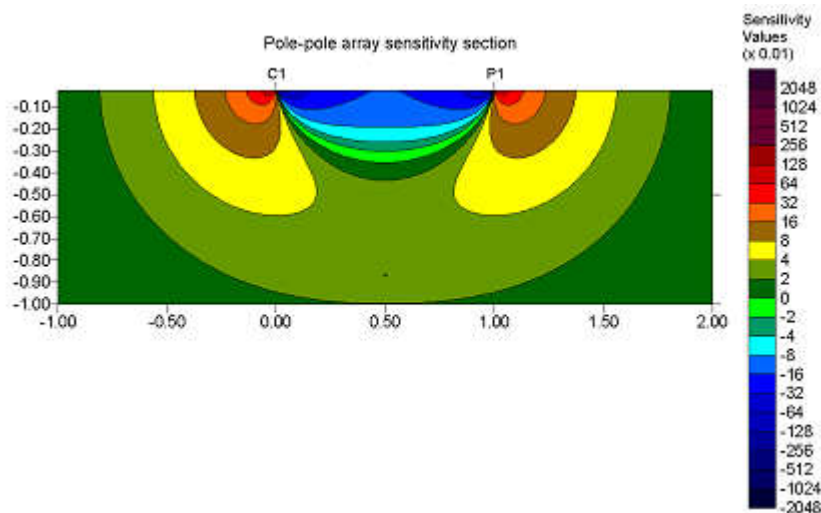


Fig.II.10 La section de sensibilité 2D pour le dispositif Pôle-pôle (Loke 2011).

II.3.5 Le dispositif Pôle-dipôle

Le dispositif Pôle-dipôle est un dispositif asymétrique (Fig.II.5e), une structure symétrique apparaîtra donc sous la forme d'une anomalie de résistivité apparente asymétrique sur la pseudosection, pouvant créer des artefacts, donc pour éliminer l'effet de l'asymétrie les mesures sont effectuées avec une manière inverse des électrodes. La profondeur d'investigation est intermédiaire entre le Dipôle-dipôle et le Pôle-pôle. Le Pôle-dipôle a relativement une bonne couverture horizontale, donc il est adapté pour la détection des structures verticales en 3D (Dahlin and Zhou 2004), la force de signal plus grande que le Dipôle-dipôle, et moins sensible au bruit tellurique par rapport au Pôle-pôle, contrairement aux autres dispositifs, il nécessite de mettre une électrode à l'infini.

La section de sensibilité (Fig.II.11) montre qu'une zone de grande sensibilité se trouve sous le dipôle P_1 - P_2 , en particulier pour les grands facteurs n . Pour les valeurs n de 4 et plus, un contour positif sensible au-dessous du dipôle P_1 - P_2 devient de plus en plus vertical. Ainsi,

comme le dispositif Dipôle-dipôle, ce dispositif est probablement plus sensible aux structures verticales. En remarque également la zone qui contient des valeurs de sensibilité négatives entre les électrodes P_1 , C_1 , ainsi que la zone très petite comporte des valeurs positives élevées à gauche de l'électrode C_1 . La force de signal est plus faible comparativement à un Wenner ou un Wenner Schlumberger mais plus forte que pour un Dipôle-dipôle.

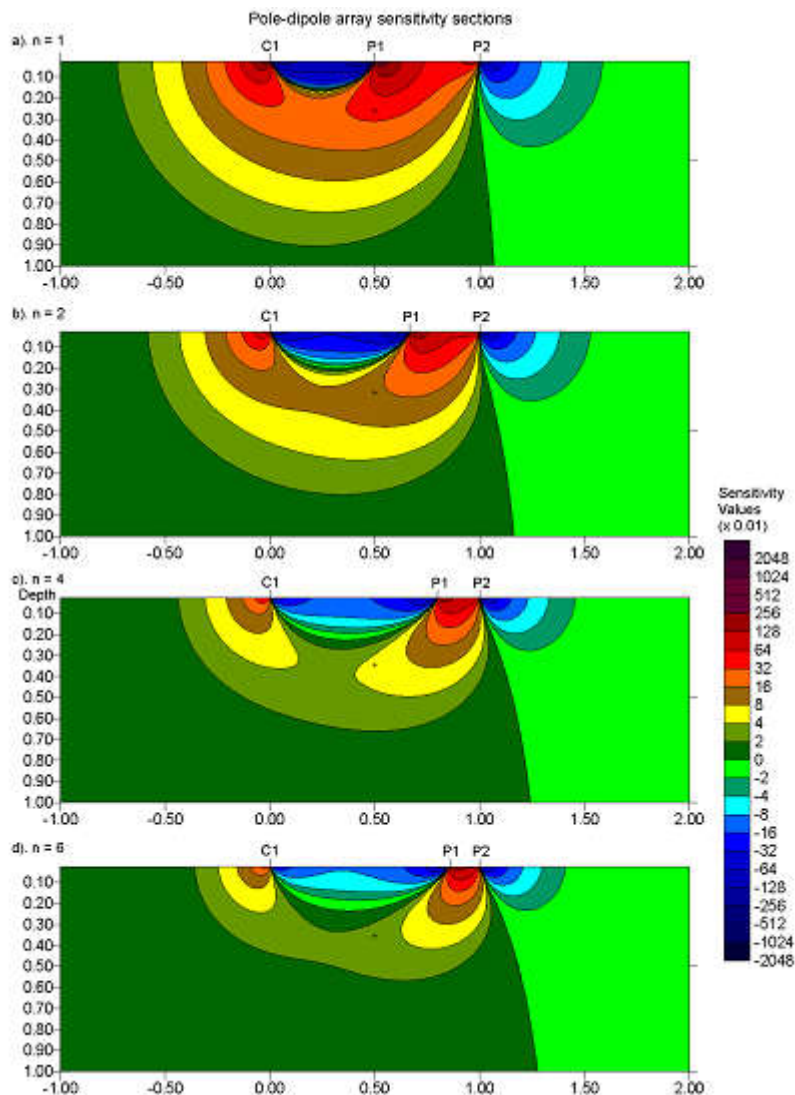


Fig.II.11 Les sections de sensibilité 2D pour le dispositif Pôle-dipôle a) $n=1$, b) $n=2$, c) $n=4$ et d) $n=6$ (Loke 2011).

La figure suivante (Fig.II.12) représente les modèles de distribution des points de données de résistivité pour les configurations Wenner, Wenner-Schlumberger et Dipôle-dipôle. Le W-S possède une couverture horizontale supérieure que Wenner, mais moins que Dipôle-dipôle, chaque niveau d'acquisition pour le dispositif Wenner perd trois points de données, le W-S perd deux points de données. Cependant, le Dipôle-dipôle perd un seul point de donné, la

couverture horizontale de W-S est légèrement large que le Wenner mais elle est étroite que le Dipôle-dipôle (Loke 2011). On mentionne que le comportement de Wenner est réciproque comme le W-S, vis-à-vis de la couverture horizontale. Cependant, contrairement au Dipôle-dipôle, le Wenner est moins sensible au bruit de contamination due à sa forte force de signal, le W-S a une légère réduction de l'intensité de signal et peut donner une résolution d'imagerie améliorée comparativement au Wenner (Dahlin and Zhou 2004). Le dispositif Wenner-Schlumberger est très utile pour le sondage électrique vertical (SEV), car il est moins sensible aux inhomogénéités latérales, ainsi les mesures sont mieux représentatives en profondeur.

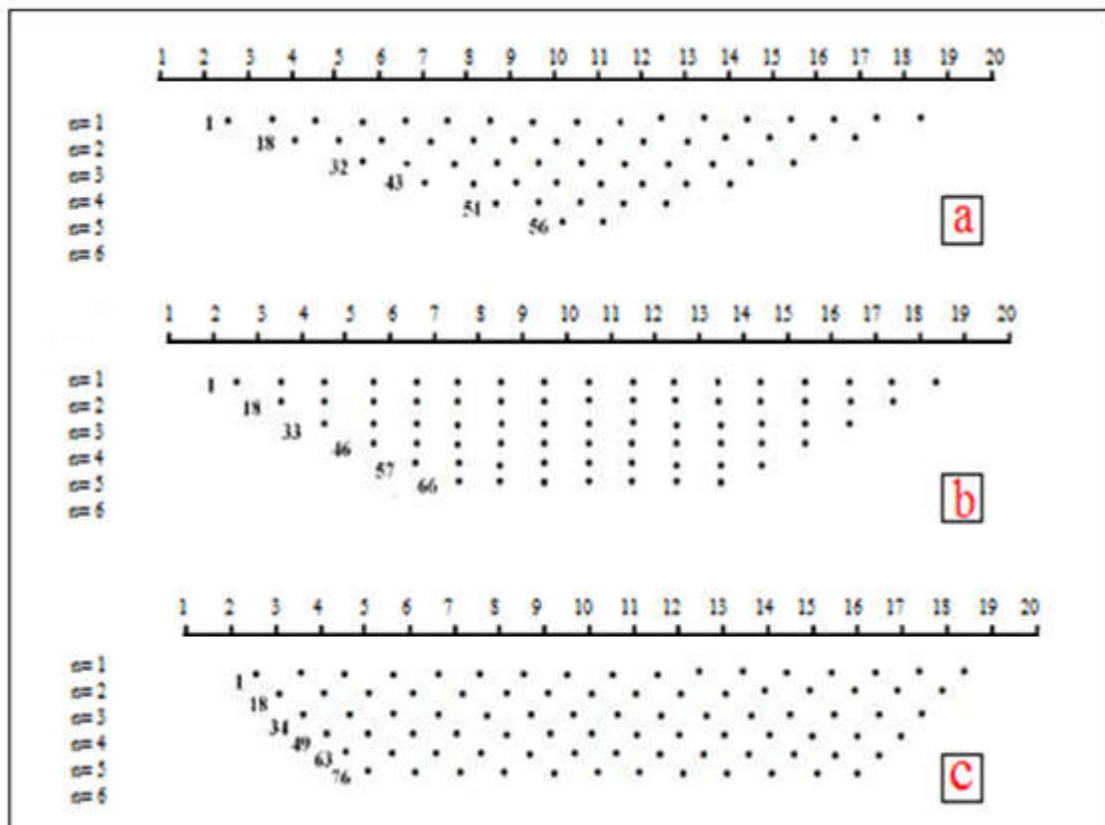


Fig.II.12 Comparaison entre les pseudosections pour les dispositifs : a) Wenner, b) Wenner-Schlumberger et c) Dipôle-dipôle (D'après Loke 2011, modifié).

II.3.6 Le dispositif Gradient

Ce dispositif relativement récent est développé pour un système d'acquisition multi-canal (Dahlin and Zhou 2004). Avec les mêmes positions des électrodes de courant ce système multi-canal (Gradient) peut effectuer plusieurs mesures simultanément via les d'électrodes de potentiel sur le long du profil. Le Dipôle-dipôle et Pôle-dipôle sont les dispositifs appropriés pour de telles mesures. A titre d'exemple, pour un système avec 32 électrodes, une mesure peut être faite avec les électrodes de courant au niveau des électrodes 1 et 32. Ensuite, une

autre série de mesure est effectuée avec des électrodes de courant au niveau des nœuds 1 et 16, puis une autre avec les électrodes de courant au niveau de nœuds 16 et 32 (Loke 2015). Un ensemble similaire de mesures peuvent être effectuées avec les électrodes C_1 - C_2 à 1-8, 8-16, 16-24 et 2-32. Ceci, peut être répété en utilisant de plus petites distances entre les électrodes de courant.

Le dispositif Gradient (Fig.II.5f) est bien adapté à une acquisition multi récepteurs. Acquisition permettant d'augmenter significativement la vitesse d'acquisition des données, et d'obtenir en même temps une haute densité de données. La configuration Gradient apporte un même compromis de résolution verticale et latérale qu'une configuration de Dipôle-dipôle (Dahlin and Zhou 2004). Comparé à l'acquisition Dipôle-dipôle, le dispositif Gradient offre un meilleur signal/bruit, ce qui est un avantage majeur pour l'acquisition de données réelles (Dahlin and Zhou 2006).

Les sections de sensibilité ayant les mêmes positions aux électrodes de courant C_1 - C_2 , mais avec le dipôle de potentiel P_1 - P_2 étant déplacés à partir du centre vers l'une des extrémités de dispositif (Fig.II.13). Le contour de sensibilité change lentement de Wenner-Schlumberger vers le Pôle-dipôle, et le dipôle de potentiel se rapproche à l'électrode de courant à la fin de dispositif. Les résultats obtenus par ce dispositif sont comparables à ceux obtenus par le Dipôle-dipôle et Pôle-dipôle (Dahlin and Zhou 2004) alors qu'il a des caractéristiques de bruit plus favorables (Zhou and Dahlin 2003).

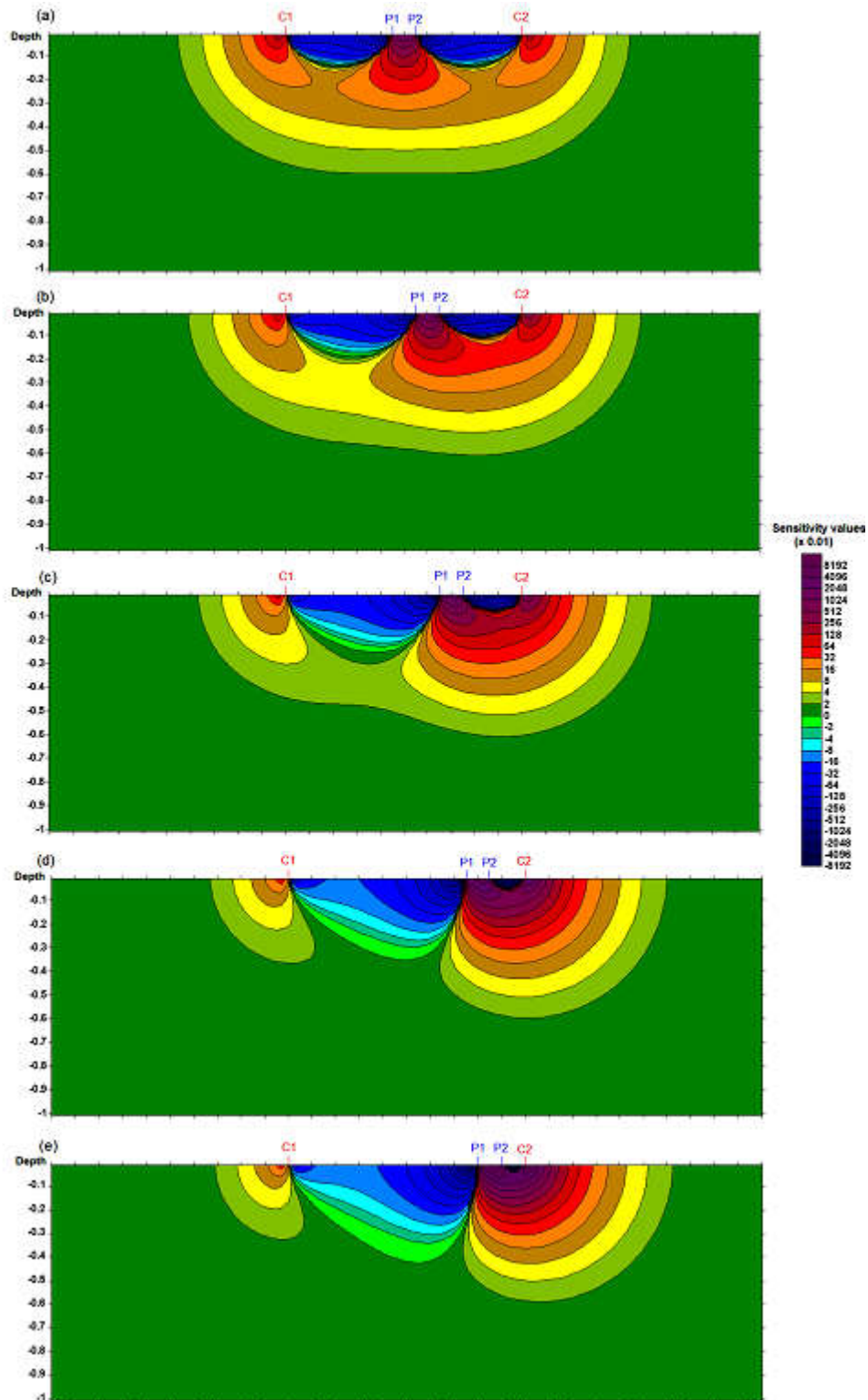


Fig.II.13 Les sections de sensibilité 2D pour le dispositif Gradient (Loke 2015).

II.3.7 Conclusion sur les types de dispositifs

Le Wenner est un choix attrayant pour une investigation menée dans une zone de bruit (en raison de sa haute force de signal) et aussi, si une bonne résolution verticale est nécessaire. Le

dispositif Dipôle-dipôle est un choix plus approprié si une bonne résolution et une couverture horizontale sont importantes (en supposant le résistivimètre est suffisamment sensible et un bon contact en terrain). Le Wenner-Schlumberger (avec des niveaux de données qui chevauchent) est une raisonnable alternative si les deux bonnes résolutions horizontales et verticales sont nécessaires et en particulier si une bonne force de signal est également nécessaire. S'il y a un système avec un nombre limité d'électrodes, le Pôle-dipôle avec des mesures à la fois dans le sens avant et arrière (*Forward et reverse*) pourrait être un choix pratique. Pour les investigations avec de petits espacements d'électrodes et nécessitent une bonne couverture horizontale, le dispositif Pôle-pôle sera un choix approprié et adéquat.

Pour une description détaillée sur la méthode de résistivité électrique, le lecteur peut trouver plus d'informations à ([Telford et al. 1990](#); [Reynolds 1997](#)).

Tableau II.1 Caractéristiques des différents dispositifs Wenner, Wenner-Schlumberger et Dipôle-dipôle (D'après [Reynolds 1997](#), modifié).

Critères \ Dispositifs	Wenner	W-Schlumberger	Dipôle-dipôle
Résolution verticale	√√√	√√	√
Profondeur d'investigation	√	√√	√√√
Convenable au SEV	√√	√√√	√
Convenable au Trainé	√√√	*	√√√
Sensible à l'orientation	Oui	Oui	Modéré
Sensible aux inhomogénéités latérales	Fort	Modéré	Modéré

√ : Faible, √√ : Modéré, √√√ : Bonne, * : Non convenable

La caractérisation d'un terrain par la méthode de résistivité électrique présente les avantages suivants :

- Elle permet d'acquérir des données bidimensionnelles et tridimensionnelles.

- L'échelle de prospection peut atteindre plusieurs centaines de mètres.
- Les mesures sont adaptées à des séquences entièrement automatisées permettant des acquisitions rapides.
- La présentation des résultats de la méthode électrique est facile à comprendre pour les utilisateurs non-spécialisés, à titre d'exemple: les géologues, les hydrogéologues et les géotechniciens.

Les limites de la méthode de résistivité électrique sont liées à

1) L'instrumentation et à la technique de la mesure:

- Un bon contact sol-électrodes est nécessaire.
- La réduction du bruit sur la mesure dû aux sources externes doit être recherchée.
- Les temps d'acquisition de la série de mesures sont encore importants.

2) La calibration des résultats est indispensable pour estimer les propriétés physiques in situ.

3) La non unicité de la solution des modèles des résistivités inversées.

II.4 Applications

Les applications possibles sont multiples pour les prospections de résistivité électrique et des exemples incluent les investigations de reconnaissance pour les projets en génie civil comme la construction des routes, chemins de fer et des barrages, la prospection géothermale et la recherche archéologique, etc. Les applications de cette méthode sont nombreuses, mais les plus utilisées sont les suivantes :

- Hydrogéologie: recherche des aquifères, cartographie de l'intrusion de l'eau de mer ([Binley et al. 2002](#); [Sandberg et al. 2002](#); [Metwaly et al. 2010](#), [Zaidi and Kassem 2012](#)).
- Surveillance des glissements: cartographie des glissements de terrain ([Xu Dong et al. 2005](#)).
- Exploration minérale: exploration des minéraux, du sable et du gravier.
- Génie Civil: études géotechniques ([Naudet et al. 2008](#); [Long et al. 2012](#)), cartographie des failles, nappe phréatique, dimensionnement des ouvrages de drainage ([Hammoum et al. 2015](#)), contact sédiments/roches. Suivi des structures en béton (ponts, barrages...).
- Investigations environnementales: pollution des aquifères, cartographie de la contamination des panaches ([Daily et al. 1998](#); [Goes and Meekes 2004](#); [Martínez-Pagán et al. 2010](#); [Metwaly et al. 2013](#)). Suivi de l'évolution de régions polluées.

- Volcanologie: la tomographie électrique permet de :
 - Reconstruire la structure interne des volcans pour déterminer la taille de la colonne de remontée de magma.
 - Suivre l'altération due à la présence éventuelle de champs hydrothermaux, localiser la présence de dykes.
 - Comprendre les mécanismes de formation.

La méthode électrique peut être aussi utilisée pour la surveillance des barrages, la détection des cavités souterraines (Van Schoor 2002; El Khammari et al. 2007; Abu-Shariah 2009; Martinez et al. 2009; Fehdi et al. 2011; Farooq et al. 2012, 2014), les fissures (Samouëlian et al. 2003, 2004; Nouioua et al. 2015) ou les fractures et les cavités en milieux karstiques (Metwaly and Al Fouzan 2013) et les structures enterrées, en archéologie pour permettre d'identifier la présence des objets enterrés (Carrara et al. 2001; El-Qady et al. 2005; Sultan et al. 2006) et la corrélation stratigraphique dans les gisements de pétrole, etc.

II.5 Quelques cas d'étude

La tomographie électrique est largement utilisée dans le monde, bien qu'il y a plusieurs d'études menées dans cette section, on décrira quelque unes seulement.

Zhou et al. (2002) ont étudié la comparaison entre trois dispositifs utilisés dans la méthode de résistivité électrique: Dipôle-dipôle, Wenner et Schlumberger pour délimiter les dolines et les risques karstiques. Le dispositif Dipôle-dipôle paraît le mieux adapté par rapport aux Wenner et Schlumberger en termes de caractérisation des dolines et des risques de karst.

Dahlin and Zhou (2004) ont utilisé cinq modèles synthétiques (Étude numérique) pour comparer la résolution et l'efficacité de l'imagerie électrique 2D pour dix configurations d'électrodes. Ces dispositifs sont: le Pôle-pôle, Pôle-dipôle, demi-Wenner, Wenner- α , Schlumberger, Dipôle-dipôle, Wenner- β , Wenner gamma, multiple gradient et dispositif midpoint-potential-referred. En outre, ils ont examiné les réponses de la variation de la densité des données et les sensibilités au bruit pour ces configurations d'électrode par l'utilisation des deux méthodes de contrainte: la méthode lissage (en anglais *smooth*) et la méthode d'optimisation par bloc (en anglais *robust ou blocky*). Les résultats ont montré que le dispositif γ et Wenner- β sont moins sensibles au bruit par rapport aux autres dispositifs. Le Dipôle-dipôle, Pôle-pôle, Gradient et Schlumberger ont produit des images de meilleure résolution que celles des autres dispositifs.

El-Qady (2006) a utilisé la méthode géoélectrique pour l'exploration d'un réservoir géothermal et l'aquifère des eaux souterraines à Hammam Mousa, Sinai en Égypte. Il a conclu que le système hydrothermal est correctement délimité d'après les données de sondages électriques verticaux 1D et les inversions 2D selon le dispositif Schlumberger. Il a recommandé de faire des forages dans cette zone afin d'exploiter les sources géothermales.

Najine et al. (2006) ont utilisé deux méthodes géophysiques pour la reconnaissance de cavités souterraines dans le centre ville de Béni-Mellal au Maroc. Les techniques du panneau (ou tomographie) électrique et du radar géologique ont été mises en oeuvre sur une parcelle de la ville. Les résultats obtenus révèlent la présence de cavités dans le sous-sol dont la plus importante s'étend sur une cinquantaine de mètre carrés environ.

El Khammari et al. (2007) ont utilisé deux méthodes géophysiques afin de tester leurs efficacités à détecter les vides souterrains dans la ville de Zaouit Ech Cheikh au Maroc. Les deux techniques sont: la tomographie électrique 2D et le radar géologique. Les résultats de ces deux méthodes révèlent l'existence de cavités souterraines dans l'ensemble de la superficie couverte. Ils ont montré également l'utilité de ces méthodes géophysiques combinées comme outil pour cartographier les vides souterrains en milieu urbain.

Ebraheem et al. (2009) ont utilisé l'imagerie électrique 2D avec des profils de 2220 m pour une étude des aquifères de la région de l'Est de l'Émirats Arabes Unis, afin d'évaluer les ressources des eaux souterraines disponibles, et délimiter l'intrusion de l'eau salée. Ensuite, ils ont fait une relation empirique entre la résistivité et la quantité de solides dissous obtenus par l'analyse chimique des échantillons d'eau prélevés dans les puits sur les profils électriques de résistivité.

Fehdi et al. (2011) ont utilisé la tomographie électrique 2D en dispositif Wenner et ont démontré la potentialité de cette méthode pour la surveillance des dolines et la cartographie des cavités souterraines près de la ville de Cheria (Tébessa). Les résultats obtenus révèlent clairement l'existence de trois cavités souterraines dans le sous-sol. Ils ont montré aussi, que cette méthode est un outil géophysique bien adapté à la détection et à la cartographie des dolines dans les zones karstiques.

Hawamdeh et al. (2014) ont utilisé la technique de tomographie électrique pour caractériser un site archéologique dans la ville de Jerash, Jordanie. Ils ont montré que la tomographie

électrique est bien adaptée pour déterminer les dimensions enterrées et ils ont prouvé aussi son efficacité dans l'investigation.

[Nouioua et al. \(2015\)](#) ont utilisé la technique de tomographie de résistivité électrique 2D pour cartographier les fissures souterraines. Le relevé géophysique a été fait dans un dépôt de phosphate à Kef Essenoun dans la région de Bir El Ater, NE de l'Algérie. Les résultats obtenus ont montré que la tomographie électrique est un outil rentable qui peut facilement être déployé pour recueillir des données de sous-sol de valeur et par conséquent elle a montré ainsi clairement une haute potentialité pour déterminer la géométrie et l'évolution des fissures souterraines, qui sont probablement causées par des glissements de terrain récents.

[Al-Heety and Shanshal \(2016\)](#) ont utilisé l'intégration de la méthode tomographie électrique et la sismique réfraction pour caractériser le sous-sol, dans un projet d'hôpital à l'université de Mosul (Iraq). Dix profils électriques ont été réalisés selon la configuration Wenner. Les résultats des profils de résistivité ont montré l'existence des zones d'altérations en profondeur, essentiellement composées de conglomérat, gravier, sable (couche altérée) et des argiles. Les deux méthodes géophysiques ont été combinées pour aider à l'interprétation et à évaluer l'importance et la fiabilité des résultats obtenus de chaque méthode. Ils ont démontré que les méthodes géophysiques sont capables de fournir des solutions pour déterminer les propriétés physiques du sous-sol.

[Rehman et al. \(2016\)](#) ont utilisé les techniques de tomographie électrique et de polarisation provoquée avec des analyses chimiques pour déterminer la pollution des eaux souterraines du Lac Al Misk (Djeddah, Arabie saoudite). Le travail avait pour objectif d'étudier l'étendue de la contamination des eaux souterraines sur les deux rives du lac, et pour avoir une meilleure compréhension de la concentration des contaminants.

De nos jours, la méthode de tomographie électrique est évoluée largement dans le domaine de génie civil et particulièrement en géotechnique et elle s'est révélée très efficace pour étudier les propriétés du sous-sol et donner des réponses aux divers problèmes rencontrés pendant et après la construction. En contexte géotechnique, les investigations géotechniques peuvent rencontrer des conditions complexes qui nécessitent l'utilisation de cette technique géophysique pour calibrer les données de forage (*Borehole data*).

La détection des fractures et des zones d'argile altérée dans les roches pour les projets du tunnel (*Tunneling projects*), ou d'autre construction, est une application importante où le levé

de résistivité peut être attendu pour donner plus d'information sur la géométrie des zones que d'autres méthodes. Si le levé de résistivité est utilisé au début, il peut être utilisé pour guider la position exacte par exemple, d'une ligne de tunnel, et la sélection d'une technique de tunnel appropriée.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthode de tomographie ou imagerie électrique. Nous avons étudié plus particulièrement la tomographie électrique 2D, le processus d'acquisition pour construire les pseudo-sections. On a présenté les dispositifs utilisés en tomographie 2D, ainsi que leurs avantages, désavantages, limitations et leurs sensibilités de mesure. Par la suite, nous avons décrit les domaines d'applications de la tomographie électrique avec des cas d'étude. A l'heure actuelle, la méthode de tomographie électrique est largement utilisée dans différents domaines, mais il reste que la mesure des valeurs de résistivité, n'est pas la même pour un matériau donné. Dans le chapitre suivant, on présente les facteurs qui influencent les valeurs de résistivité électrique.

Chapitre III.

Propriétés électriques des roches et des matériaux

III.1 Introduction

III.2 Généralités sur les propriétés électriques des roches et des matériaux

III.3 Profondeur d'investigation

III.4 Paramètres géoélectriques

III.5 Conclusion

III.1 Introduction

La résistivité électrique (*Electrical resistivity*) est l'une des propriétés physiques qui varie sur un large diapason. En effet, les valeurs de résistivité dans les milieux naturels peuvent changer d'un type de roche ou minéral à l'autre (Parkhomenko 1967; Zohdy et al. 1974; Telford et al. 1990; Keary et al. 2002) Cuivre $10^{-6} \Omega\cdot m$, Pyrite $10^{-3} \Omega\cdot m$, Graphite $10^{-1} \Omega\cdot m$, Quartzites $10^8 \Omega\cdot m$ et le Soufre pur $10^{16} \Omega\cdot m$. La figure suivante montre quelques valeurs de résistivités des différents types de roches, de sols et de minéraux (Fig.III.1).

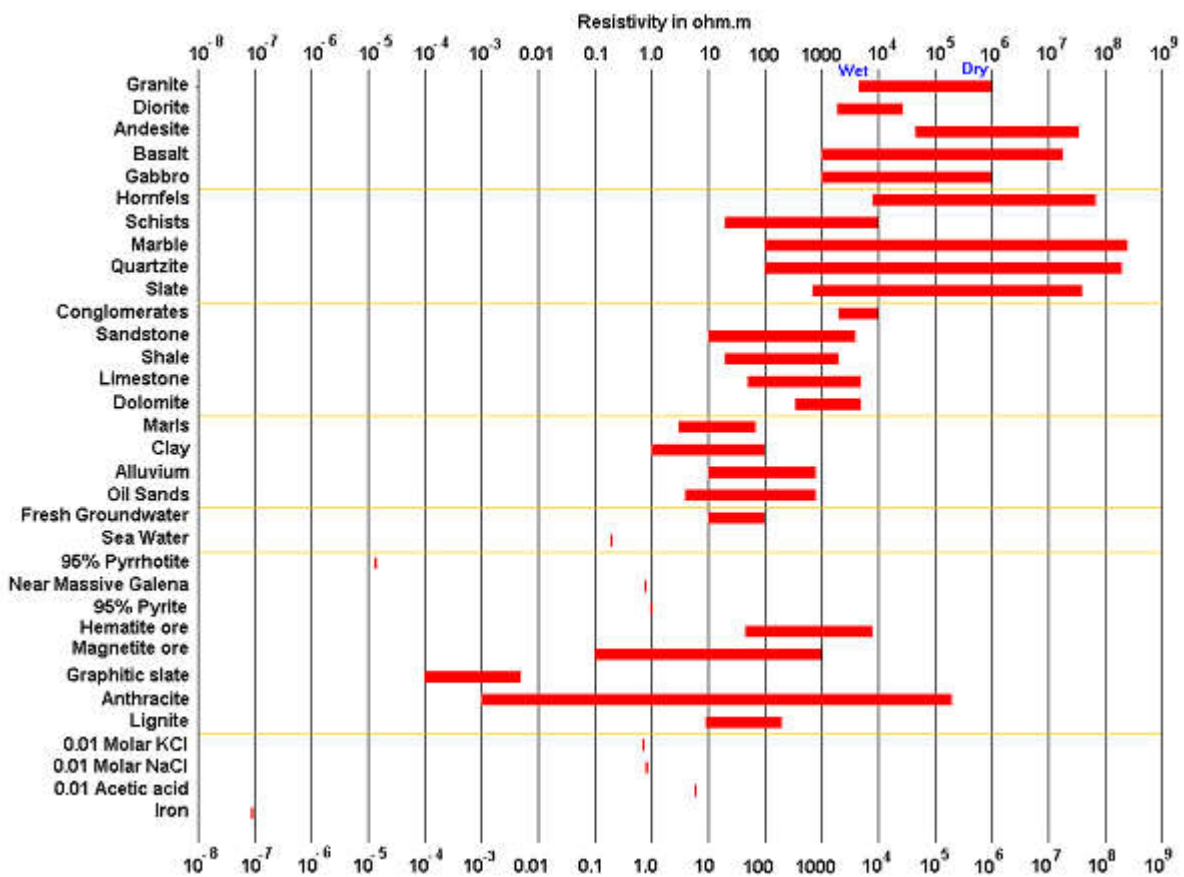


Fig.III.1 Résistivité des roches et des minéraux (Loke 2011).

III.2 Généralités sur les propriétés électriques des roches et des matériaux

Les propriétés électriques de la plupart des roches et des sols dans la partie supérieure de la croûte terrestre dépendent principalement de la quantité d'eau dans la roche, de la salinité de l'eau, de la porosité et de la taille des particules (Yakupov 1973; Zohdy et al. 1974), et plus particulièrement de la teneur en argile et de la température. Plus le milieu est saturé plus il devient conducteur, et les roches saturées ont de faibles résistivités par rapport aux roches sèches (Zohdy et al. 1974). De même, certains processus géologiques tels que l'érosion, la fracturation, le métamorphisme, la précipitation de carbonate et l'altération hydrothermale

augmentent la porosité et la perméabilité. Tous ces facteurs affectent la valeur de la résistivité électrique. Ainsi, la présence des minéraux argileux au sein des formations géologiques sera caractérisée par une baisse de leur résistivité apparente.

Le courant électrique circule généralement par deux modes : électronique, qui se produit dans les métaux et les cristaux, ou électrolytique telle que la conduction dans un liquide (Schlumberger 1920; Keller and Frischknecht 1966; Zohdy et al. 1974; Telford et al. 1990). En mode électronique, le flux de courant se fait par l'intermédiaire des électrons libres, tandis que dans l'électrolytique, la plupart des roches conduisent l'électricité par l'eau minéralisée et les pores (électrolytique). Il dépend aussi de la conductivité d'eau et la manière de la distribution de l'eau. Il faut rappeler que la conductivité est l'inverse de la résistivité. Cependant, la circulation du courant dans les formations argileuses se fait par les deux modes (électronique et électrolytique).

Les roches sédimentaires (carbonatées) sont habituellement des roches poreuses et ont une teneur en eau plus élevée. Les roches ignées (magmatiques) et métamorphiques ont généralement des valeurs élevées de résistivité par rapport aux roches sédimentaires. La gamme des valeurs de résistivité allant de 10 jusqu'à 10000 $\Omega \cdot m$, avec la plupart des valeurs de résistivité en dessous de 1000 $\Omega \cdot m$. Les valeurs de résistivité en grande partie dépendent de la porosité des roches et de la salinité de l'eau (Zohdy et al. 1974; Loke 2011, 2015).

Les sédiments non consolidés ont généralement de faibles résistivités par rapport aux roches sédimentaires, avec des valeurs variant de 10 à moins de 1000 $\Omega \cdot m$. La valeur de résistivité dépend de la porosité (en supposant que tous les pores sont saturés) en plus de la teneur en argile (Schlumberger 1920; Loke 2015). Le sol argileux a une valeur de résistivité faible que le sol sableux.

Cependant, il faut noter que le chevauchement des valeurs de résistivité de différentes classes de roches et de sols (Fig.III.1). Ceci, parce que la résistivité d'une roche ou un échantillon de sol dépend d'un nombre de facteurs telle que la porosité, le degré de saturation et la concentration des sels dessous. Zohdy et al. (1974) reportent que les valeurs des sédiments non consolidés de moins de 1 $\Omega \cdot m$ pour certaines d'argiles ou de sables saturés avec l'eau salée à plusieurs milliers de $\Omega \cdot m$ pour les sables secs et les graviers. La résistivité du sable et de l'argile saturée d'eau douce varie de 15 à 600 $\Omega \cdot m$. Les roches compactes et saines donnent, même après imbibition dans l'eau, des chiffres plus élevés, de l'ordre de $10^6 \Omega \cdot m$

(Schlumberger 1920). La résistivité des eaux souterraines varie de 10 à 100 $\Omega \cdot m$, et dépend de la concentration des sels dissous (Loke 2015).

On note, que la faible résistivité de l'eau de mer (environ 0.2 $\Omega \cdot m$) est due à la teneur en sel relativement élevée (Loke 2011). Ceci, rend la méthode de résistivité une technique idéale pour cartographier le contact de l'eau salée/douce dans les régions côtières.

Une équation empirique simple donne la relation entre la résistivité d'une roche poreuse et le facteur de saturation du fluide suggérée par Archie (1942) (Telford et al. 1990). D'après cette loi, la conduction d'électricité à travers l'eau interstitielle est par le transport ionique, tandis que la conductibilité électrique des argiles, des calcaires marneux, des calcaires et des dolomies a une origine électrolytique (LaMoreaux et al. 1984). La loi d'Archie généralisée relie la résistivité de l'eau dans les pores et le volume des pores par l'équation suivante :

$$\rho = a \cdot \rho_w \cdot \phi^{-m} \cdot S^{-n} \quad (\text{III. 1})$$

Avec ρ la résistivité de la roche, ρ_w la résistivité de l'eau d'imbibition, ϕ la porosité qui représente le rapport entre le volume de vide et le volume total (sans dimension), S le volume de la fraction des pores ou saturation en eau de la roche, a est un facteur qui dépend de la lithologie ($0,5 \leq a \leq 2$). m le facteur de cimentation (sans unité) $1,3 \leq m \leq 2,5$. Les deux paramètres m et a sont des paramètres empiriques (Keller and Frischknecht 1966). n est un facteur de saturation empirique (n est égale 2). Cette formule montre que la résistivité des roches diminue quand la teneur en eau augmente, il est possible de déterminer S , à partir d'études géophysiques électriques.

Archie proposa des expressions typiques pour différents types de roches (magmatiques, sédimentaires, détritiques, etc.), quand ces roches sont complètement saturées (Parkhomenko 1967). La loi d'Archie présente l'avantage de relier l'ensemble des paramètres qui contrôlent la valeur de la résistivité :

- ✓ La minéralisation de la solution par la résistivité du fluide,
- ✓ La teneur en eau,
- ✓ La porosité.

La résistivité des roches saturées à conductibilité électrolytique est une fonction décroissante : de la porosité totale et de la conductibilité de l'eau d'imbibition. Elle dépend également de la répartition et de la forme des pores et des fissures.

Pour les roches stratifiées (ex: bassin sédimentaire), la résistivité n'est pas la même suivant la direction du courant (Kunetz 1966). Les valeurs minimales et maximales sont obtenues respectivement lorsque le courant s'écoule parallèlement et perpendiculairement aux strates; le rapport entre ces deux valeurs extrêmes atteint parfois plusieurs unités (Kunetz 1966). On dit que ces roches sont *anisotropes*; il s'agit d'une micro ou d'une macro anisotropie, suivant que l'épaisseur des strates est de quelques millimètres (gneiss par exemple) ou de quelques dizaines de centimètres (cas d'alternance de sables et d'argiles en particulier) (Astier 1971).

Par conséquent, la résistivité d'un sol ou d'une roche peut varier largement, comme le montre la figure ci-dessous (Fig.III.2). Cependant, la variation peut être limitée plus dans une zone géologique confinée et les variations de la résistivité dans un sol ou d'une roche reflèteront les variations des propriétés physiques (Dahlin 1993). Par exemple, les résistivités les plus basses rencontrées pour les grès et les calcaires signifient que les vides dans la roche sont saturés d'eau, alors que les valeurs les plus élevées représentent des roches sédimentaires fortement consolidées ou des roches sèches au-dessus de la surface des eaux souterraines (Dahlin 1993). Le sable, le gravier et la roche sédimentaire peuvent également présenter de faibles résistivités, à condition que les vides soient saturés de l'eau salée, ce qui n'est pas indiqué dans la figure ci-après (Fig.III.2).

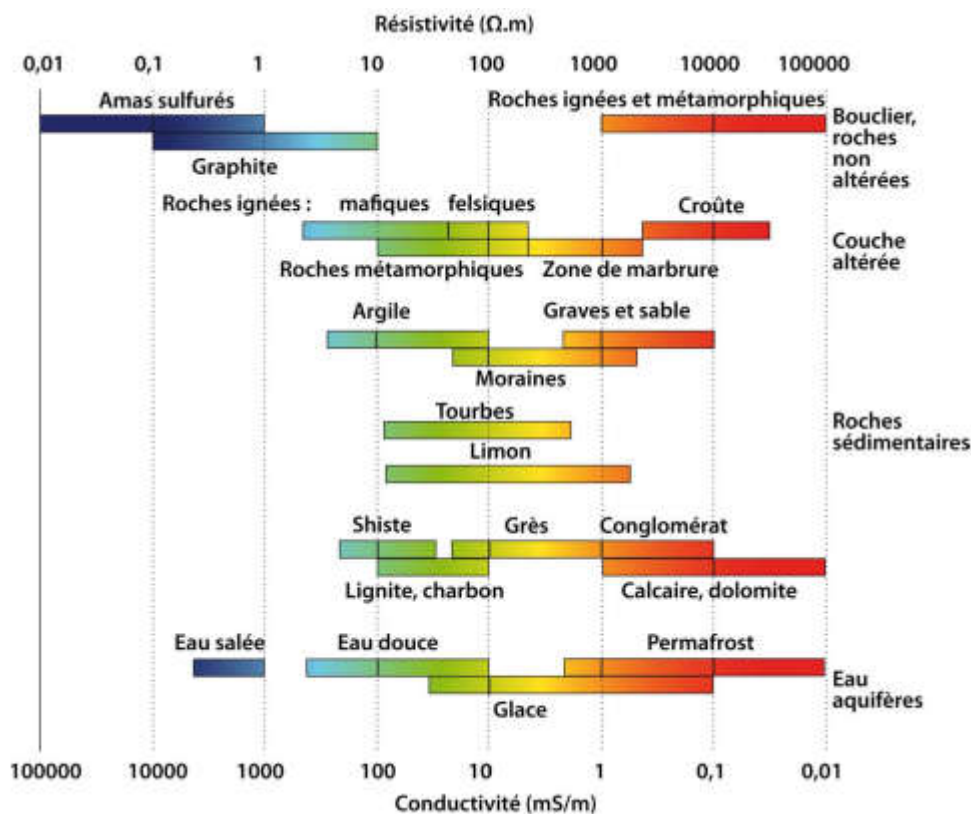


Fig.III.2 Gamme des résistivités des principaux matériaux géologiques (Palacky 1987).

III.3 Profondeur d'investigation

La notion de profondeur d'investigation (*Depth of investigation*) dans la prospection électrique fut introduite par les frères Schlumberger, les fondateurs des méthodes électriques, en 1931. [Evjen \(1938\)](#) l'a défini comme la profondeur dans le sous-sol à laquelle une couche de faible épaisseur exprime sa contribution maximale au signal total mesuré en surface. La même définition de la profondeur d'investigation a été proposée par [Roy and Apparao \(1971\)](#). Dans un panneau électrique, que l'on peut voir comme la combinaison entre un sondage électrique (étude des variations verticales en 1D) et un traîné électrique (étude des variations horizontales par le déplacement du dispositif à écartement fixé), ou encore comme la combinaison de plusieurs sondages électriques situés les uns à côté des autres, la profondeur d'investigation 2D peut être étudié à partir de la profondeur d'investigation 1D des sondages électriques constituant le panneau électrique. A partir de la fonction de sensibilité de chaque dispositif, on peut obtenir la position des points de mesure en profondeur. En effet, le positionnement de la pseudo-profondeur des données de ρ_a mesurées le long du profil électrique dans le logiciel Res2Dinv suit la définition d'[Edwards \(1977\)](#) pour l'estimation de la profondeur d'investigation effective (Z_e) qui correspond à la profondeur médiane. La profondeur d'investigation dépend du dispositif utilisé, de l'écartement inter-électrodes et de la distribution de résistivité électrique dans le sol investi.

La profondeur d'investigation effective dépend du facteur de séparation (n), de l'espacement inter-électrodes (a) ou la longueur totale du profil électrique (L). A titre d'exemple : Z_e est égale 1,22 m pour un dispositif Dipôle-dipôle dont ($a = 1$, $n = 4$) et atteint 1,71 m pour un dispositif Wenner-Schlumberger ($a = 1$, $n = 4$).

Tableau III.1 Tableau des coefficients pour estimer la profondeur d'investigation des différents dispositifs d'électrodes (D'après [Edwards 1977](#), modifié).

Dispositif	n	Z_e/a	Z_e/L
Wenner Alpha		0,519	0,173
Wenner Bêta		0,417	0,139
Wenner Gamma		0,594	0,198
Dipôle-dipôle	0,22	0,139	0,063
	0,5	0,253	0,101

	1	0,416	0,139
	2	0,697	0,174
	3	0,962	0,192
	4	1,220	0,203
	5	1,476	0,211
	6	1,730	0,216
	7	1,983	0,220
	8	2,236	0,224
	20	5,25	0,239
	∞	-	0,250
Pôle-dipôle	1	0,519	-
	2	0,925	-
	3	1,318	-
	4	1,706	-
	5	2,093	-
	6	2,478	-
Dipôle-dipôle équatorial	1	0,451	0,319
	2	0,809	0,362
	3	1,180	0,373
	4	1,556	0,383
	10	3,84	0,384
	∞	-	0,384
Pôle-pôle	-	0,867	-
Wenner-Schlumberger	1	0,520	0,173
	2	0,930	0,186

Wenner-Schlumberger	3	1,320	0,189
	4	1,710	0,190
	5	2,090	0,190
	6	2,480	0,190

III.4 Paramètres géoélectriques

Une section géologique diffère d'une section géoélectrique quand les limites entre les couches géologiques ne coïncident pas avec les limites entre les couches ayant différentes résistivités. Ainsi, les limites électriques séparant des couches de différentes résistivités peuvent coïncider ou ne pas coïncider avec les limites séparant des couches d'âge géologique différent ou de composition lithologique différente (Zohdy et al. 1974). Par exemple, quand la salinité des eaux souterraines dans un type de roche donné change avec la profondeur, plusieurs couches géoélectriques peuvent être distinguées dans une roche lithologiquement homogène. Dans le cas opposé, des couches de différentes lithologies ou âges, ou toutes les deux, peuvent avoir la même résistivité et former ainsi une seule couche géoélectrique. Une couche géoélectrique est décrite par deux paramètres fondamentaux : sa résistivité ρ_i et son épaisseur h_i , où l'indice inférieur i indique la position de la couche dans la section ($i = 1$ pour la couche la plus élevée). D'autres paramètres géoélectriques sont dérivés de sa résistivité et de son épaisseur, ces paramètres sont :

La conductance longitudinale : $S_i = h_i / \rho_i$

La résistance transversale : $T_i = h_i \rho_i$

La résistivité longitudinale : $\rho_L = h_i / S_i$

La résistivité transversale : $\rho_t = T_i / h_i$

L'anisotropie : $\lambda = \sqrt{(\rho_t / \rho_L)}$

Pour une couche isotrope : $\rho_t = \rho_L$ et $\lambda = 1$. Ces paramètres sont importants quand ils sont utilisés pour décrire une section géoélectrique composée de plusieurs couches.

Pour n couches, la conductance longitudinale totale est :

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_n}{\rho_n}; \quad (\text{III. 2})$$

La résistance transversale totale est :

$$T = \sum_{i=1}^n h_i \rho_i = h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2 + \dots + h_n \rho_n; \quad (\text{III. 3})$$

La résistivité longitudinale moyenne est :

$$\rho_L = \frac{H}{S} = \frac{\sum_1^n h_i}{\sum_1^n \frac{h_i}{\rho_i}}; \quad (\text{III. 4})$$

La résistivité transversale moyenne est :

$$\rho_L = \frac{T}{H} = \frac{\sum_1^n h_i \rho_i}{\sum_1^n h_i}; \quad (\text{III. 5})$$

Et l'anisotropie est donnée par :

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_{t(\perp)}}{\rho_{L(\parallel)}}} = \frac{\sqrt{TS}}{H} \quad (\text{III. 6})$$

Les paramètres sont extraits en considérant une colonne de section unitaire (1×1 mètre).

Si le courant circule dans le sens vertical, les couches dans la colonne se comportent comme des résistances connectées en série, et la résistance totale est donnée par :

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (\text{III. 7})$$

ou

$$R = \rho_1 \times \frac{h_1}{1 \times 1} + \rho_2 \times \frac{h_2}{1 \times 1} + \dots + \rho_n \times \frac{h_n}{1 \times 1} = \sum_{i=1}^n h_i \rho_i = T \quad (\text{III. 8})$$

Le symbole T est utilisé au lieu de R pour indiquer que la résistance est mesurée dans une direction perpendiculaire à la stratification et les dimensions de la résistance unitaire sont Ohm·m² au lieu d'Ohms.

Si le courant circule parallèlement à la stratification, les couches dans la colonne se comportent comme des résistances connectées en parallèle, et la conductance est donnée par :

$$S = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (\text{III. 9})$$

ou bien

$$T = \frac{1 \times h_1}{\rho_1 \times 1} + \frac{1 \times h_2}{\rho_2 \times 1} + \dots + \frac{1 \times h_n}{\rho_n \times 1} \quad (\text{III. 10})$$

III.4.1 Principe d'équivalence

Le principe d'équivalence concerne des couches dont la résistivité est soit inférieure soit supérieure à celle des deux terrains entre lesquels elles sont comprises, soit des sondages de type H et K (Kunetz 1966). Prenons le cas d'un terrain résistant entre deux terrains plus conducteurs, sondage de type K. Le terrain 2 se manifestera par sa résistance transverse, produit de sa résistivité par son épaisseur. Tant que ce produit reste constant et dans certaines limites, le sondage électrique reste inchangé.

$$R = h \rho \quad (\text{III. 11})$$

Une couche conductrice comprise entre deux couches résistantes se fera connaître par sa conductance longitudinale, rapport de son épaisseur par sa résistivité, sondage de type H. Tant que le rapport reste le même, le sondage reste inchangé.

$$R = \frac{h}{\rho} \quad (\text{III. 12})$$

Les limites de validité de ce principe dépendent des caractéristiques de l'ensemble des couches en présence. Il existe un autre principe très important lors de l'interprétation des sondages électriques, c'est le principe de suppression.

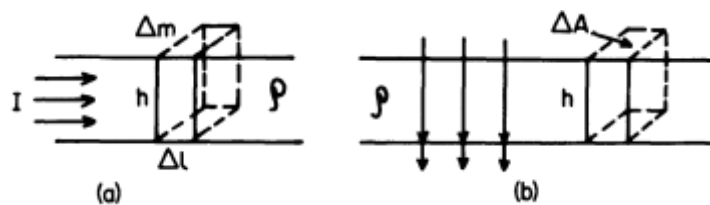


Fig.III.3 Principe d'équivalence (Parasnis 1986).

III.4.2 Principe de suppression

Ce principe est relatif à des couches dont la résistivité est intermédiaire entre celle des couches encaissantes (Kunetz 1966). De telles couches, tant qu'elles n'ont pas une épaisseur assez grande ne modifient pas ou peu le diagramme de sondage électrique. Cette indétermination se trouve fréquemment dans les études hydro-géoelectriques où l'on a affaire des alluvions sèches puis des alluvions aquifères reposant sur un substratum conducteur type grès molassique. Il s'agit alors d'un sondage de type Q. Inversement, on peut souhaiter mettre en évidence des graviers aquifères reposant sur des calcaires. Là encore on peut avoir suppression, la suppression se fait d'ailleurs plus rapidement dans ce cas de sondage de type A. Ces deux principes (équivalence et suppression) s'appliquent pour les sondages à 4, 5, 6, et plus de couches et aussi lors de l'inversion des pseudo-sections.

III.5 Conclusion

Le courant continu peut s'écouler dans les terrains avec des manières différentes, et la résistivité dépend de plusieurs facteurs, donc on ne peut pas attribuer une valeur précise de résistivité à un milieu donné. Nous avons présenté dans ce chapitre les propriétés électriques des matériaux (roches, sols et minéraux) en termes de résistivité et les paramètres qui affectent la valeur de la résistivité électrique, par exemple, la salinité de l'eau, la porosité et la teneur en eau, etc. Puis, nous avons présenté la notion de la profondeur d'investigation dans la prospection électrique pour les divers dispositifs de mesure, ainsi que les paramètres géoelectrique fondamentaux (principe d'équivalence et de suppression).

La mesure des données de résistivité électrique selon l'acquisition de tomographie électrique, nécessite l'interprétation de ces données afin d'obtenir un modèle de résistivité du sous sol. Le chapitre suivant traite la procédure du traitement et d'interprétation des données de tomographie électrique.

Chapitre IV.

Traitement, inversion et interprétation des données de tomographie électrique

IV.1 Introduction

IV.2 Traitement et interprétation des données

IV.3 Concept d'inversion en géophysique

IV.4 Paramètres utilisés lors de l'inversion

IV.5 Modèles synthétiques

IV.6 Conclusion

IV.1 Introduction

Le traitement des données (*Data processing*) en géophysique passe souvent par la méthode d'inversion permettant d'obtenir une meilleure idée des paramètres étudiés (Marescot 2008). Dans la méthode électrique, le processus de traitement des données peut être divisé en deux catégories. Le problème inverse: modèle géologique à chercher et le problème direct: calcul de résistivité apparente à partir des modèles synthétiques adoptés (résistivité vraie) (Zhdanov 2002). La définition générale des problèmes inverse et direct (*Inverse and forward problems*) peut être décrite comme suit :

Le problème inverse : Données **d** (sources) → Modèle {paramètres du modèle **m**}.

Le problème direct : Modèle {paramètres du modèle **m** (sources)} → Données **d**.

IV.2 Traitement et interprétation des données

Les valeurs obtenues sur le terrain sont des résistivités électriques qui représentent des valeurs qui intègrent les résistivités d'un certain volume du sous-sol (3D). A partir de ces valeurs, on cherche à retrouver les épaisseurs et les résistivités vraies de différents corps géologiques en présence (position et profondeur). Le traitement des données de tomographie électrique requiert le recours à un logiciel d'analyse. Pour réaliser ce travail, nous avons utilisé le logiciel **Res2Dinv** (Ver 3.71.116) commercialisé par **Geotomosoft** (www.geotomosoft.com). Actuellement, Res2Dinv est l'outil d'inversion le plus utilisé dans les milieux universitaires et privés comparativement aux autres logiciels d'inversion. Le logiciel Res2Dinv est protégé contre la copie par une clef physique (*Keylok USB dongle*), qui permet l'accès à toutes les options. Ce logiciel, supporte un levé de tomographie électrique de 25 jusqu'à 16000 électrodes et 27000 points de données (www.geotomosoft.com).

Définition

Res2Dinv est un logiciel, propose un modèle optimal 2D de résistivité électrique et de polarisation provoquée (PP) du sous-sol correspondant le mieux à la structure électrique du terrain étudié (Griffiths and Barker 1993; Dahlin 1996). Ce logiciel est capable d'inverser un grand nombre de données, pouvant être collectées par un grand nombre d'électrodes (Loke 2011, 2015). Le modèle 2D utilisé par le programme d'inversion divise automatiquement la pseudo-section en mailles (blocs) rectangulaires autour des points de mesure (Loke and Barker 1996; Loke et al. 2003). La taille des blocs augmente avec la profondeur, à cause de la faible résolution en profondeur (Dahlin 2001) (Fig.IV.1).

La profondeur de la dernière ligne de mailles correspond de manière approximative à la profondeur d'investigation des points de données ayant le plus grand espacement des électrodes (Edwards 1977; Loke 2014). Le logiciel Res2Dinv utilise par défaut la méthode des différences finies (MDF), sauf s'il existe des données topographiques, la méthode des éléments finis (MEF) est préférée, car elle est plus flexible pour l'arrangement des blocs.

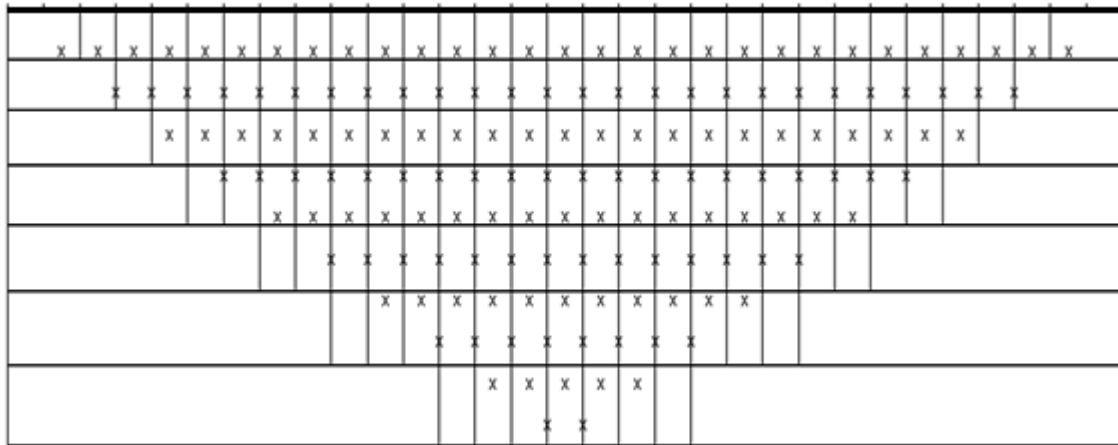


Fig.IV.1 Arrangement des blocs utilisés en modèle 2D avec les points de données dans la pseudo-section (Loke 2011).

Afin de calculer les valeurs de résistivité apparente, un processus de modélisation par itérations successives est utilisé et la technique non linéaire des moindres carrés permet d'inverser les données de résistivité (Loke 2014). Toutefois le modèle à chercher n'est pas unique. En effet, il est possible de calculer à partir d'un même jeu de données de terrain de résistivité apparente pour différents modèles, selon les paramètres choisis (Loke 2011). Res2Dinv peut calculer les modèles 2D pour tous les dispositifs utilisés en imagerie électrique, et peut lire toutes les données obtenues par les différents résistivimètres utilisés en prospection électrique (ABEM Suède, IRIS France, OYO Japon, SCINTREX Canada, PASI Italie, etc.).

IV.2.1 Théorie

Le processus d'inversion utilisé par le logiciel est basé sur la méthode d'inversion de lissage par moindres carrés (en anglais, *smoothness-constrained least squares*) (Loke 2014). C'est une méthode d'optimisation dont le but tend à minimiser la somme des carrés (nommée aussi : norme L_2) des écarts entre les valeurs de résistivité apparente mesurée et calculée. Une nouvelle implémentation de la méthode des moindres carrés basée sur la technique d'optimisation de Newton peut aussi être utilisée (deGroot-Hedlin and Constable 1990; Sasaki 1992). Cette technique est plus rapide que la méthode conventionnelle des moindres carrés

pour des données nombreuses et requiert moins de mémoire. La méthode d'inversion de lissage par moindres carrés est basée sur l'équation suivante :

$$(J^T J + \mu F) \cdot d = J^T g \quad (IV.1)$$

où

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T \quad (IV.2)$$

f_x : Filtre de lissage horizontal

f_z : Filtre de lissage vertical

J : Matrice des dérivées partielles (La matrice jacobienne)

μ : Facteur d'amortissement (*Damping factor*)

d : Vecteur de perturbation du modèle

g : Vecteur de divergence

L'avantage de cette méthode est que l'on peut ajuster des paramètres comme le facteur d'amortissement et les filtres de lissage selon le type de données de tomographie (Loke 2014).

Il est aussi possible d'utiliser la méthode conventionnelle de *Gauss-Newton*. Cette méthode est plus lente que la méthode *quasi-Newton* (Loke and Barker 1996) mais pour les zones avec de forts contrastes de résistivité, elle donne des résultats meilleurs que *quasi-Newton*.

Une troisième possibilité est d'utiliser la méthode *Gauss-Newton* pour les 2-3 premières itérations et ensuite celle de *quasi-Newton*, dans la plupart des cas, ce procédé donne les meilleurs compromis. Ces deux techniques sont destinées pour calculer la matrice jacobienne des dérivées partielles. Dahlin and Loke (1998); Loke and Dahlin (2002) ont mentionné que la méthode *quasi-Newton* est basée sur un calcul analytique de la matrice jacobienne des dérivées partielles pour un demi espace homogène pour la 1^{re} itération et ensuite les matrices jacobiennes pour les itérations suivantes sont estimées par l'amélioration de la technique. Ce modèle 2D divise le sous-sol en mailles rectangulaires, le but du programme est ensuite d'attribuer à chaque maille une résistivité, qui donnerait lorsqu'on considère l'ensemble, une pseudo-section des résistivités apparentes en accord avec les mesures. La méthode d'optimisation essaie de réduire la différence entre la résistivité apparente mesurée et celle

calculée en procédant à des ajustements du modèle. L'erreur RMS (*Root Mean Square*) est une mesure de cette différence est affichée après chaque itération (Loke 2014). Cependant, un modèle avec une erreur RMS la plus faible possible peut montrer de grandes variabilités et n'est pas forcément le meilleur si on considère une perspective géologique (Loke 2014). L'approche la plus prudente est de choisir un modèle à une itération après laquelle l'erreur RMS ne s'améliore pas, en général entre quatre et six itérations (Nouioua et al. 2013).

IV.3 Concept d'inversion en géophysique

Les mesures de résistivité apparente ne peuvent pas être interprétées directement. C'est la raison de la non unicité de la solution en milieu hétérogène et de leurs dépendances vis à vis de la configuration d'électrodes utilisée (Parker 1977; Loke 2011, 2015). Lorsque le milieu est homogène, la résistivité apparente est une bonne approximation de la résistivité vraie, et elle peut être interprétée directement (Loke 2015).

Dans le cas d'un milieu hétérogène, tel que l'on rencontre le plus souvent dans la nature, la pseudo-section ne peut pas être interprétée directement, d'autant plus que celle-ci dépend également de la configuration des électrodes. La pseudo-section peut être produite dans le cas d'un profil en résolvant la loi d'Ohm et l'équation de Laplace. Ce processus est appelé modélisation **directe**. Seules des interprétations qualitatives peuvent être effectuées à partir de celle-ci. Pour obtenir une mesure quantitative de la résistivité vraie, il est nécessaire de procéder à une procédure dite d'inversion (Loke 2011). Lorsqu'un levé de résistivité est réalisé, le but consiste à obtenir le modèle synthétique de résistivité vraie du milieu étudié à partir de la pseudo-section de résistivité apparente observée. Ce processus s'appelle **inversion** puisqu'il s'agit de l'inverse de la modélisation directe. La figure ci-après résume les principales étapes effectuées lors du traitement des données pour obtenir une image électrique 2D (Fig.IV.2).

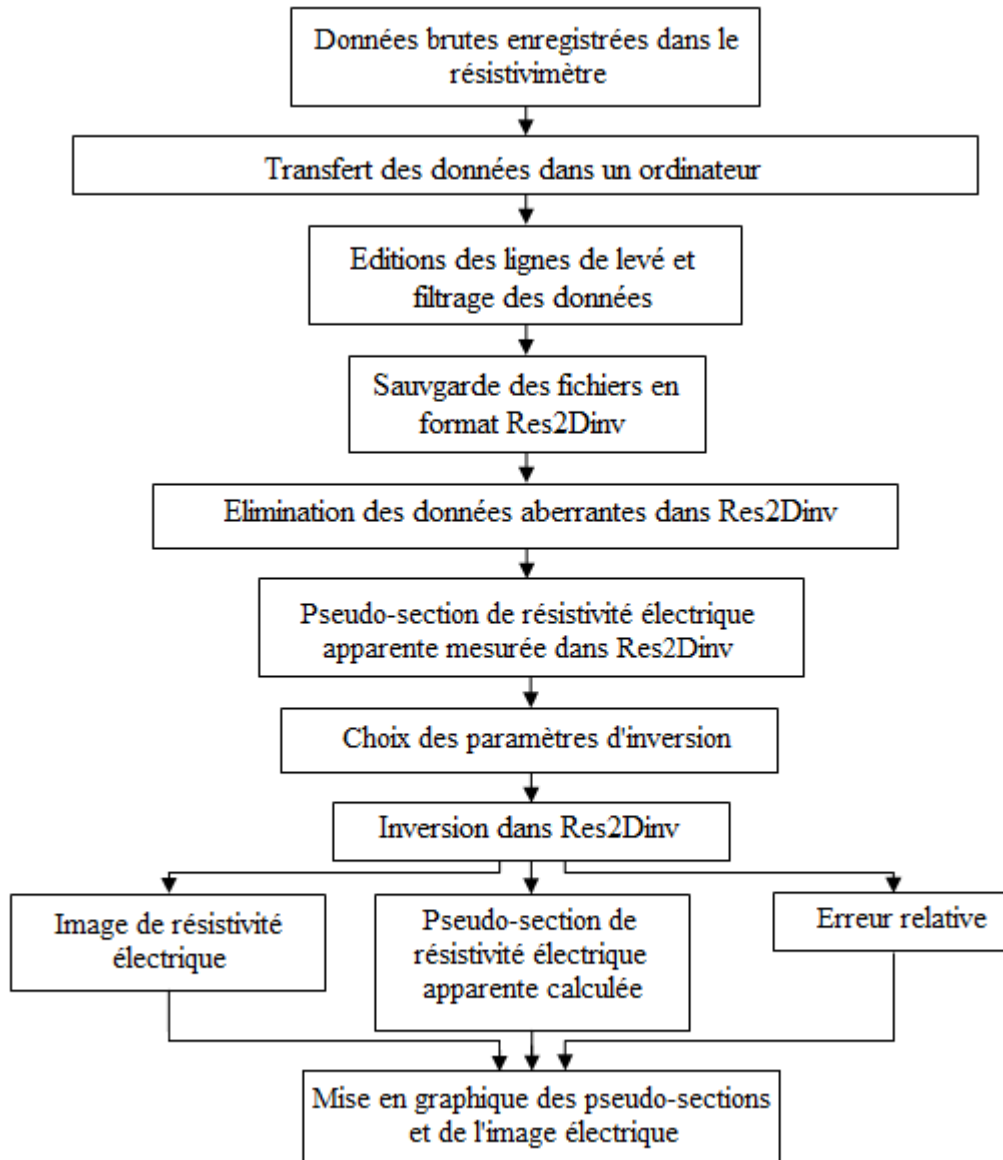


Fig.IV.2 Etapes du traitement des données d'imagerie électrique 2D (<http://theses.ulaval.ca>).

L'inversion est une méthode itérative automatique qui peut fournir un modèle de résistivité vraie afin de placer les structures à une profondeur adéquate (position et profondeur). Par contre, la solution mathématique de l'inversion n'est pas unique car plusieurs modèles peuvent correspondre à la même pseudo-section (Parker 1977). Le modèle qui correspond le mieux à la résistivité apparente mesurée sur le terrain n'est donc pas nécessairement le bon (Frohlich et al. 1994; Loke 2014). Il est nécessaire de bien connaître le milieu étudié pour être en mesure d'optimiser le processus d'inversion en choisissant les paramètres d'inversion adéquats. La présence de bruit dans le signal ou des valeurs aberrantes peut également influencer les résultats d'une inversion. Dans ce cas, l'inversion présentera une image moins

précise de la résistivité vraie (Seaton and Burbey 2002). Il est donc essentiel de considérer ces facteurs lors l'interprétation des résultats. De plus, afin d'optimiser la qualité des résultats obtenues après inversion des données, il faut que celles-ci aient été recueillies avec soin lors de l'investigation sur le terrain (Marescot 2008).

IV.3.1 Méthodologie de l'inversion

Afin d'obtenir une image qui représente les distributions spatiales de la résistivité réelle (et non plus apparente) en fonction de la profondeur, il est nécessaire d'inverser la pseudo-section (résistivité inversée) (Loke 2015). Cette inversion est réalisée suivant un processus itératif qui tente de minimiser l'écart entre la pseudo-section mesurée et une pseudo-section recalculée à partir d'un modèle de résistivité électrique. Ce modèle est modifié à chaque itération jusqu'à ce que les données mesurées et calculées atteignent une corrélation acceptable ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible (Nouioua et al. 2013). Ce processus d'inversion a été formalisé mathématiquement et implémenté dans le programme d'inversion Res2Dinv (Loke 1994; Loke and Baker 1996).

IV.3.2 Inversion des données dans Res2Dinv

Res2Dinv est un logiciel qui détermine automatiquement un modèle en 2D de résistivités vraies d'après les données de résistivités apparentes lors d'une prospection d'imagerie électrique du sous-sol (Griffith and Barker 2003). Le modèle 2D utilisé par le programme d'inversion est constitué de blocs dont la répartition et la taille sont définies par la distribution des données de la pseudo-section qui elle-même dépend de la configuration des électrodes. La profondeur de la dernière ligne de mailles correspond de manière approximative à la profondeur d'investigation (Edwards 1977). La topographie doit être prise en compte dans l'inversion car son influence n'est pas négligeable (Kearey et al. 2002). Le programme inverse les données en corrigeant l'effet de la topographie. Pour donner un modèle en résistivités vraies, le logiciel a besoin d'un nombre d'itérations. Généralement, entre trois et cinq itérations (Loke 2014). Ce n'est pas forcément le profil qui a le plus grand nombre d'itérations qui est le modèle géologique le plus juste (Loke 2014). Res2Dinv détermine à partir de la pseudo-section de résistivités apparentes mesurées une pseudo-section de résistivités apparentes calculées (Fig.IV.3) à partir de laquelle il associe à chaque bloc du modèle une valeur de résistivité vraie (Loke 2015). La méthode d'inversion est décrite schématiquement dans la figure suivante (Fig.IV.3).

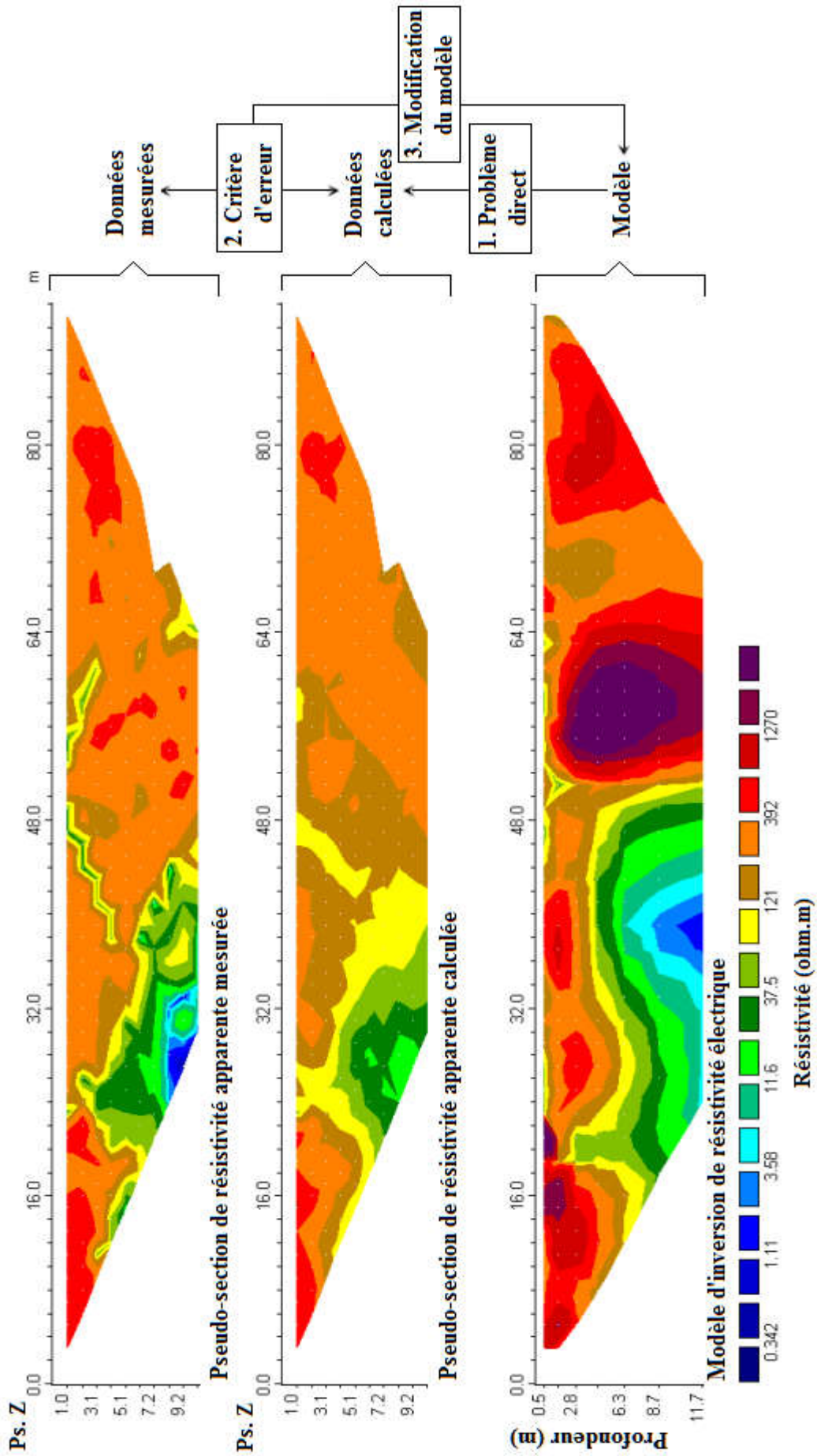


Fig.IV.3 Modalité d'inversion de la tomographie électrique dans le Res2Dinv (Manuel Saris).

L'erreur de mesure ou le bruit de contamination ont principalement des effets plus ou moins sur la résolution et la fiabilité de la technique de tomographie de résistivité. Pour appliquer la technique de tomographie électrique avec succès, une grande attention doit être exigée pour contrôler la qualité des données observées dans le terrain de travail à prospector, le traitement des données, et toute possibilité de minimiser les effets de toutes sortes d'erreurs doit être prise en compte. Pour cette raison, il est important d'étudier les erreurs des données observées et de comprendre leurs effets sur les résultats de tomographie électrique ([Zhou and Dahlin 2003](#)).

En général, il existe deux types d'erreurs de mesure qui causent le bruit de contamination selon [Zhou and Dahlin \(2003\)](#) :

- **Les erreurs d'espacements inter-électrodes**

L'erreur de l'écartement inter-électrodes est causée par l'erreur de mesure dans la position d'électrodes. La valeur d'erreur dans les données due à erreur d'espacement est relativement faible et dépend de type de dispositif ([Szalai et al. 2007](#)). Par exemple, une erreur d'espacement de 10 % peut être produite un effet de 20 % sur les valeurs de résistivité pour un dispositif Dipôle-dipôle, tandis que le Wenner et Wenner-Schlumberger ont donné des petites erreurs ([Dahlin 1993](#)).

- **Les valeurs aberrantes**

Les erreurs de mesure peuvent provenir de différentes sources, telles que : un mauvais contact des électrodes, endommagement du câble, bruit dans le site (courant tellurique, bruit des lignes électriques et source perturbatrice), les problèmes des instruments (mauvaise injection de courant) et mauvais fonctionnement de l'instrument. En outre, une densité de données suffisamment importante est fondamentale pour la résolution de structures compliquées [Aizebeokhai and Oyeyemi \(2014\)](#). Les erreurs de mesure peuvent être estimées par des mesures normales et réciproques. Toutefois, les analyses des erreurs de mesure pour différents sites et dispositifs montrent que l'erreur de mesure augmente en tant que la puissance de l'instrument diminue (force de signal). Par conséquent, les erreurs de mesure dépendent de l'intensité du signal et varient avec les sites et la configuration d'électrode.

Tous les types de bruit (mauvaises données) peuvent être supprimés. Les inversions lisses par moindres carrés (*smooth-constrained least-square*) sont plus sensibles aux erreurs de mesure

que l'inversion robuste, mais les deux techniques d'inversion peuvent produire des images similaires.

IV.3.3 Élimination des mauvaises mesures

Lors de l'enregistrement des mesures de résistivité sur le terrain, les points de mesures sont représentés selon différents niveaux d'acquisition (*Data levels*) et avec une échelle restreinte (Fig.IV.4). Cette représentation va faire ressortir les valeurs de résistivité aberrantes. Les erreurs aléatoires (*Random noise*) (bruits telluriques, courants parasites, etc.) sont en principe souvent éliminées lors du transfert du fichier depuis le résistivimètre (Marescot 2008). Les erreurs qui persistent ici sont essentiellement des erreurs systématiques (*Systematic noise*) provenant d'électrodes défectueuses. Si la résistivité mesurée est négative, elle est éliminée par le logiciel de transfert de fichier (Scintrex Utilities) (*Dumping data*). Les mesures avec une grande densité de données augmentent la qualité du résultat. Alors que, la diminution de la densité de données peut considérablement dégrader la qualité et la résolution du modèle inversé (Aizebeokhai and Oyeyemi 2014). Donc pour avoir un modèle fiable de résistivité, il est possible d'avoir de bonnes données.

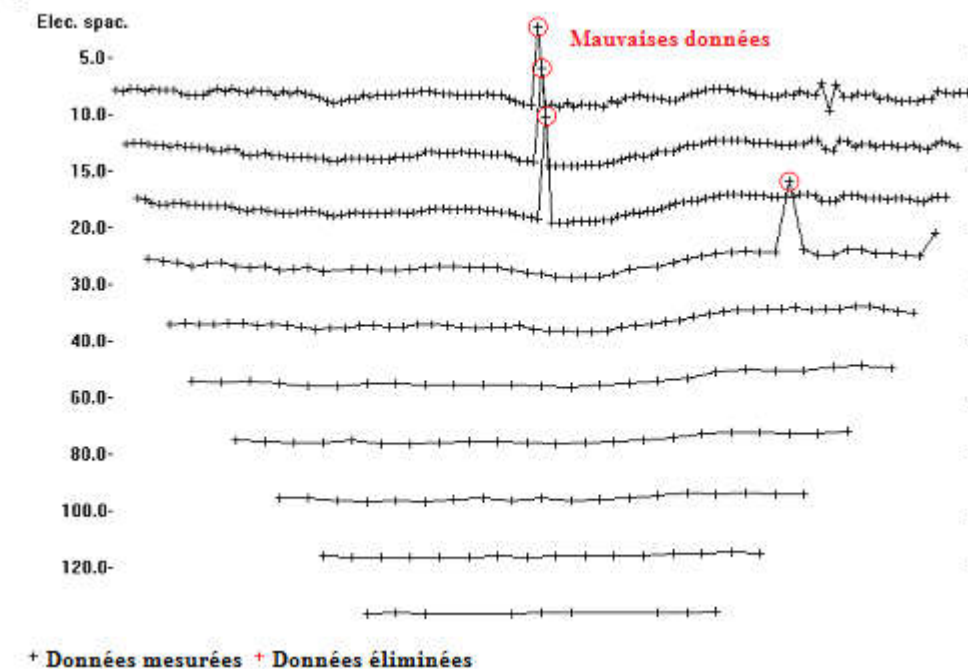


Fig.IV.4 Élimination des mesures douteuses (D'après Loke 2014, modifié).

IV.4 Paramètres utilisés lors de l'inversion

Il est possible dans le programme d'inversion d'effectuer différents paramètres afin de tenir compte des caractéristiques du terrain ou dans le but de parvenir à un résultat bien précis.

- **Mode « *Least square inversion* »** : la méthode conventionnelle “least-square inversion” tend à minimiser le carré de la différence des valeurs de résistivité apparentes et calculées, qui s’appelle aussi la norme L_2 . Cette méthode s’applique lorsque les données contiennent du bruit aléatoire ou « *Gaussien* » (Loke 2011). Elle produit un modèle avec une variation lisse des valeurs de résistivité (Ponton 2008).
- **Mode « *Robust inversion* »** : dans ce menu, il est possible d’utiliser la contrainte d’inversion des données “*Data inversion constraint*” et la contrainte d’inversion du modèle “*model inversion constraint*”. Pour chaque option, “*Data inversion constraint*” et “*Model inversion constraint*”, il est possible de choisir entre deux paramètres :
 - ***Standard constraint*** : La contrainte “*standard least-square constraint*” tend à minimiser le carré de la différence entre les résistivités apparentes mesurées et calculées. Cette méthode s’applique lorsque les données contiennent du bruit aléatoire ou « *Gaussien* », mais elle est moins appliquée lorsque le bruit n’est pas aléatoire ou provient d’un matériel défectueux.
 - ***Robust constraint*** : Ce paramétrage est moins sensible aux données bruitées mais propose une inversion avec une RMS sensiblement plus élevée. Le “*cut-off factor*” contrôle le degré de contrainte. Il permet de choisir le pourcentage à partir duquel les différences entre les valeurs calculées et mesurées sont considérées comme trop importantes, et réduit alors considérablement la différence entre les deux valeurs (Loke 2011).

Le programme tend à minimiser la différence absolue dans les valeurs de résistivités (nommé aussi la norme L_1). Ce paramètre tend à produire des modèles avec des interfaces bien dessinées entre les zones de résistivités différentes, et à l’intérieur de ces zones les gammes de valeurs de résistivités tendent à être les mêmes (Loke 2011). C’est une méthode bien adaptée pour délimiter des interfaces entre des unités géologiques, et notamment pour étudier en termes de variations de résistivités la structure interne d’un glissement de terrain.

De nombreuses options permettent aussi de changer certains paramètres comme la taille de blocs, la discrétisation du modèle, le nombre d’itérations, la méthode de calcul dans le cas de présence des données topographiques, la méthode de calcul lors de la modélisation, l’épaisseur des couches, le raffinement du maillage, etc. Et d’autres options supplémentaires lors la visualisation des modèles tel que l’échelle de couleur, l’échelle verticale et horizontale, localisation des points de mesure, l’affichage du modèle de résistivité ou conductivité, l’affichage sous-marin, l’affichage de sensibilité et en mode de suivi temporel, etc.). Cependant, dans certains cas on peut obtenir de meilleurs résultats en modifiant les paramètres qui contrôlent les processus d’inversion (Ponton 2008; Loke2011).

IV.5 Modèles synthétiques

Pour tester la possibilité d'identifier les structures géologiques à l'aide de mesures de résistivité, le logiciel **Res2Dmod** est utilisé pour simuler les pseudo-sections obtenues avec différents dispositifs de mesure. Le Res2Dmod, est un programme de modélisation qui permet de calculer la pseudo-section de résistivité apparente et de polarisation provoquée pour un modèle 2D du sous-sol défini par l'utilisateur. Le programme pourrait également aider l'utilisateur pour choisir le dispositif approprié pour différentes situations ou levés géologiques.

Les dispositifs supportés par ce programme sont : Wenner (Alpha, Bêta et Gamma), Wenner-Schlumberger, Pôle-pôle, Dipôle-dipôle, Pôle-dipôle et Dipôle-dipôle équatorial (Edwards 1977) et aussi pour les dispositifs non conventionnels avec un nombre illimité de configurations d'électrodes possibles (Dahlin and Zhou 2004; Loke et al. 2010). Comme nous l'avons déjà mentionné, chaque dispositif possède ses propres avantages et inconvénients. Ce programme aide l'utilisateur pour bien choisir le dispositif approprié pour un levé géophysique particulier, après avoir équilibré les facteurs tels que le coût, la profondeur d'investigation et la résolution.

IV.5.1 Théorie

Le modèle 2D utilise les deux méthodes pour la modélisation, concernant la méthode des différences finies ou la méthode des éléments finis. Il divise la sub-surface dans un certain nombre de blocs par l'utilisation des mailles rectangulaires (Fig.IV.5). Le programme repose sur la méthode de différence finie (MDF) pour calculer les valeurs de résistivité apparente avec précision (Dey and Morrison 1979; Loke 1994).

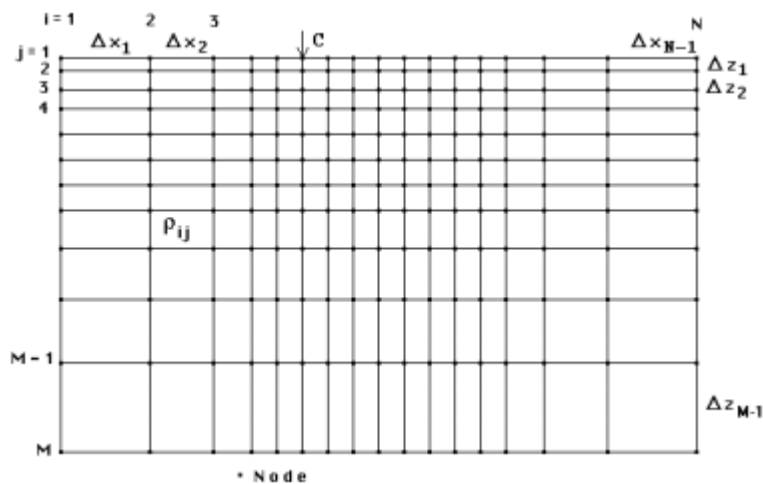


Fig.IV.5 Schéma de maillage généré par le programme Res2Dmod (Loke 2016).

On note, que le modèle de grille contient des colonnes N-1 et des lignes M-1 des blocs rectangulaires. Les blocs peuvent avoir différentes valeurs de résistivité. En utilisant un maillage suffisamment fin, on peut modéliser des structures géologiques complexes (Griffiths and Barker 1993; Dahlin 1996). Le programme utilise une maille avec deux ou quatre nœuds horizontaux par espacement d'électrode d'unité pour un dispositif multi-électrode. Le programme exige de fournir des valeurs de résistivité électrique des blocs entre les lignes de maillage et d'autres informations, en utilisant un fichier texte des données d'entrées (*Input model file*). Le format de ce fichier sera discuté dans l'annexe.

IV.6 Conclusion

La méthode de prospection électrique repose essentiellement sur l'interprétation de la résistivité électrique du terrain. Le quatrième chapitre présente la procédure du traitement, inversion et interprétation des données de tomographie électrique. Nous avons décrit les étapes de traitement et la procédure d'inversion des données de tomographie électrique en utilisant le logiciel Res2Dinv. Puis, nous avons présenté le programme de modélisation Res2Dmod pour modéliser les modèles synthétiques.

Les modèles d'inversion en imagerie électrique incluent à la fois le résoudre des problèmes inverse et direct. Dans le chapitre suivant, on présente des applications par simulation numérique dont le but à calculer les valeurs de résistivité à partir des modèles synthétiques modélisées.

Chapitre V.

Modèles synthétiques

V.1 Simulations de pseudo-sections

V.1.1 Première partie

V.2.1 Deuxième partie

V.2 Conclusion

V.1 Simulations de pseudo-sections

V.1.1 Première partie

Pour tester la possibilité d'identifier les structures souterraines, comme pour notre exemple les cavités souterraines à l'aide de mesures électriques, nous avons simulé par Res2Dmod, les pseudo-sections pour différents dispositifs au-dessus des cavités souterraines ayant des sections rectangulaires et circulaires. La première application, incluse dans ce chapitre sera publiée dans la revue « *Journal of Applied Engineering Science & Technology* » de l'Université de Biskra et la deuxième sera soumise dans la revue « *Geotechnical and Geological Engineering* ».

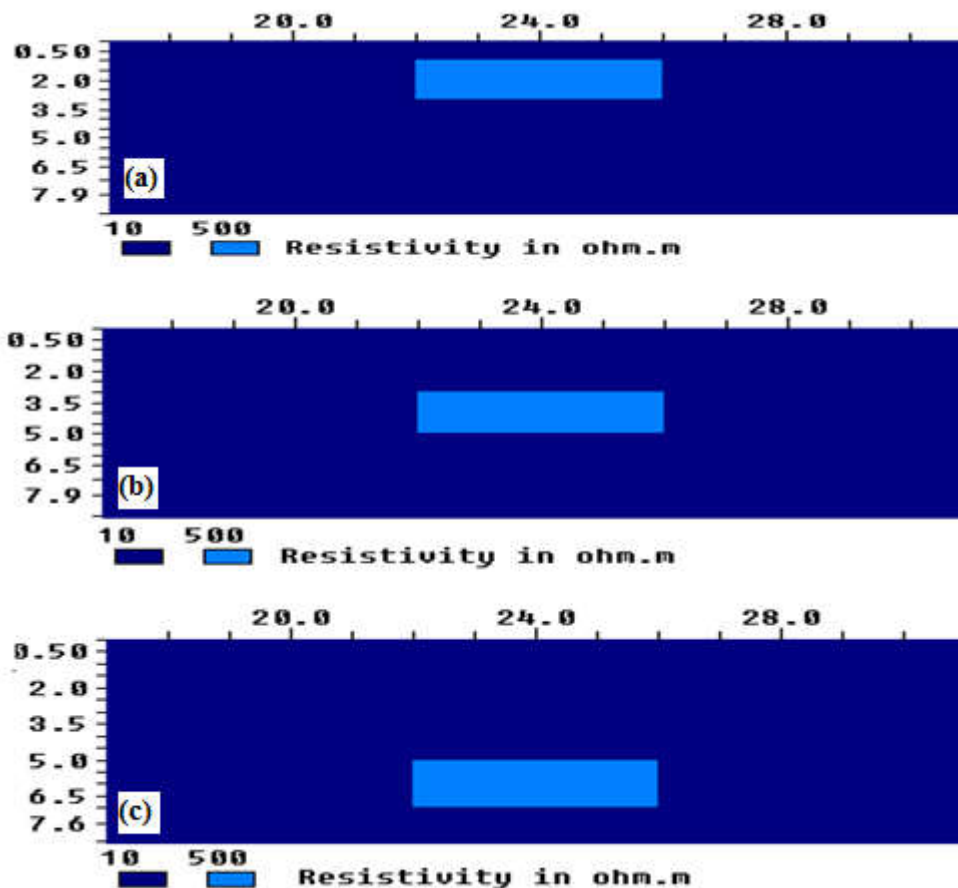


Fig.V.1 Les trois modèles synthétiques modélisés avec Res2Dmod. **a) Modèle 1:** une cavité de 2 m de haut sous une couche de 1 m d'épaisseur. **b) Modèle 2:** une cavité de 2 m de haut sous une couche de 3 m d'épaisseur et **c) Modèle 3:** une cavité de 2 m de haut sous une couche de 5 m d'épaisseur.

La cavité modélisée dans la présente étude est de forme rectangulaire dont les dimensions sont les suivantes : 2 m de hauteur et 4 m d'extension latérale, avec une valeur de résistivité de 500 $\Omega\cdot\text{m}$. Tandis que, le milieu encaissant (milieu homogène) a une résistivité de 10 $\Omega\cdot\text{m}$. Un dispositif de 48 électrodes espacées de 1 m pour améliorer la résolution, a été utilisé pour les différents dispositifs de mesures: Dipôle-dipôle, Pôle-pôle, Wenner et Wenner-Schlumberger. La position de la cavité est située au centre du profil ($x = 24$ m). Trois modèles synthétiques sont proposés (Figs.V.1a, b et c). Pour le premier modèle, la cavité est située sous une profondeur de 1 m, pour le deuxième modèle, la cavité est située à une profondeur de 3 m et le dernier modèle la cavité est située à une profondeur de 5 m. La modélisation des cavités a été réalisée avec le code de modélisation Res2Dmod (Ver 3.02.06), l'utilisateur peut choisir la méthode des différences finies (Dey and Morrison 1979), ou la méthode des éléments finis (Silvester and Ferrari 1996). Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode des différences finies pour calculer les résistivités.

L'inversion des trois modèles a été réalisée par le code d'inversion le plus utilisé Res2Dinv (Ver 3.71.116), en utilisant les options classiques d'inversion. Les valeurs obtenues de la résistivité apparente des modèles synthétiques ont été simulées sans incorporation de relief et sans bruit.

V.1.2 Résultats

Les pseudo-sections obtenues après l'inversion sont représentées sur les figures (Figs.V.5, 6 et 7) pour les différents dispositifs de mesures, tandis que les figures (Figs.V.2, 3 et 4) illustrent les modèles de chacun des dispositifs pour la détection d'une cavité au centre du profil et les pseudo-sections calculées.

Pour le premier modèle (Fig.V.1a), tous les dispositifs : Dipôle-dipôle, Pôle-pôle, Wenner et Wenner-Schlumberger (Figs.V.5a, 5b, 5c et 5d) ont indiqué raisonnablement la géométrie de la cavité, mais il y a une différence dans la position. Le Pôle-pôle et le Wenner sont les deux seuls dispositifs qui ont indiqué la position exacte de la cavité. Il est à noter, que les sections présentées sur les figures (Figs.V.2b, 2c, 2d et 2e) sont obtenues par l'interpolation des points de calculs, plus on va en profondeur moins de points mesure de calcul due à la perte de résolution de la méthode électrique.

En réalité, le choix idéal de dispositif pour une imagerie d'acquisition électrique dépend du type de structure à cartographier. L'espacement inter-électrodes joue un rôle important. Pour

mieux détecter une cavité, il faut que l'espacement inter-électrodes ne dépasse pas le diamètre de la cavité.

Pour le deuxième modèle (Fig.V.3a), la position et la géométrie de la cavité sont bien localisées par les différents dispositifs (Figs.V.6a, 6b, 6c et 6d).

Le troisième modèle illustré sur la (Fig.V.1c) montre qu'il existe un seul dispositif qui définit partiellement la cavité, il s'agit du dispositif Dipôle-dipôle (Fig.V.7a). L'erreur RMS représente la différence entre les valeurs mesurées et calculées, après 7 itérations. L'erreur RMS est comprise entre 0,28 et 0,7 %.

En conclusion, les quatre configurations testées dans la première partie permettent de bien déterminer la position latérale des cavités. Les résultats présentés de tous les dispositifs montrent que l'encaissant de la cavité joue un rôle important. Cependant, la détermination des limites supérieures et inférieures d'une cavité est bien cartographiée par le dispositif Dipôle-dipôle et plus ou moins avec le Wenner-Schlumberger.

A partir de ces modèles synthétiques, il est possible de connaître à la fois les avantages et les inconvénients de chaque dispositif de mesure utilisé dans l'imagerie électrique 2D. La résolution dépend aussi fortement de la configuration de mesure utilisée, et en particulier la distance inter-électrodes.

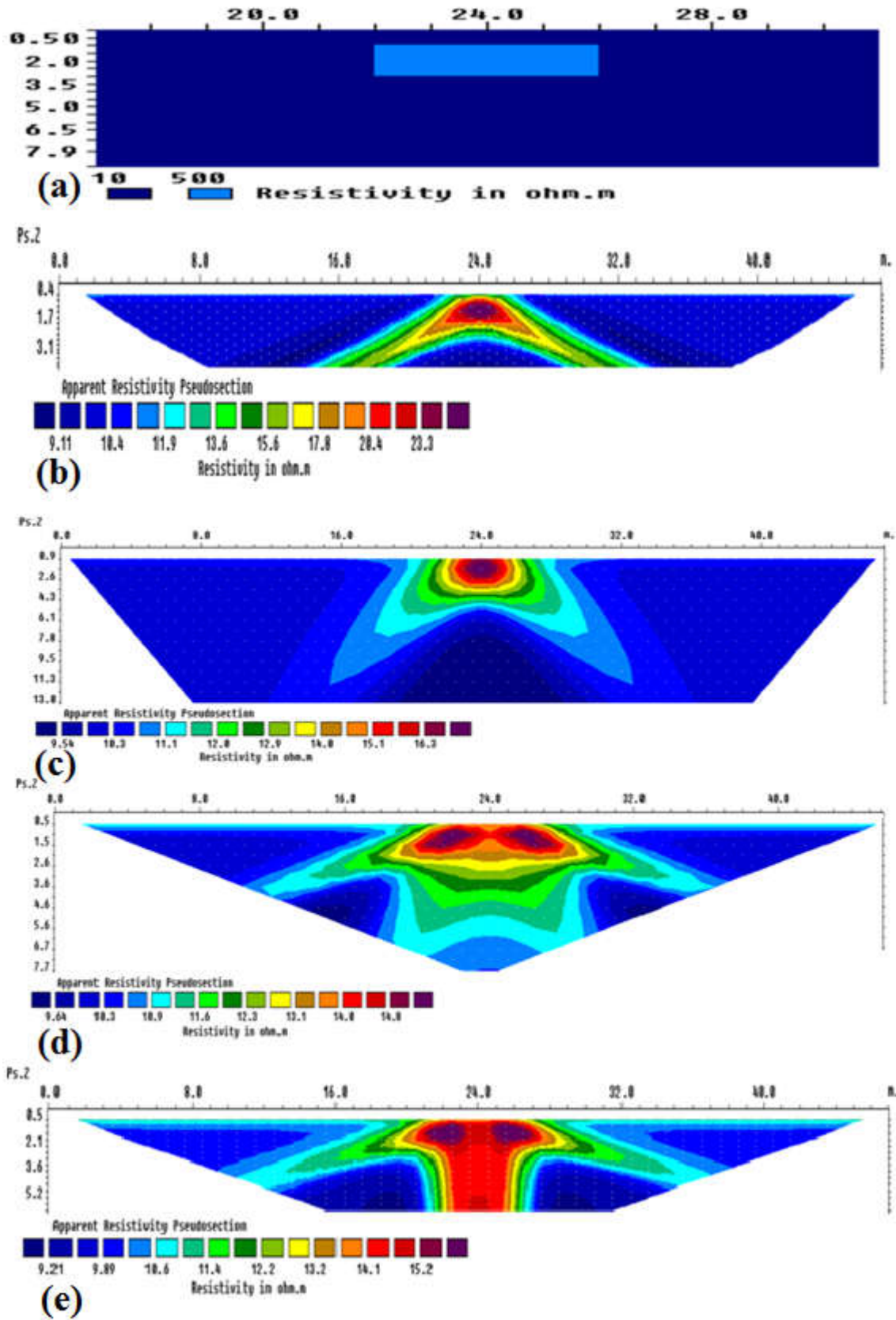


Fig.V.2 Pseudo-sections calculées pour le modèle 1 avec quatre configurations de mesure a) Modèle 1, b) Dipôle-dipôle, c) Pôle-pôle, d) Wenner Alpha et e) Wenner-Schlumberger.

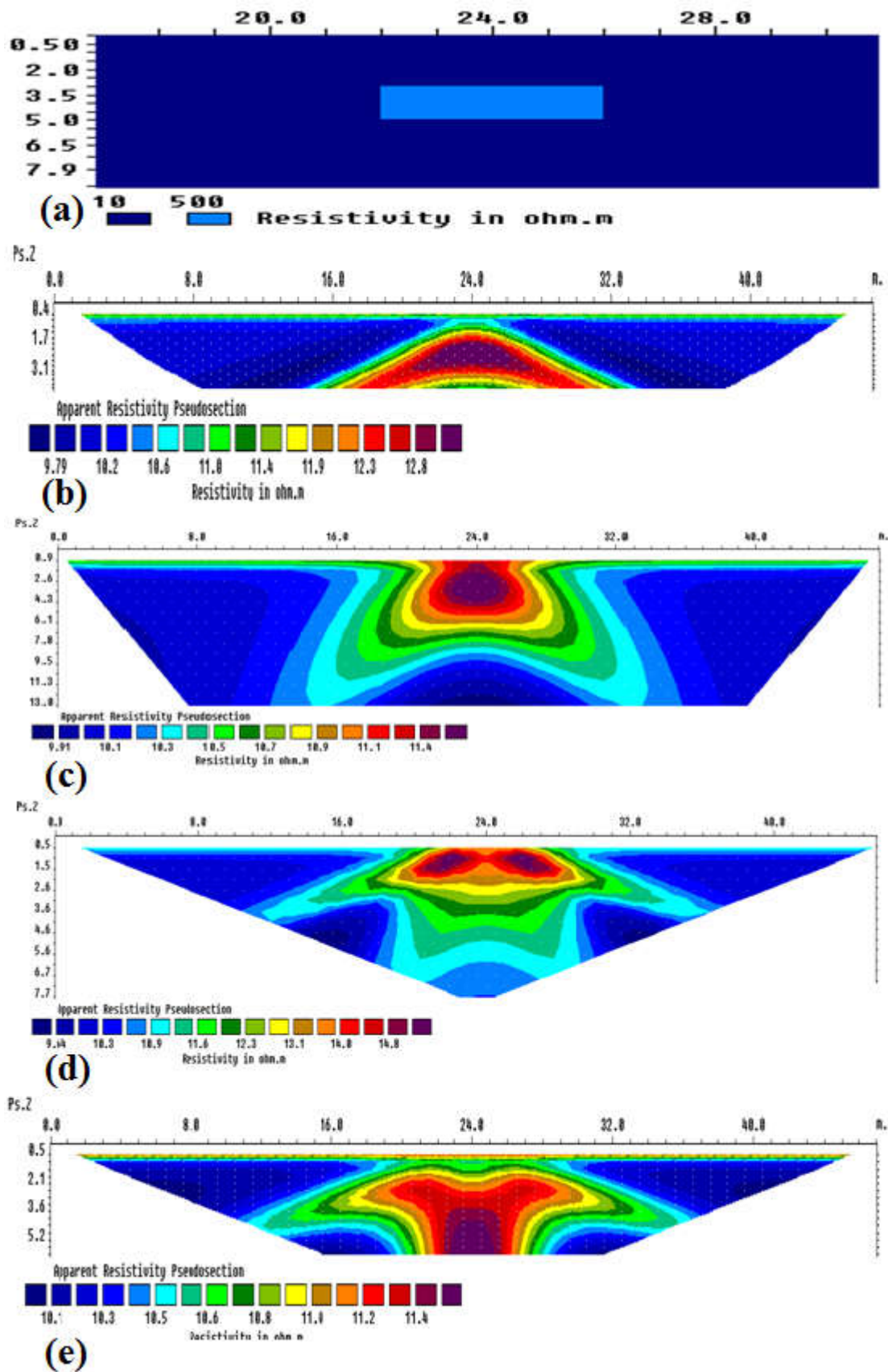


Fig.V.3 Pseudo-sections calculées pour le modèle 2 avec quatre configurations de mesure a) Modèle 1, b) Dipôle-dipôle, c) Pôle-pôle, d) Wenner Alpha et e) Wenner-Schlumberger.

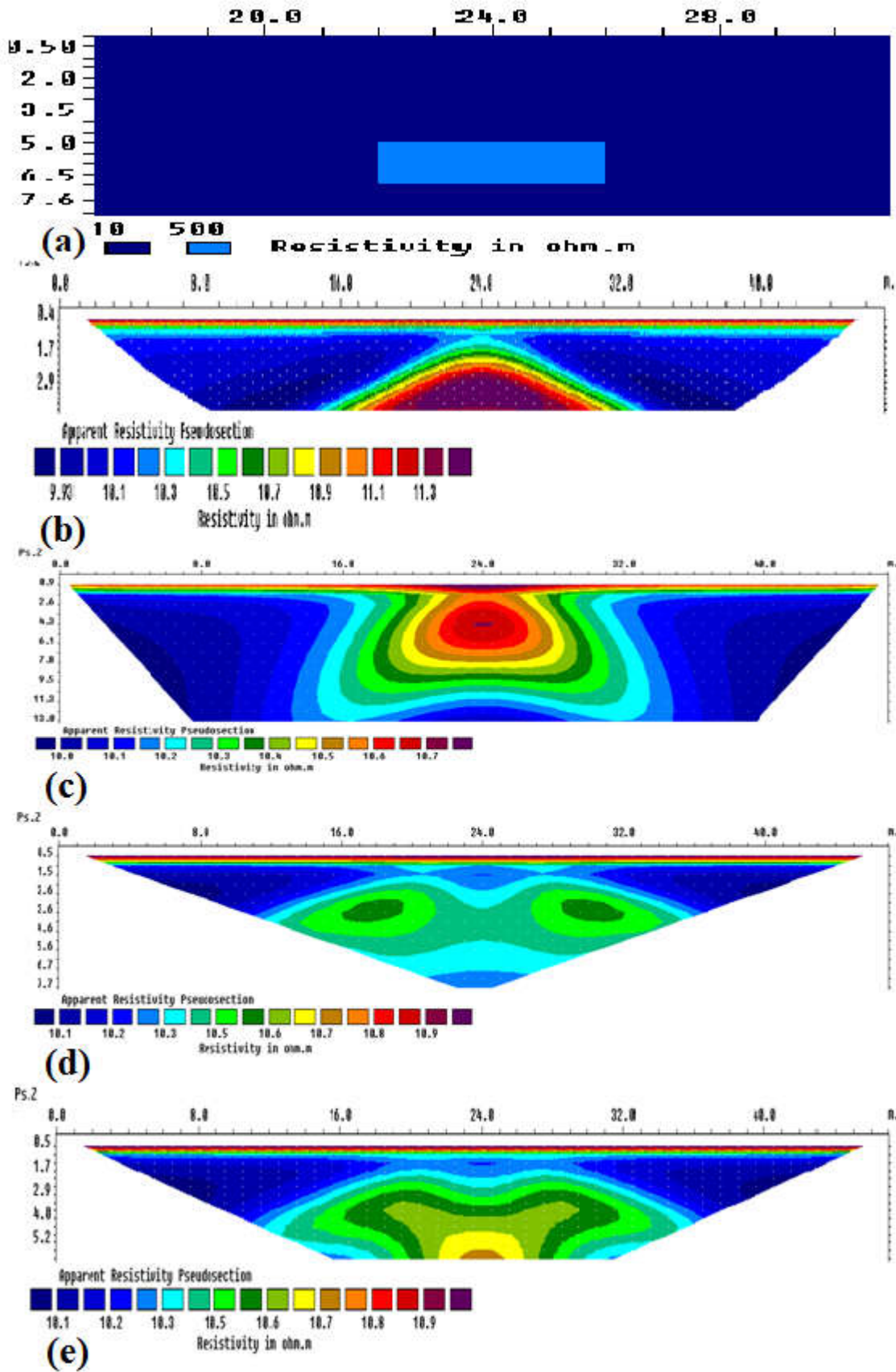


Fig.V.4 Pseudo-sections calculées pour le modèle 3 avec quatre configurations de mesure a) Modèle 1, b) Dipôle-dipôle, c) Pôle-pôle, d) Wenner Alpha et e) Wenner-Schlumberger.

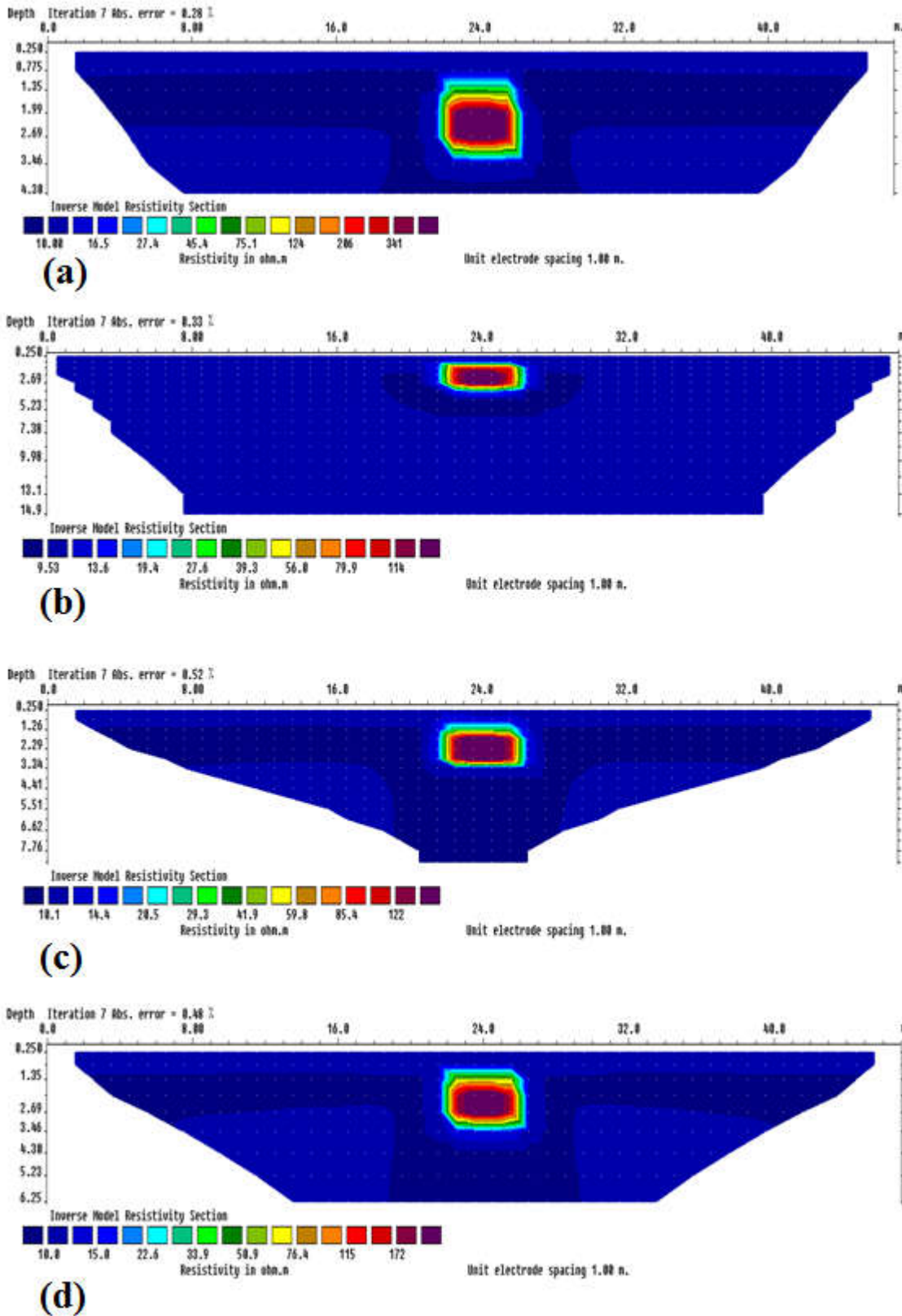


Fig.V.5 Pseudo-sections inversées pour le modèle 1 avec quatre configurations de mesure a) Dipôle-dipôle, b) Pôle-pôle, c) Wenner Alpha et d) Wenner-Schlumberger.

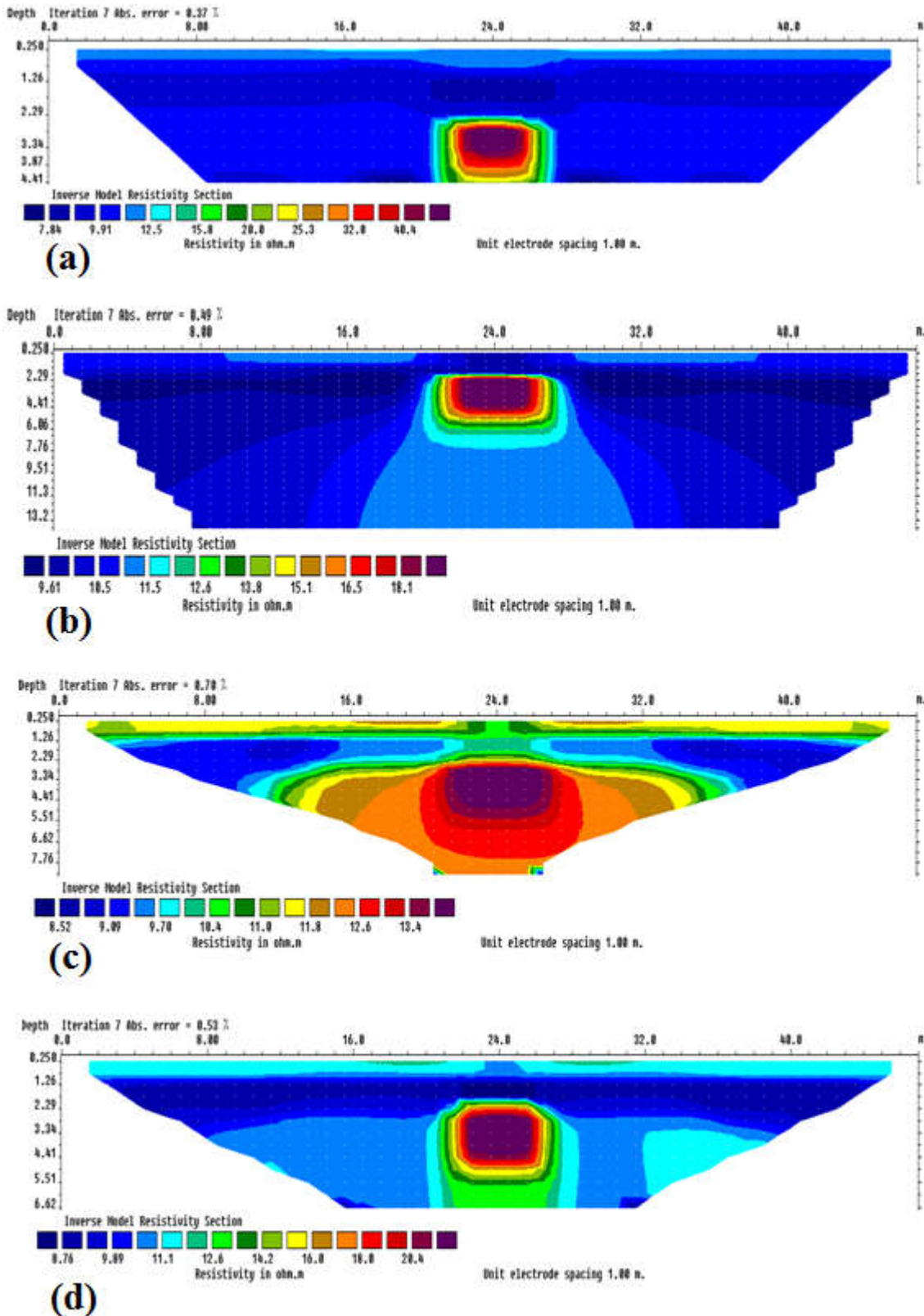
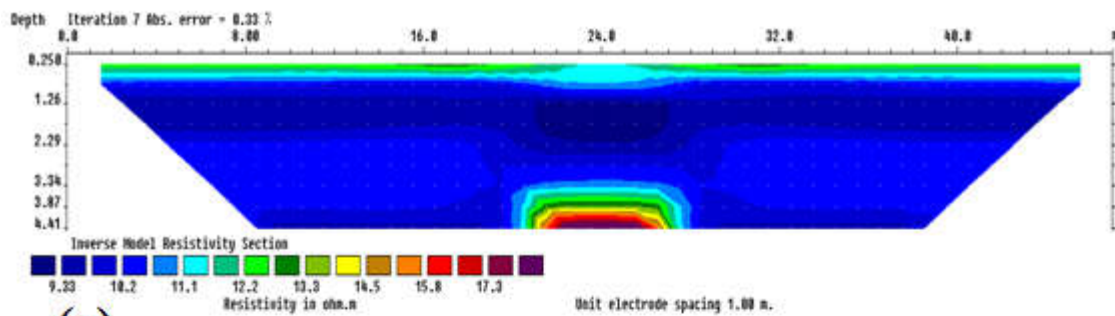
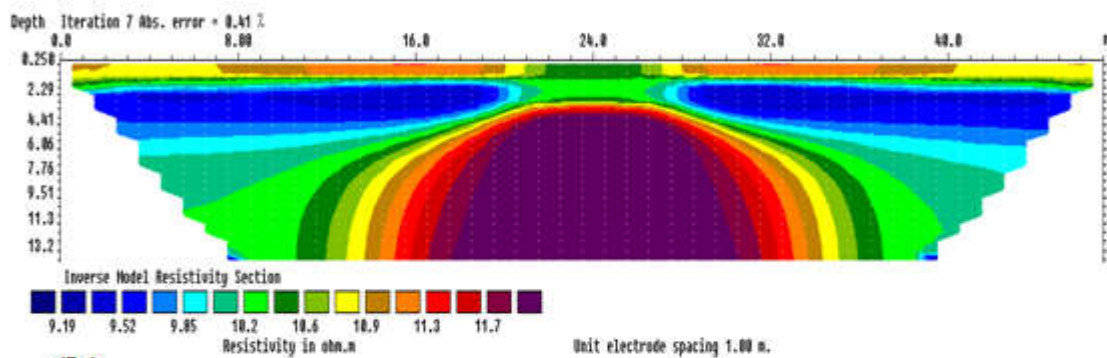


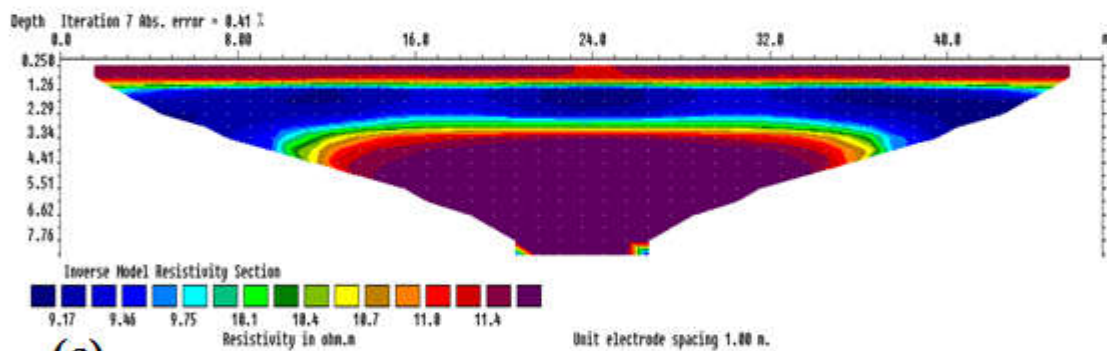
Fig.V.6 Pseudo-sections inversées pour le modèle 2 avec quatre configurations de mesure a) Dipôle-dipôle, b) Pôle-pôle, c) Wenner Alpha et d) Wenner-Schlumberger.



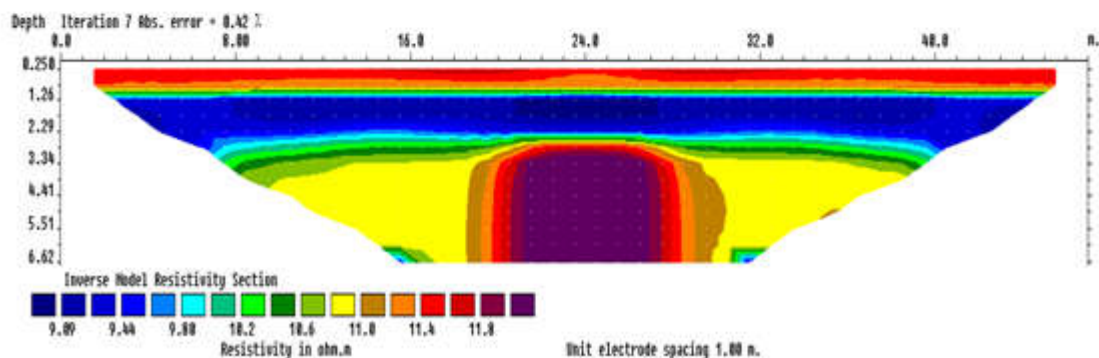
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.V.7 Pseudo-sections inversées pour le modèle 3 avec quatre configurations de mesure a) Dipôle-dipôle, b) Pôle-pôle, c) Wenner Alpha et d) Wenner-Schlumberger.

V.2.1 Deuxième partie

Le choix du meilleur dispositif en imagerie électrique dépend du type de structure à cartographier. Dans cette deuxième partie, nous avons testé numériquement le comportement de six dispositifs de mesures utilisés en tomographie électrique 2D. On a utilisé trois modèles synthétiques pour déterminer quel est le dispositif qui définit bien les structures verticales (cavités). Le recouvrement de la résistivité vraie dans le sous-sol est obtenu par la technique d'inversion.

L'objectif principal de cette étude numérique est d'examiner l'efficacité de la technique d'imagerie 2D pour détecter les cavités souterraines à sections circulaires dans des milieux conducteurs et résistants.

V.2.2 Méthodologie

La détection des structures sous la surface du sol à l'aide de la méthode de tomographie électrique, par différents dispositifs a besoin des informations a priori de la zone d'étude. Comme chaque dispositif présente ses propres caractéristiques (avantages et des limitations entre eux en termes logistique et résolution) (Dahlin 1993). La démarche utilisée dans la présente étude numérique est la suivante :

- ✓ Une modélisation numérique basée sur des modèles géométriques afin de calculer la résistivité apparente.
- ✓ L'inversion des données de la résistivité apparente théorique, et l'évaluation de leur qualité.
- ✓ La discussion des résultats obtenus.

V.2.3 Modélisation synthétique

Afin d'examiner la résolution des différents dispositifs, nous avons généré trois modèles synthétiques. Le premier modèle comprend trois cavités circulaires de 2 m de diamètre. La distance entre les cavités est de 4 m. Toutes les cavités sont situées dans le proche sous-sol à une profondeur de 1,5 m. Théoriquement, la valeur de la résistivité d'une cavité vide est beaucoup plus élevée que le milieu encaissant, typiquement entre $10^2 \Omega \cdot m$ et $10^7 \Omega \cdot m$. La première cavité, remplie d'air (vide) avec une valeur de résistivité de $1.000.000 \Omega \cdot m$ (magenta), a été prise pour simuler les conditions réelles. La deuxième, est une cavité semi remplie d'eau (magenta/bleu foncé), avec la valeur de résistivité de l'eau de $1 \Omega \cdot m$ qui

correspond à l'eau salée (Palacky 1987), et la troisième cavité est totalement remplie d'eau (bleu foncé) (Fig.V.8).

Pour la résistivité du milieu encaissant, nous avons choisi trois valeurs de résistivité : 10 $\Omega\cdot\text{m}$ pour le premier modèle, 50 $\Omega\cdot\text{m}$ pour le deuxième modèle et 250 $\Omega\cdot\text{m}$ pour le troisième modèle. Les modèles synthétiques de résistivité sont illustrés sur la figure V.8. En l'absence de données de résistivité de terrain, l'approche de modélisation directe est très utile pour générer la réponse de résistivité des structures du sous-sol. Elle fournit des données de synthèse qui sont équivalentes aux données mesurées sur le terrain. Dans toutes les simulations, les profils électriques ont 48 électrodes avec 0,5 m d'écartement, ce qui donne une longueur totale de 23,5 m pour tous les dispositifs : Pôle-pôle, Pôle-dipôle, Wenner, Wenner-Schlumberger, Dipôle-dipôle et Gradient.

La distribution de potentiel a été convertie en valeurs de résistivité apparente. Dans cette étude, une distribution de bruit a été ajoutée aux données synthétiques pour mieux simuler les conditions réelles et pour obtenir des modèles plus réalistes, avec deux niveaux différents de bruit de 5 % et 10 %. Le facteur de séparation n égal à 8 a été ajusté pour les dispositifs suivantes: Dipôle-dipôle, Pôle-dipôle (forward et reverse) et Wenner-Schlumberger. La figure V.9 montre les pseudo-sections du bruit contaminé par voltage dépendant du premier modèle synthétique. On peut voir que le Dipôle-dipôle est le dispositif le plus sensible au bruit par rapport aux autres dispositifs (Fig.V.9e). Les autres dispositifs sensibles au bruit sont Pôle-dipôle, Pôle-pôle, Wenner-Schlumberger et Gradient, tandis que le Wenner est insensible au bruit du fait de sa forte intensité de signal (Fig.V.9c).

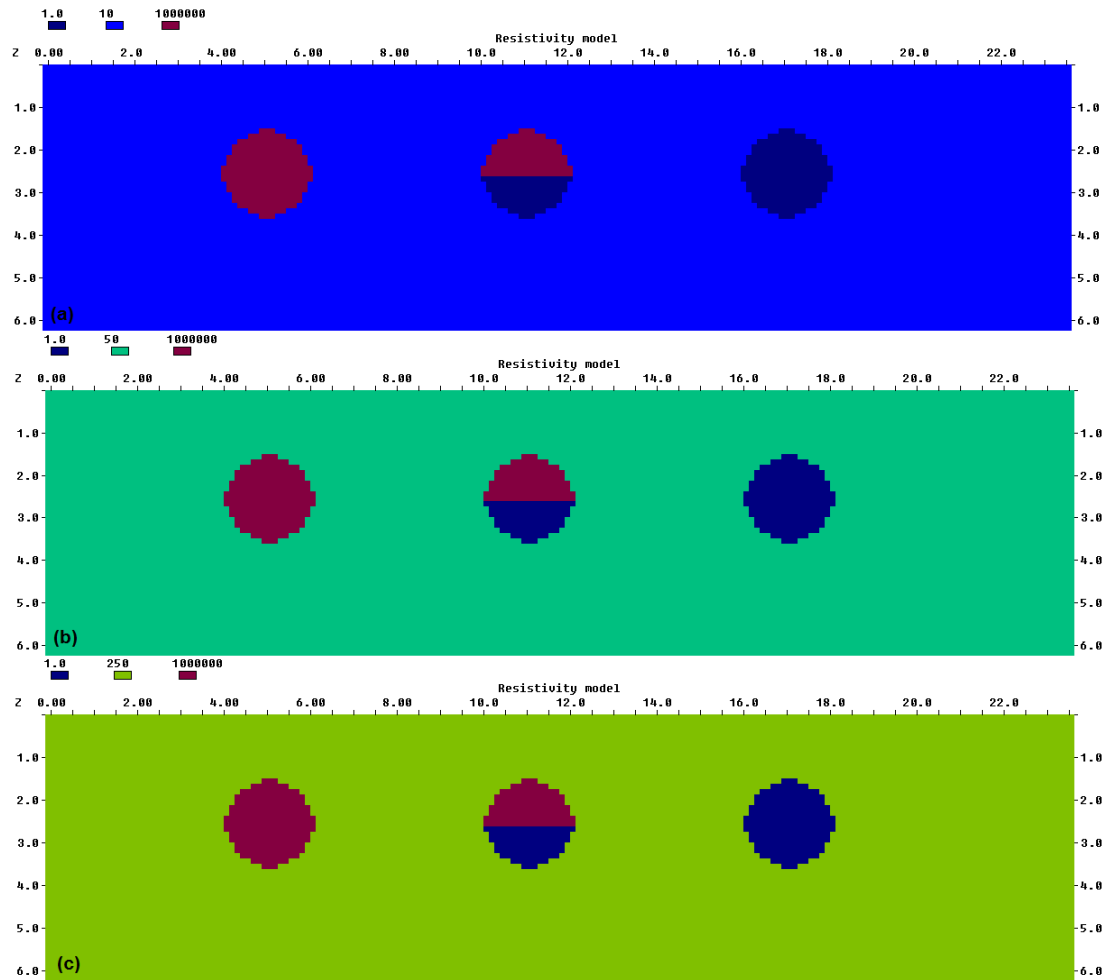


Fig.V.8 Les trois modèles synthétiques modélisés. **a)** modèle 1, **b)** modèle 2 et **c)** modèle 3. Le centre de chaque cavité est à $x = 5, 11,$ et 17 m.

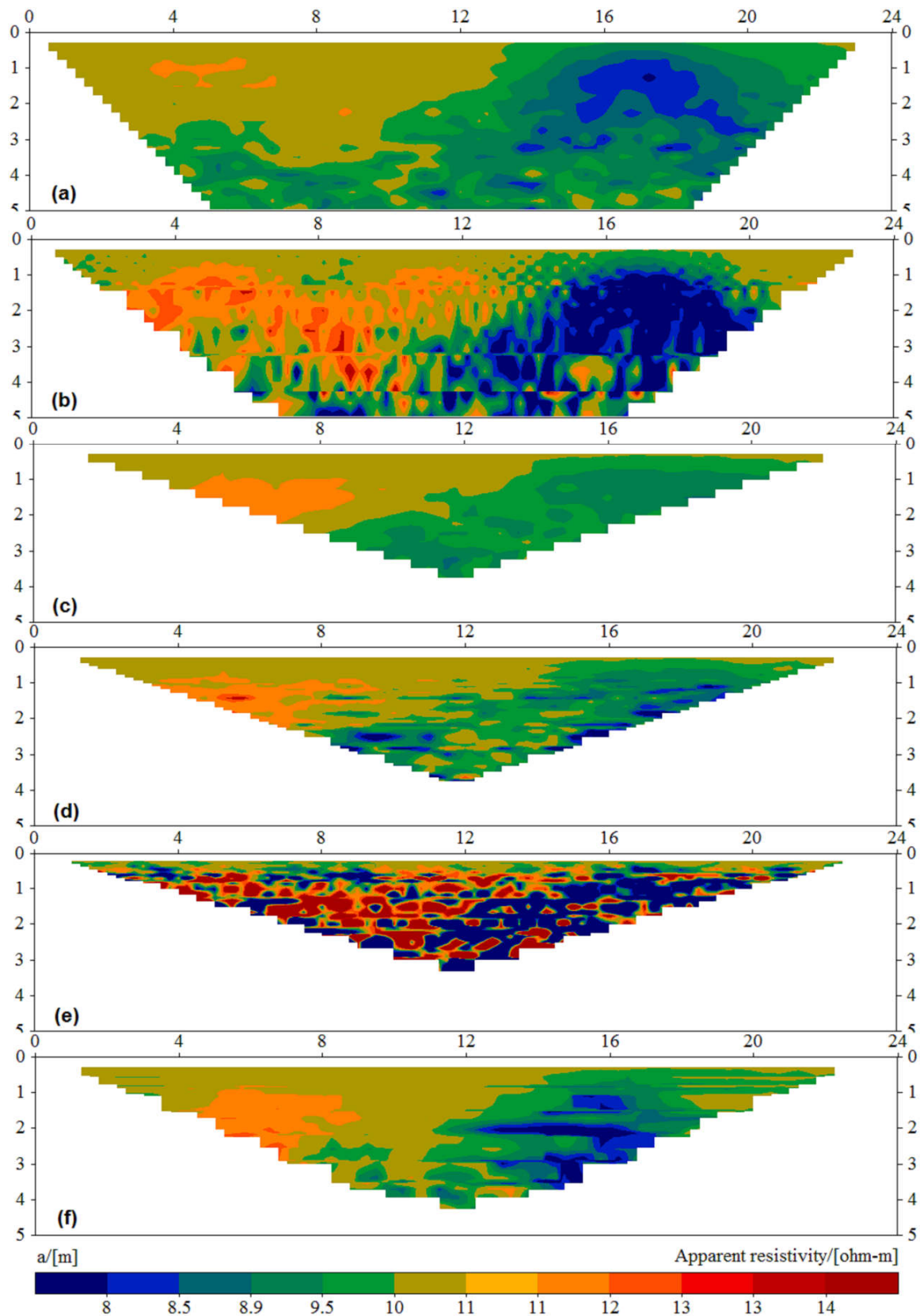


Fig.V.9 Pseudo-sections du bruit contaminé par voltage dépendant pour le premier modèle synthétique **a)** Pôle-pôle, **b)** Pôle-dipôle, **c)** Wenner- α , **d)** Schlumberger, **e)** Dipôle-dipôle et **f)** Gradient.

V.2.4 Résultats synthétiques

Les sections inversées obtenues pour les six dispositifs sont illustrées sur les figures ci-dessous (Figs.V.10, 11 et 12). L'option d'inversion "robuste" (norme L_1) a été utilisée. En principe, l'inversion robuste est supérieure au lissage (norme L_2). L'inversion par la norme L_2 tend à donner une plus grande importance aux données avec une erreur RMS plus grande, ce qui la rend plus sensible aux valeurs aberrantes. Les pseudo-sections sont visualisées par Erigraph.

Modèle 1

La figure V.10 montre les sections inversées de résistivité du premier modèle synthétique (Fig.V.8a) qui correspond aux dispositifs : Pôle-pôle, Pôle-dipôle, Wenner, Schlumberger, Dipôle-dipôle et Gradient. Les sections ont été contaminées par un bruit allant de 2 % pour le Wenner à 21,5 % pour le Dipôle-dipôle.

A partir de ces modèles inversés on peut voir que les dispositifs : Pôle-pôle, Pôle-dipôle et le Gradient ont donné les plus hautes résolutions et les meilleures images pour le premier modèle, même si la valeur moyenne du bruit de potentiel atteint 4,5 %, 7 % et 2,3 % respectivement (Figs.V.10 a, b, f). Les dispositifs Wenner et Wenner-Schlumberger ont donné de bons résultats. Ces derniers dispositifs ont donné aussi des images très claires du premier modèle (figs.V.10 d et c). Le dispositif Wenner ne donne pas une image fiable pour la cavité semi-remplie d'eau. Cependant, le dispositif Dipôle-dipôle a donné la mauvaise image pour le premier modèle avec une valeur d'erreur RMS (Root Mean-Square) de 21,5 %, en raison de la sensibilité de ce dispositif au bruit, et en plus de son faible signal.

Modèle 2

La figure V.11 montre les sections inversées de résistivité de deuxième modèle synthétique (Fig.V.8 b) obtenus toujours par l'option d'inversion "robuste" (norme L_1). Le bruit de potentiel varie de 1,5 % pour le dispositif Gradient à 25,5 % pour le Dipôle-dipôle. A partir de ces résultats, on peut voir que toutes les configurations d'électrode ont donné une faible résolution pour le fond de la cavité remplie d'eau (Fig.V.11). Les dispositifs : Pôle-dipôle et Gradient ont produit une meilleure résolution des sections que les autres dispositifs (Figs.V.11 b et f). Pour ces deux dispositifs, le bruit de potentiel atteint 1,9 % et 1,5 %, respectivement. Le dispositif Dipôle-dipôle a donné une mauvaise résolution pour ce modèle. La résolution près de la surface et en profondeur n'est pas aussi bonne comparativement aux autres

dispositifs. Le dispositif Dipôle-dipôle possède le plus haut niveau de bruit 25,5 %. On peut voir que le dispositif de Wenner-Schlumberger a produit légèrement une meilleure résolution de ce modèle que le Wenner. Mais, les deux dispositifs n'ont pas imagé la forme circulaire des cavités (cavité semi-remplie d'eau et la cavité totalement remplie d'eau) ainsi que le dispositif Pôle-dipôle. Les dispositifs : Wenner et Wenner-Schlumberger ont eu une faible contamination de bruit 2 % et 1,9 %.

Modèle 3

La figure V.12 montre les sections inversées de résistivité de troisième modèle synthétique (Fig.V.8c). Les sections inversées sont contaminées par un bruit de potentiel qui varie de 1,4 % pour les dispositifs : Pôle-pôle et Pôle-dipôle à 3,8 % pour le dispositif Dipôle-dipôle. A partir de ces résultats, on peut constater que toutes les configurations d'électrode ont donné une faible résolution pour le fond des cavités à détecter et en particulier de la cavité remplie d'eau. Cependant les taux de bruit dans ce modèle sont relativement faibles (Fig.V.12).

Les dispositifs : Pôle-pôle, Pôle-dipôle, Dipôle-dipôle et Gradient, ayant des niveaux de bruit de potentiel faibles, ont produit une meilleure résolution des images comparativement aux dispositifs Wenner et Wenner-Schlumberger. La résolution de dispositif Pôle-dipôle apparaît supérieure à celle du Pôle-pôle et Gradient. A partir de ces modèles inversés, on peut voir que le Pôle-dipôle et Dipôle-dipôle ont donné la résolution la plus élevée et la meilleure image pour le troisième modèle, même si la valeur de bruit de potentiel atteint 1,4 % et 3,8 %, respectivement (Figs.V.12b et e). Les meilleurs résultats suivants sont obtenus par les dispositifs Gradient et Pôle-pôle. Dans ce cas, le dispositif Dipôle-dipôle a produit une meilleure résolution et une image claire comparativement aux deux premiers modèles. La valeur du bruit aléatoire de potentiel de 3,8 % par rapport aux autres 21,5 % et 25,5 %. Les dispositifs Wenner-Schlumberger et Wenner ont donné la résolution la plus mauvaise pour ce modèle. Cela signifie que ces deux dispositifs ne sont pas adaptés pour détecter les structures verticales. Cependant, le dispositif Wenner-Schlumberger a donné légèrement une résolution meilleure que le Wenner.

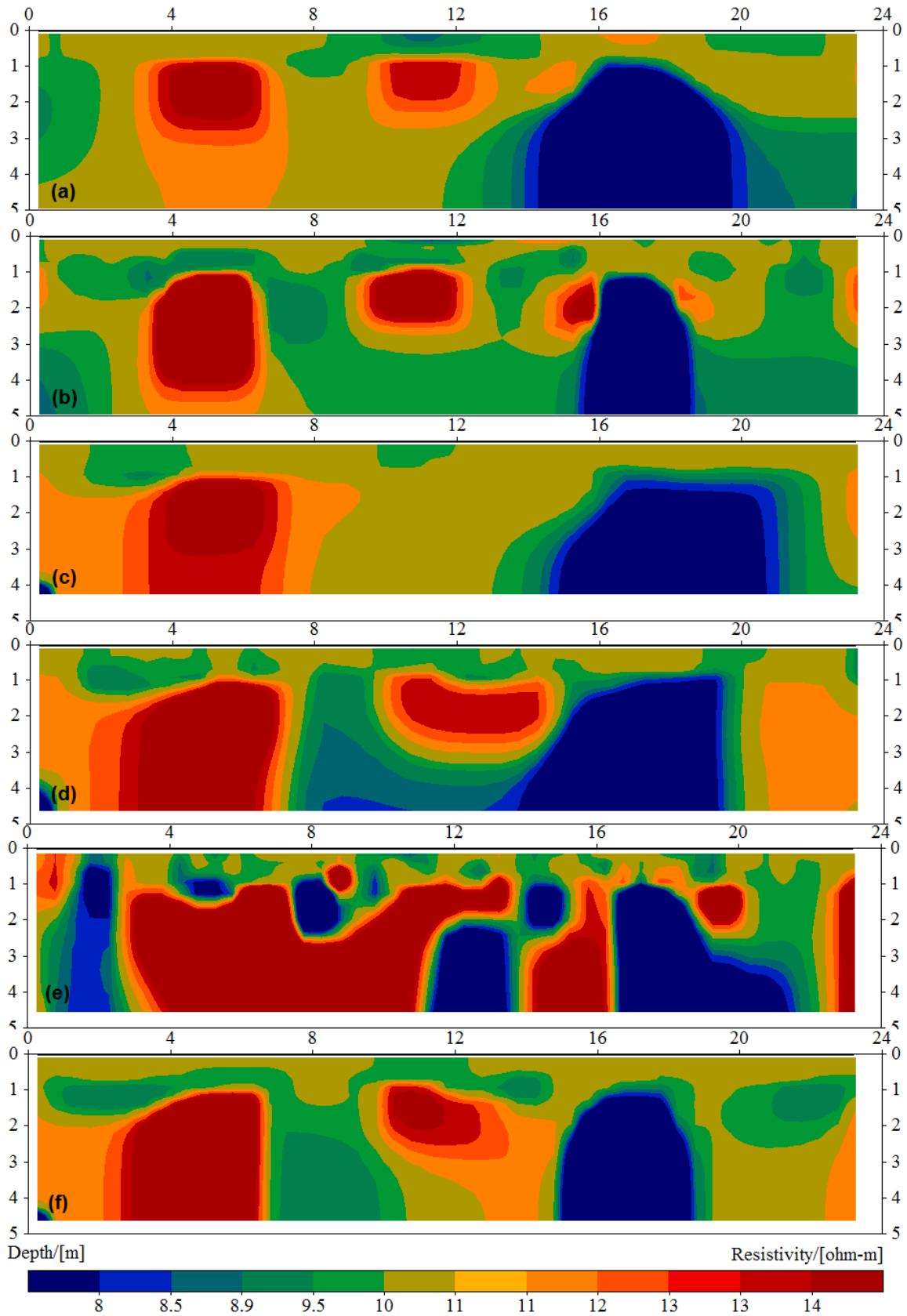


Fig.V.10 Modèles de distribution de résistivité inversée pour le modèle 1 avec les dispositifs suivants : a) Pôle-pôle, b) pôle-dipôle, c) Wenner- α , d) Schlumberger, e) dipôle-dipôle et f) gradient.

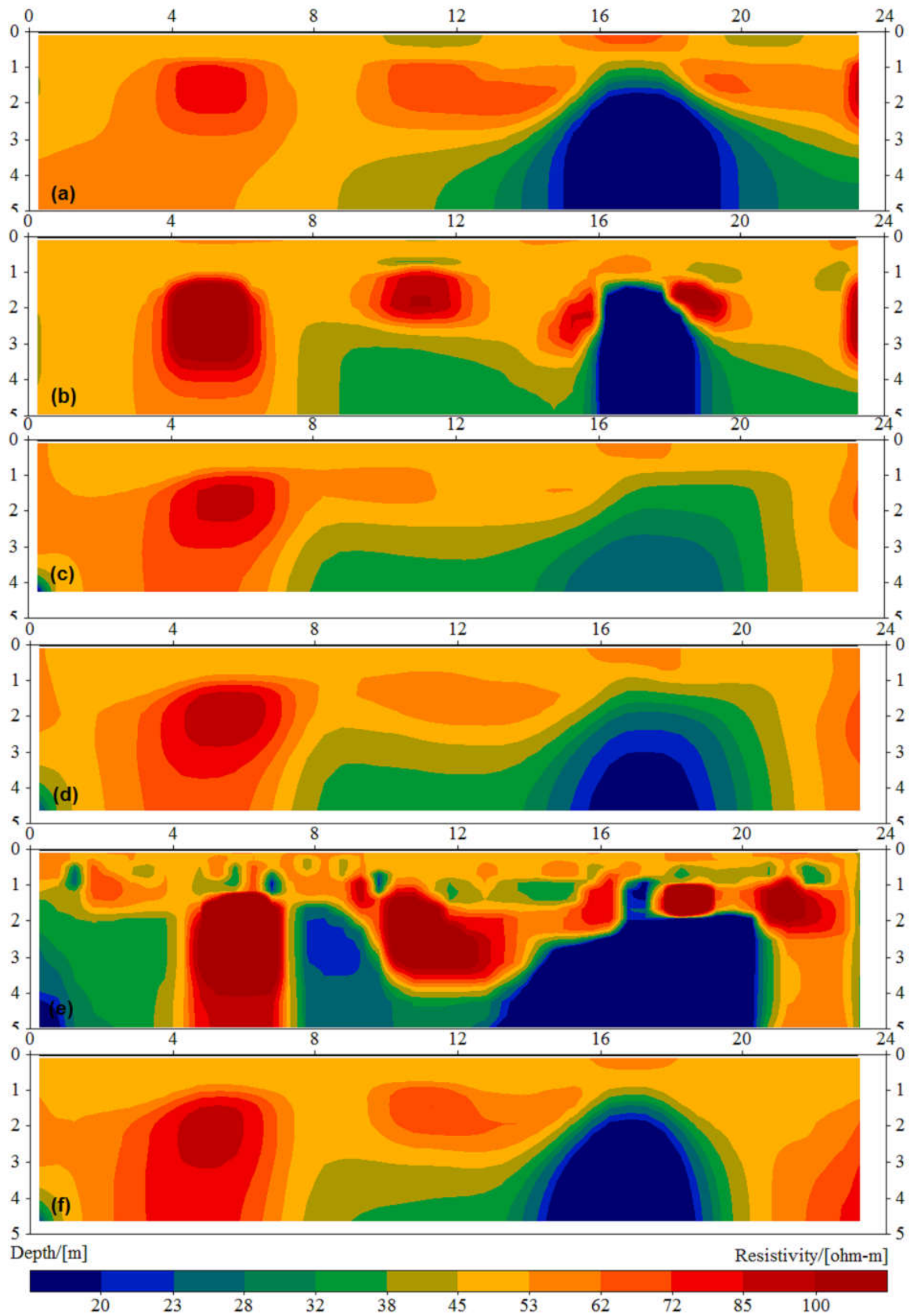


Fig.V.11 Modèles de distribution de résistivité inversée pour le modèle 2 avec les dispositifs suivants : **a)** Pôle-pôle, **b)** pôle-dipôle, **c)** Wenner- α , **d)** Schlumberger, **e)** dipôle-dipôle et **f)** gradient.

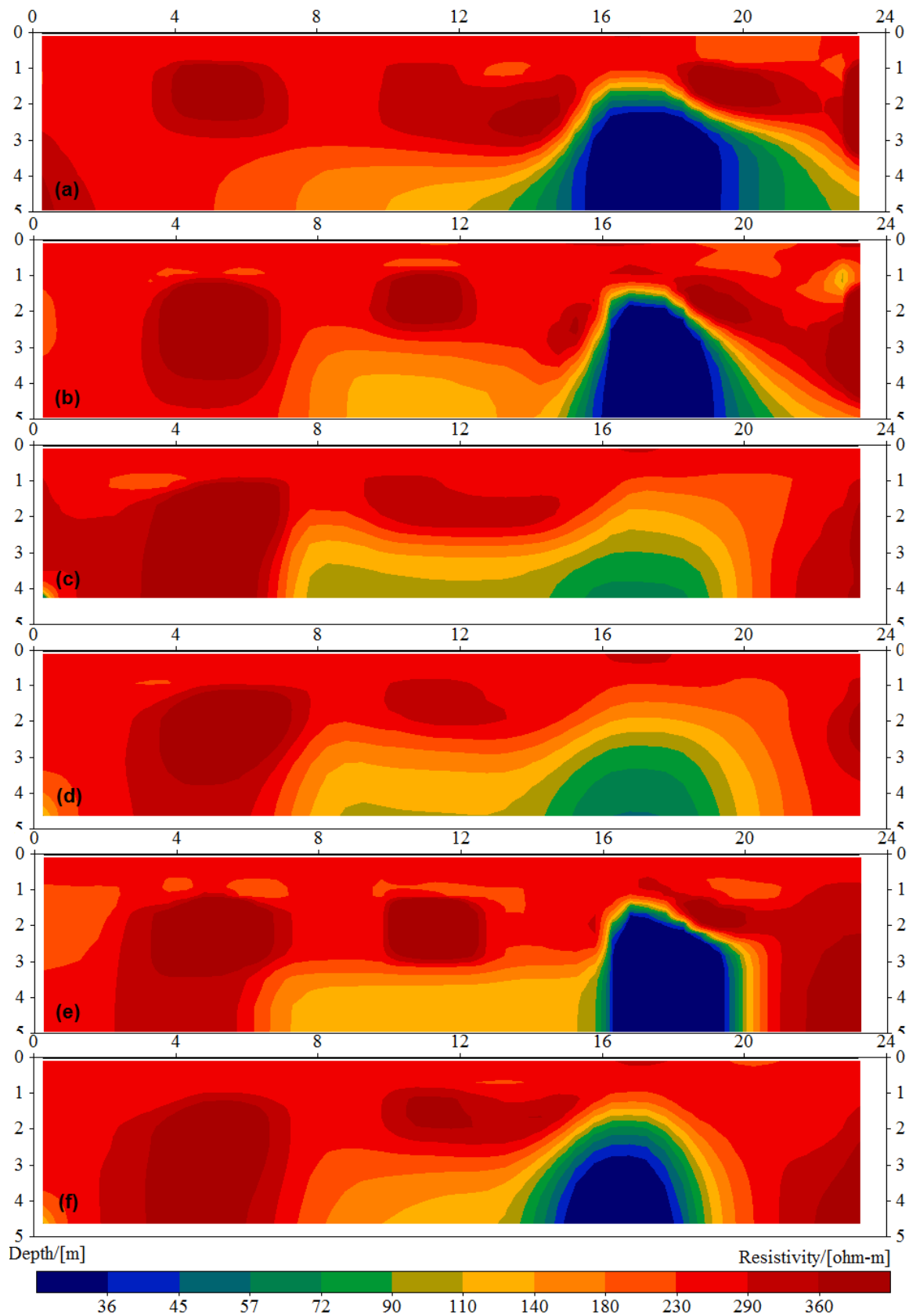


Fig.V.12 Modèles de distribution de résistivité inversée pour le modèle 3 avec les dispositifs suivants : **a)** Pôle-pôle, **b)** pôle-dipôle, **c)** Wenner- α , **d)** Schlumberger, **e)** dipôle-dipôle et **f)** gradient.

V.2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des modèles synthétiques afin de résoudre le problème direct. Dans la première application, nous avons conclu, que le Dipôle-dipôle est le meilleur dispositif pour détecter les cavités. Par la suite, les résultats de la deuxième application ont montré que les dispositifs : Pôle-pôle, Pôle-dipôle et Gradient sont bien adaptés à la détection des cavités souterraines proches de la surface, même s'il y a un taux de bruit comparativement aux autres dispositifs tels que le Wenner et le Schlumberger. Mais, le dispositif d'électrode Dipôle-dipôle n'a pas donné des bons résultats.

Chapitre VI.

Applications de la tomographie électrique

VI.1 Matériel d'acquisition et traitement des données

VI.2 Instrumentation

**VI.3 Application de l'imagerie électrique 2D pour la caractérisation du sol à Tiaret
(Nord-Ouest de l'Algérie)**

**VI.4 Application de la tomographie électrique pour la détection des cavités souterraines
(Exemple de la ville de Tolga)**

VI.1 Matériel d'acquisition et traitement des données

Dans le cadre de cette thèse, nous avons utilisé le résistivimètre SARIS (*Scintrex Automated Resistivity Imaging System*) développé et manufacturé par la compagnie Canadienne Scintrex (www.scintrexltd.com). Le matériel d'acquisition automatique est représenté sur la figure suivante (Fig.VI.1).

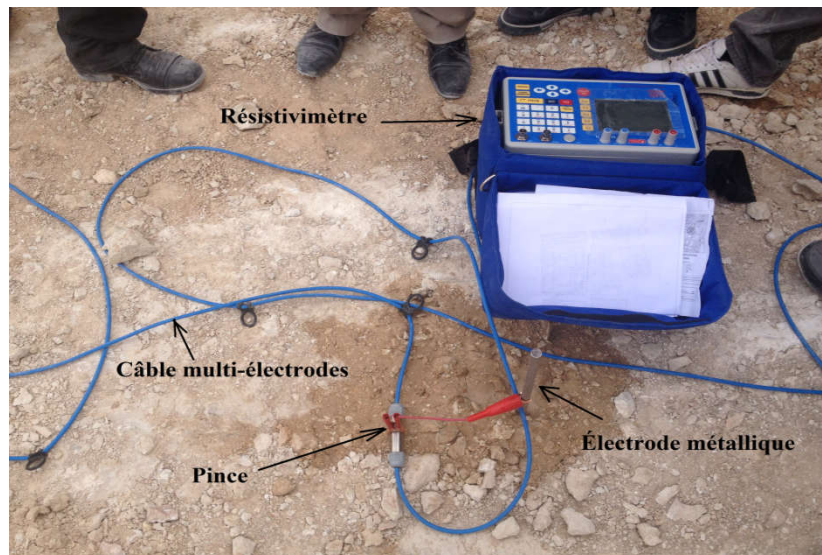


Fig.VI.1 Matériel d'acquisition multi-électrodes.

VI.2 Instrumentation

VI.2.1 Description du résistivimètre

Le résistivimètre SARIS est un instrument automatique moderne (Fig.VI.2).



Fig.VI.2 a et b résistivimètre SARIS de Scintrex.

Le système complet est équipé de câbles multi-électrodes et d'électrodes inoxydables de longueur 40 cm et de diamètre 15 cm. L'instrument est un résistivimètre complètement automatique de puissance élevée pour courant continu. Il est destiné pour : l'exploration des eaux souterraines à faible, moyenne et grande profondeur, la cartographie géologique, les études environnementales, la géotechnique, la recherche archéologique et pour les études géologiques structurales. Pour la prospection minière, le paramètre étudié est la polarisation provoquée (Chargeabilité) qui complète l'information donnée par la prospection électrique par courant continu (Résistivité).

Ce résistivimètre peut calculer la résistivité apparente de plusieurs dispositifs de mesures utilisés en tomographie électrique par exemple : Schlumberger, Wenner, Wenner Offset, Pôle-dipôle, Dipôle-dipôle, Pôle-pôle axial, Pôle-pôle latéral et Gradient. Ainsi que le sondage électrique vertical (SEV): Wenner-Schlumberger, Wenner, Wenner Offset et Dipôle-dipôle. La description du clavier de Résistivimètre SARIS est détaillée dans l'annexe.

L'instrument a une puissance de sortie maximale de 100W, le courant de sortie maximal est 1 A.

Les caractéristiques principales du résistivimètre SARIS sont :

- Émetteur et récepteur combiné de résistivité,
- Mesure de Rho et IP,
- Affichage graphique LCD 320 * 240 QVGA,
- Plus de 10.000 lectures,
- 100 heures de fonctionnement en veille,
- Interfaces de communication: USB et RS-232,
- GPS et inversion 1D in situ,
- Mémoire interne,
- Léger et efficace,
- Réglage automatique du courant pour minimiser la consommation d'énergie.

L'instrument est contrôlé par un micro-processeur pour ;

- Auto compensation de potentiel $\pm 1V$,
- Résolution de chargeabilité pour la polarisation provoquée de 0.1 mV/V,
- Gain automatique pour la mesure du courant et de la tension (voltage),
- L'écart-type (Déviation standard) est affiché pour donner une indication du niveau de bruit lors la mesure.

Dans la pratique, on trouve une valeur acceptable pour l'écart-type (*Standard Deviation*), qui ne doit pas dépasser $5 \Omega \cdot m$, dans le cas contraire les mesures sont entachées d'erreur.

Les erreurs suivantes augmentent la valeur de l'écart-type.

- Mauvaise connexion entre l'électrode et le terrain.
- Mauvaise connexion entre l'électrode et le câble (ou la pince) (Fig.VI.3).



Fig.VI.3 Mauvaise connexion entre l'électrode et le câble (ou la pince) (AL-Menshed 2011).

- L'inclinaison des électrodes provoque un mauvais contact électrode/sol (Fig.VI.4).



Fig.VI.4 Enfoncement incorrect de l'électrode dans le sol (AL-Menshed 2011).

- Touchée du câble pendant l'opération de mesure (Fig.VI.5).



Fig.VI.5 Touchée du câble pendant l'opération de mesure (AL-Menshed 2011).

- Touchée de l'électrode ou la pince pendant l'opération de mesure (Fig.VI.6).



Fig.VI.6 Touchée la pince pendant l'opération de mesure (AL-Menshed 2011).

- Mettre la pince près de la surface du sol tandis qu'elle est reliée à l'électrode (Fig.VI.7).



Fig.VI.7 Mettre la pince près de la surface du sol (AL-Menshed 2011).

- Mauvais contact entre le câble et la pince.
- Coupure du fil métallique à l'intérieur du câble.

Dans ce chapitre, nous présentons deux applications de la tomographie électrique pour la caractérisation des sols à Tiaret, Nord-Ouest de l'Algérie et pour la détection des cavités souterraines à Tolga (Willaya de Biskra), Sud-Est de l'Algérie. La première application incluse dans ce chapitre a été soumise au journal « *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* », et la deuxième a été publiée dans le journal « *Courrier du savoir* ».

VI.3 Application de l'imagerie électrique 2D pour la caractérisation du sol à Tiaret (Nord-Ouest de l'Algérie)

VI.3.1 Introduction

La caractérisation de sous-sol par les méthodes géophysiques est une technique très efficace. Elle offre la possibilité de recueillir de grandes quantités de données en 2D ou 3D, y compris ; la sismique, l'électrique, la gravimétrie et le géoradar, toutes ces méthodes sont utilisées pour mesurer la variation des propriétés physiques des sols, comme la vitesse de cisaillement, la densité et la résistivité des matériaux. Ces méthodes peuvent être utilisées pour donner des informations sur les propriétés du sous-sol, telles que la profondeur de la nappe phréatique, l'épaisseur des couches, la profondeur du substratum rocheux, l'emplacement des failles et les zones de fracture. L'objectif de cette étude est d'utiliser la méthode d'imagerie électrique 2D, pour étudier la structure du sous-sol, ainsi que pour détecter et cartographier les cavités souterraines et les fractures. Le site de levé géophysique se trouve près de la ville de Tiaret, Nord-Ouest de l'Algérie, à une altitude moyenne de $\sim 1165\text{m}$ au-dessus du niveau de la mer (Fig. VI.8a, b).

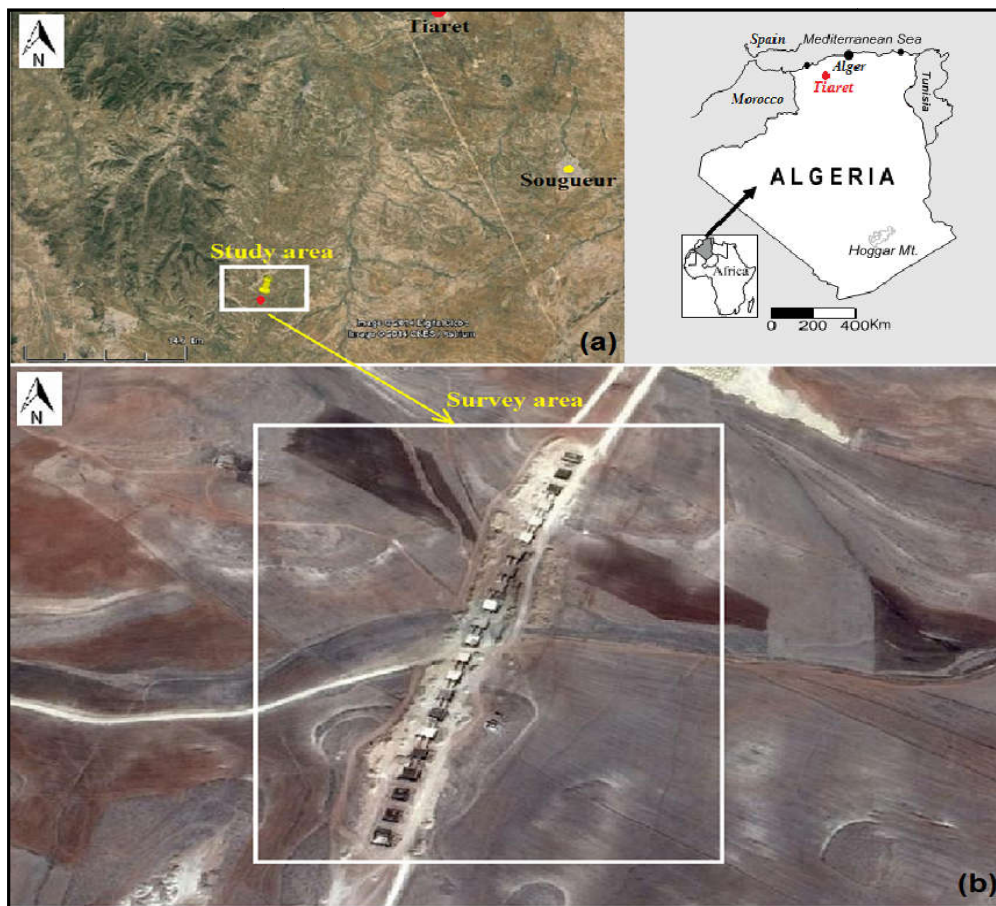


Fig. VI.8 a et b Carte de localisation montrant la zone d'étude.

VI.3.2 Géologie et hydrogéologie de la zone d'étude

La région de Tiaret est une zone de transition entre l'Atlas tellien au Nord et l'Atlas saharien au Sud. La région d'étude appartient au domaine "Hannania" qui forme une large bande comprenant les monts des Traras au Djebel Nador, près de Tiaret passant par les monts de Ghar Roubane. Les monts de Daia, les monts de Saida et enfin ceux de Frenda. La limite Nord-Est est constituée par l'Atlas tellien, celle du Sud par les hautes plaines. Cette région se caractérise sur le plan tectonique par une structure compartimentée de Horsts et de Grabbens. (Pendage des couches moyennes).

Les failles de directions Nord-Ouest/Sud-Est, prédominent et ont rejoué à plusieurs reprises lors des différentes phases tectoniques. Ces failles ont donné naissance aux principales structures en Horsts et Grabbens. Le territoire de la Wilaya est constitué par des formations marines et continentales d'âge allant du Trias au Quaternaire. Les roches carbonatées, argileuses, et sableuses représentent un intérêt pratique pour les substances utiles. Les dépôts triasiques sont constitués de dépôts lagunaires (argiles, gypse, dolomies, marnes, sel gemme), localisés dans les noyaux des anticlinaux et dans les parties voûtées. Les roches carbonatées du Jurassique (calcaires, dolomies et marnes), les argiles et les grès sont les constituants principaux des formations montagneuses de la région (Fig.VI.9).

Dans la région d'étude, deux nappes aquifères peuvent être individualisées à savoir:

Nappe des formations plio-quaternaires

C'est un aquifère de remplissage qui se localise le long de l'Oued, son épaisseur ne dépasse pas la cinquantaine de mètres, il est formé essentiellement d'une formation alluvionnaire constituée d'éléments grossiers de sable et de limons, qui confèrent à cet aquifère une faible perméabilité. Ces eaux sont de qualité hydro-chimique médiocre, chloruro-bicarbonatée sodique à calcique. Elles sont exploitées au moyen de puits destinés à l'irrigation.

Nappe des formations du Jurassique :

Cet aquifère est caractérisé par un faciès carbonaté fissuré donnant ainsi à cet ensemble une perméabilité qui permet à l'eau de s'infiltrer et de circuler facilement à travers ce réseau de fissures. La nappe de cet ensemble, bien alimentée grâce à sa position haute, favorable à une bonne pluviométrie est caractérisée par une eau de bonne qualité hydro-chimique à faciès carbonaté calcique.

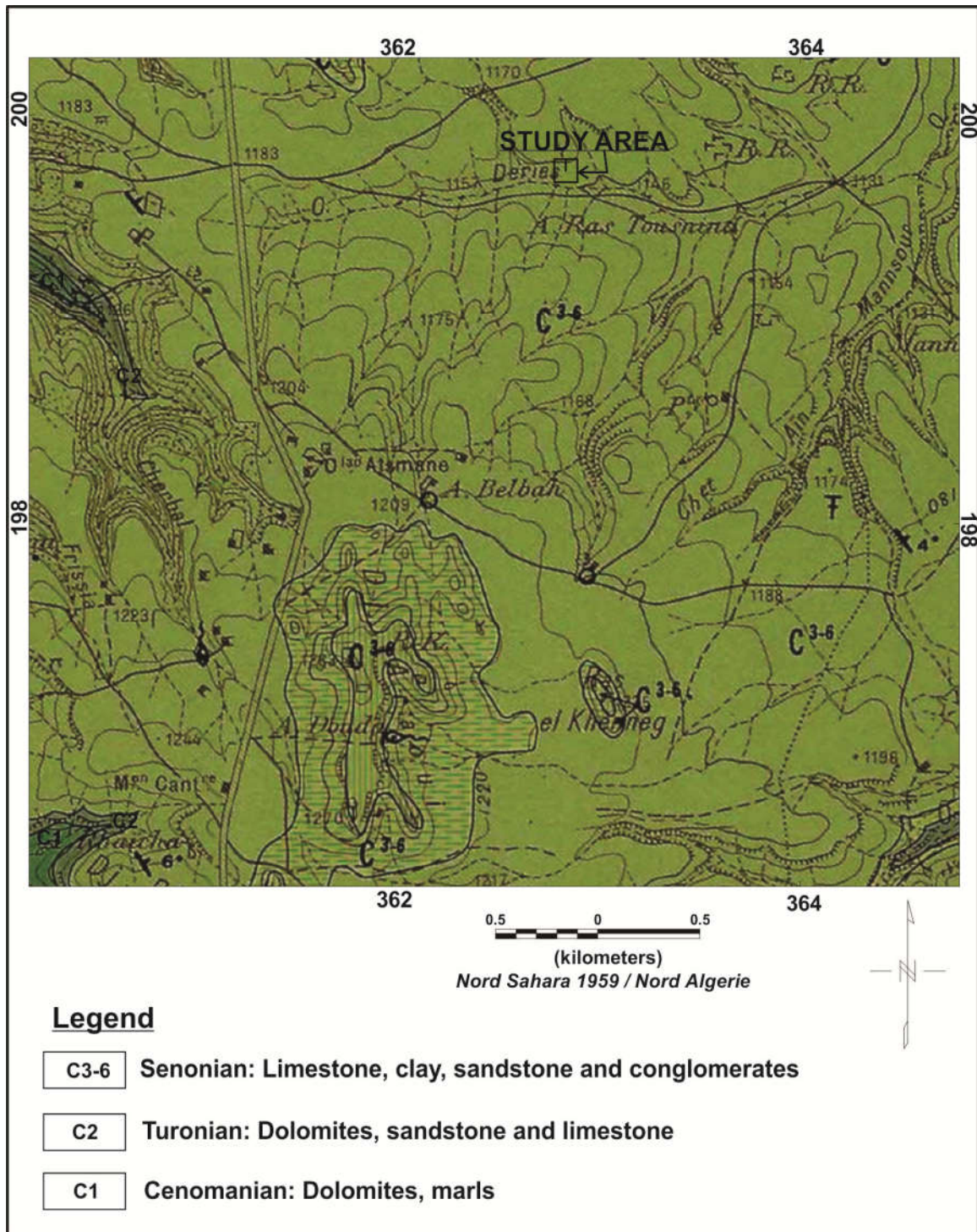


Fig.VI.9 Carte géologique de la zone d'étude (Extrait de la carte géologique de Frenda. Échelle 1:50000).

VI.3.3 Matériels et méthodes

Concernant la méthode utilisée dans cette étude, l'approche géophysique de tomographie électrique 2D a été utilisée.

VI.3.3.1 Méthodologie d'acquisition des données d'imagerie 2D

Dans la présente étude, la séquence de mesure pour recueillir les données de résistivité apparente 2D a été réalisée à l'aide du résistivitémètre IRIS Syscal junior.

La tomographie électrique a été réalisée à l'aide du dispositif Dipôle-dipôle (DD). Comme il est bien connu, le DD est très sensible aux variations horizontales de la résistivité, et par conséquent il est approprié pour cartographier les structures verticales telles que les murs enterrés, les cavités souterraines et les panaches de contamination (Loke 2001). Mais, relativement inapproprié pour cartographier les structures horizontales telles que les sills et les formations sédimentaires à stratification horizontale.

L'espacement inter-électrode (a) est choisi égal à 2,5 m, pour obtenir une meilleure résolution. Le levé d'imagerie électrique est contrôlé par deux paramètres; la longueur du dipôle a et le facteur de séparation n qui varie de 1 à 8. L'ordre (n) qui traduit le nombre de niveaux d'investigation était de 18 au maximum. Ce facteur définit la profondeur d'investigation atteint par le dispositif et qui est d'environ 12 m. Chaque électrode a été arrosée pour assurer un bon contact avec le sol. L'acquisition des données a été réalisée, en mode « roll-along » avec demi-couverture (Dahlin 1996; Dahlin and Bernstone 1997). Ce mode d'acquisition est largement utilisé pour obtenir un grand nombre de données lorsque le câble multi-électrodes et le nombre d'électrodes sont limités.

Deux profils parallèles de résistivité électrique ont été acquis (L1 et L2) respectivement, à une distance mutuelle d'environ 5 mètres (Fig.VI.10, lignes jaunes). Les roll-alongs sont réalisés respectivement à $x = 60$ m, $x = 120$ m, $x = 180$ m et $x = 240$ m. Chaque profil contient 2690 points de mesure. La longueur totale de chaque profil était de 357,5 m. Le levé géophysique est orienté SW/NE. Les mesures de topographie sont enregistrées au théodolite. Les données d'imagerie électrique acquises au cours de mesures sur le terrain sont représentées en pseudo-sections. Les données sont exportées en format Res2Dinv (voir l'annexe).

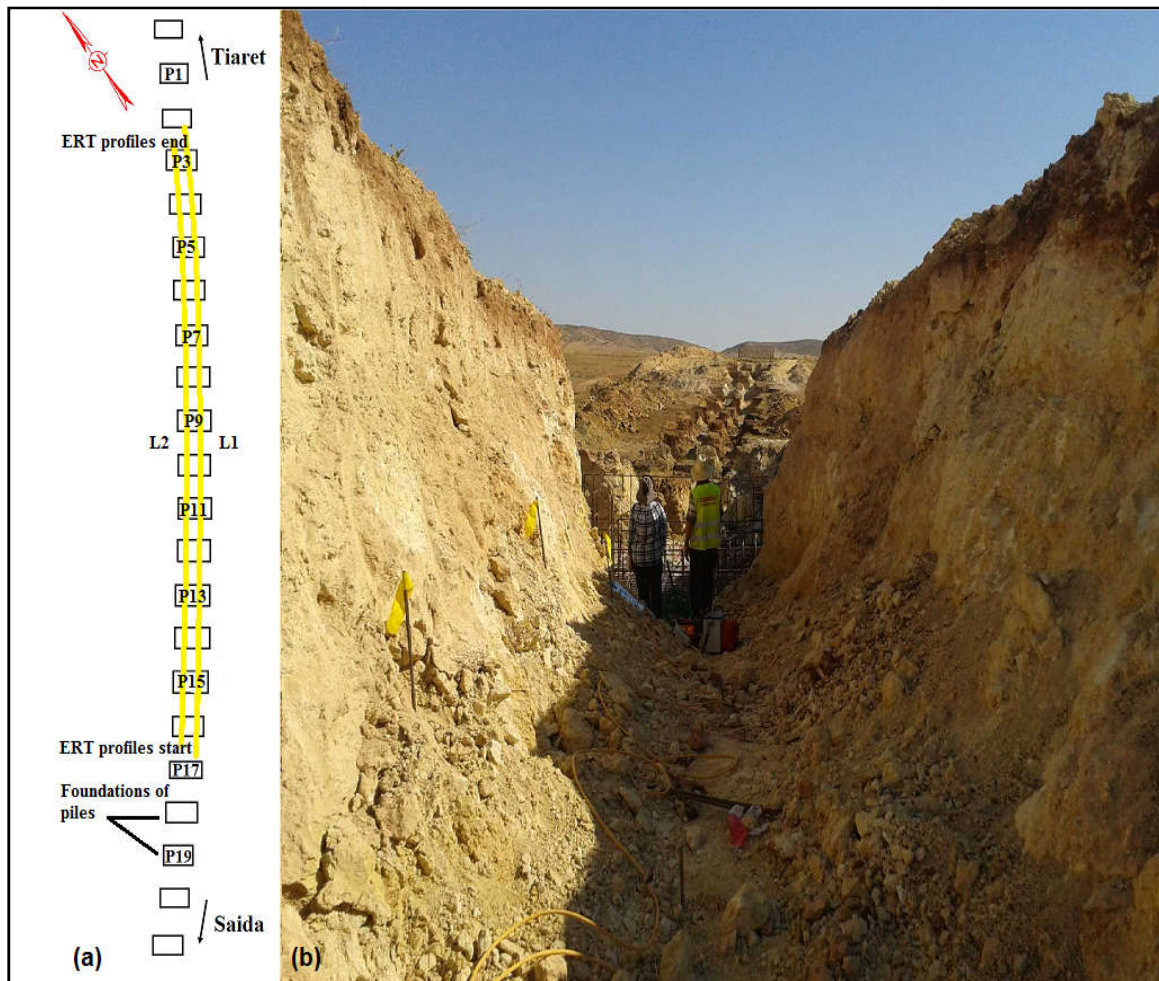


Fig.VI.10 Localisation des profils électriques (Image, 21 Août 2013).

VI.3.4 Traitement des données d'imagerie 2D

Les données brutes (*Raw data*) de résistivité apparente ont été traitées au moyen du logiciel Res2Dinv (ver 3.71.116), basé sur l'inversion des moindres carrés de résistivité apparente en utilisant la méthode quasi-Newton (Loke and Barker 1996). Le programme génère une image inversée de résistivité-profondeur du profil électrique, basé sur la technique d'optimisation par blocs (en anglais *méthode blocky/robust or L_1 norm*) (deGroot-Hedlin and Constable 1990; Sasaki 1992; Loke et al 2003). L'inversion par la norme L_1 (robust) donne des résultats plus précis en minimisant la différence absolue entre les valeurs de résistivité apparente mesurées et calculées. Les cavités et les zones de fractures dans la plupart des cas possèdent des limites géologiques nettes. Res2Dinv utilise la méthode des différences finies (MDF) ou de la méthode des éléments finis (MEF) pour calculer les modèles de réponse 2D.

La méthode des éléments finis est utilisée dans cette étude due à la présence de données topographiques sur le terrain. La méthode des éléments finis fournit des résultats plus précis.

Les données aberrantes et répétées ont été enlevées, environ 6 % de points de données douteuses ont été rejetées (Fig.VI.11). Selon une représentation judicieuse des mesures qui illustre les points par niveau d'acquisition avec une échelle très restreinte. Ce type de représentation fait ressortir les points, dont les résistivités sont très fortes ou très faibles par rapport à leurs voisines (Fig.VI.11). Un changement aussi rapide des valeurs ne pouvant être dû à un phénomène géologique, elles sont enlevées, afin qu'elles ne faussent pas les résultats de l'inversion.

Cette élimination n'a pas influé sur les données car nous disposons d'une couverture importante de l'ordre de 2690 mesures par profil. Un modèle de raffinement de maillage utilisé en raison des grandes valeurs de données de résistivité apparente observées. Les modèles de résistivité 2D inversés obtenus en utilisant la configuration Dipôle-dipôle sont représentés dans la figure (Fig.VI.12), avec des valeurs d'erreur RMS de 19,7 % et 19 % au bout de 5 itérations pour les deux profils L1 et L2 respectivement.

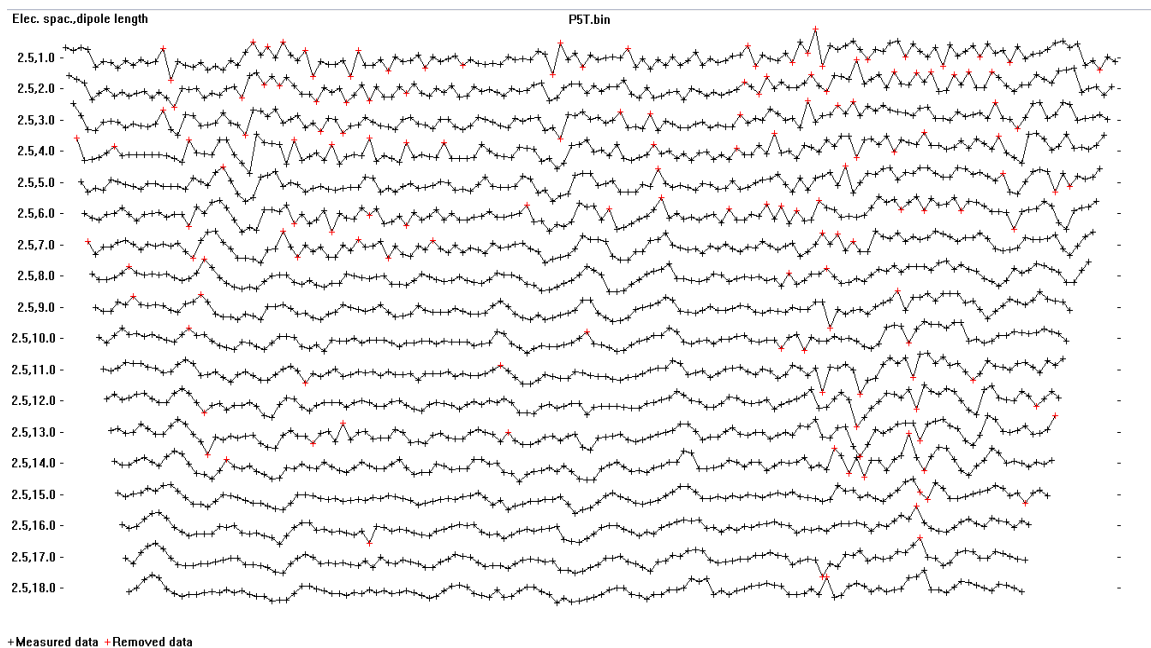


Fig.VI.11 Exemple d'élimination des mesures douteuses sur le profil L1.

VI.3.5 Résultats et discussion

VI.3.5.1 Interprétation des résultats de tomographie électrique

Les résultats obtenus de tomographie électrique 2D selon les deux profils L1 et L2 sont représentés sur la (Fig.VI.12), la profondeur maximale modélisée atteint ~12 m. L'examen des sections inversées sur les deux profils montre que la résistivité varie dans un large intervalle. D'un minimum de 2 $\Omega\cdot m$ jusqu'à un maximum de 1148 $\Omega\cdot m$ et plus.

Les sections inversées montrent clairement les changements de résistivité le long de deux directions horizontales et verticales. Les modèles géologiques provenant des profils d'imagerie électrique 2D nous a permis de distinguer trois différentes zones situées au milieu et sur les deux côtés gauche et droite de chaque profil, qui sont notées respectivement zone I, zone II et zone III. Les principales caractéristiques de ces sections sont décrites comme suit:

Zone I

Sur le côté gauche du profil L1, il y a une zone importante avec une valeur élevée de résistivité ($> 500 \Omega\cdot m$), qui est interprétée comme la présence de cavités souterraines dans le calcaire (intercalation stratigraphique de tuf et blocs de grès et de sable-marneux carbonatés) (Fig.VI.12). Cette zone de haute résistivité s'étend de l'abscisse 40 m à 70 m (pile P14 à P15), et à une faible profondeur allant de 2 à 4 m. En plus, une résistivité modérée d'une anomalie est située dans la profondeur à une altitude moyenne de ~1155 m, et entre les stations 20 à 40 m (couleur jaune Fig.VI.12a). D'autre part, une anomalie de résistivité élevée près de la surface telle qu'elle est interprétée comme une zone hétérogène sous la pile P14. La valeur de résistivité faible ($<10 \Omega\cdot m$) observée sous la pile P14 est située dans la profondeur à une altitude moyenne de ~1150 m, interprétée comme une zone saturée d'eau ou d'une fracture verticale.

Zone II

Dans la partie centre, et sous la station 160 m (P10), il y a une zone de résistivité modérée de valeurs, allant de 5 à 20 $\Omega\cdot m$ (marnes et tuf) peut être interprétée comme une fracture à une profondeur comprise entre 7 et 12 m. Une autre zone proche de la surface avec des valeurs de résistivité élevée ($> 500 \Omega\cdot m$), correspond la roche-mère (constitué de sable, de tuf et des couches de grès).

Zone III

Sur le côté droite du profil L1, il y a une zone qui s'étend de la station n° 240 m (P7) jusqu'à la fin du profil (entre les piles P3 et P7), et elle est défini par de nombreuses valeurs élevées de résistivité. On peut noter également la présence d'une anomalie conductrice sous la station position n° 320 m. L'interprétation de ces anomalies de faible résistivité comme l'effet de l'écoulement de l'eau à travers les fractures affectant les roches.

Le profil L2 possède des caractéristiques similaires au profil L1. En premier lieu, une résistivité élevée ($> 400 \Omega \cdot m$), d'une zone comprise entre les stations position n° 40 à n° 60 m (de P14 à P15) et à une profondeur de 2 à 12 m, interprétée comme un calcaire. Une zone anormale est située sous la station position n° 60 m semble être une fracture, correspondant un tuf et marno-grès affectés par des fissures verticales et obliques. Au centre de ce profil, une zone de faible résistivité ($< 10 \Omega \cdot m$) est située dans la profondeur à une altitude moyenne de ~ 1140 m. En outre, il y a une large zone (plus profonde), à partir du n° 240 m jusqu'à la fin du profil, avec une valeur de résistivité élevée 100 à $450 \Omega \cdot m$. Les images de la (Fig.VI.13) cartographie clairement la présence des cavités et des fractures dans la zone d'étude.

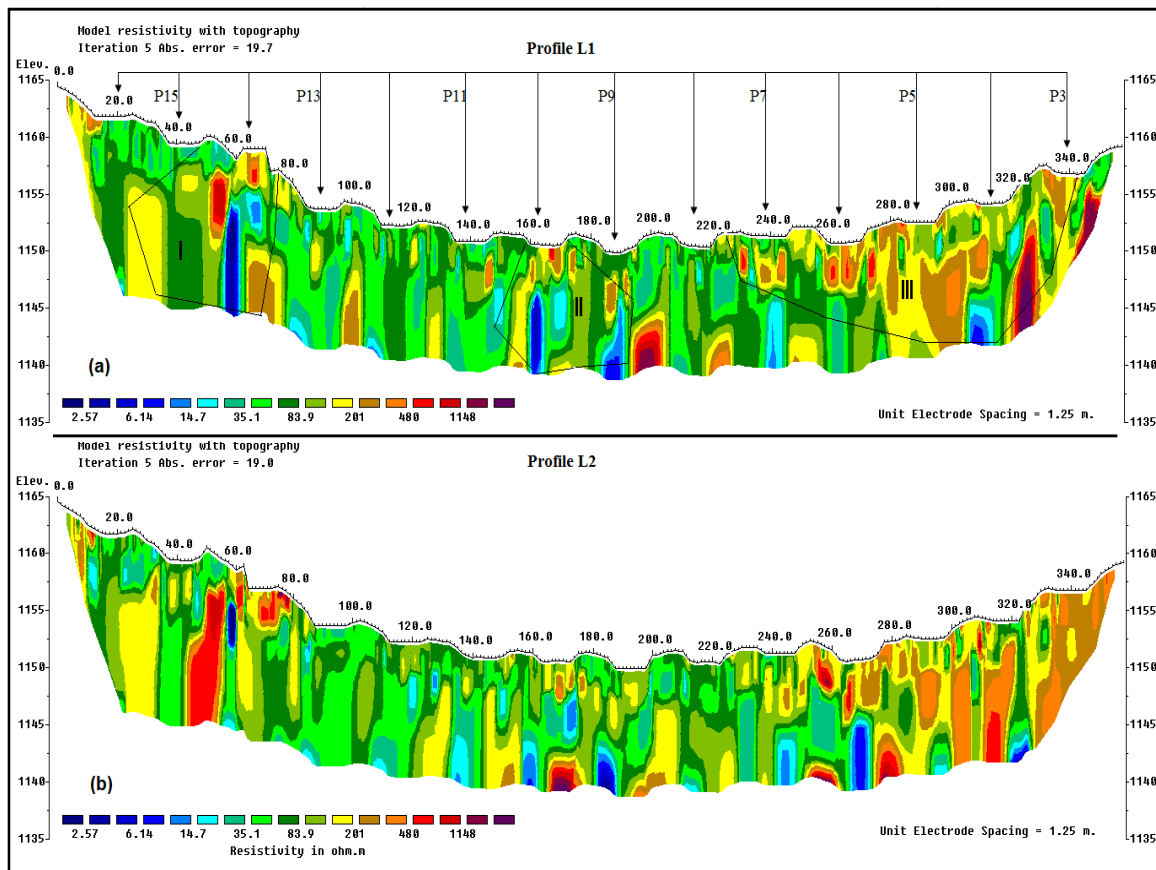


Fig.VI.12 Sections inversées de résistivité 2D pour les profils électriques L1 et L2.

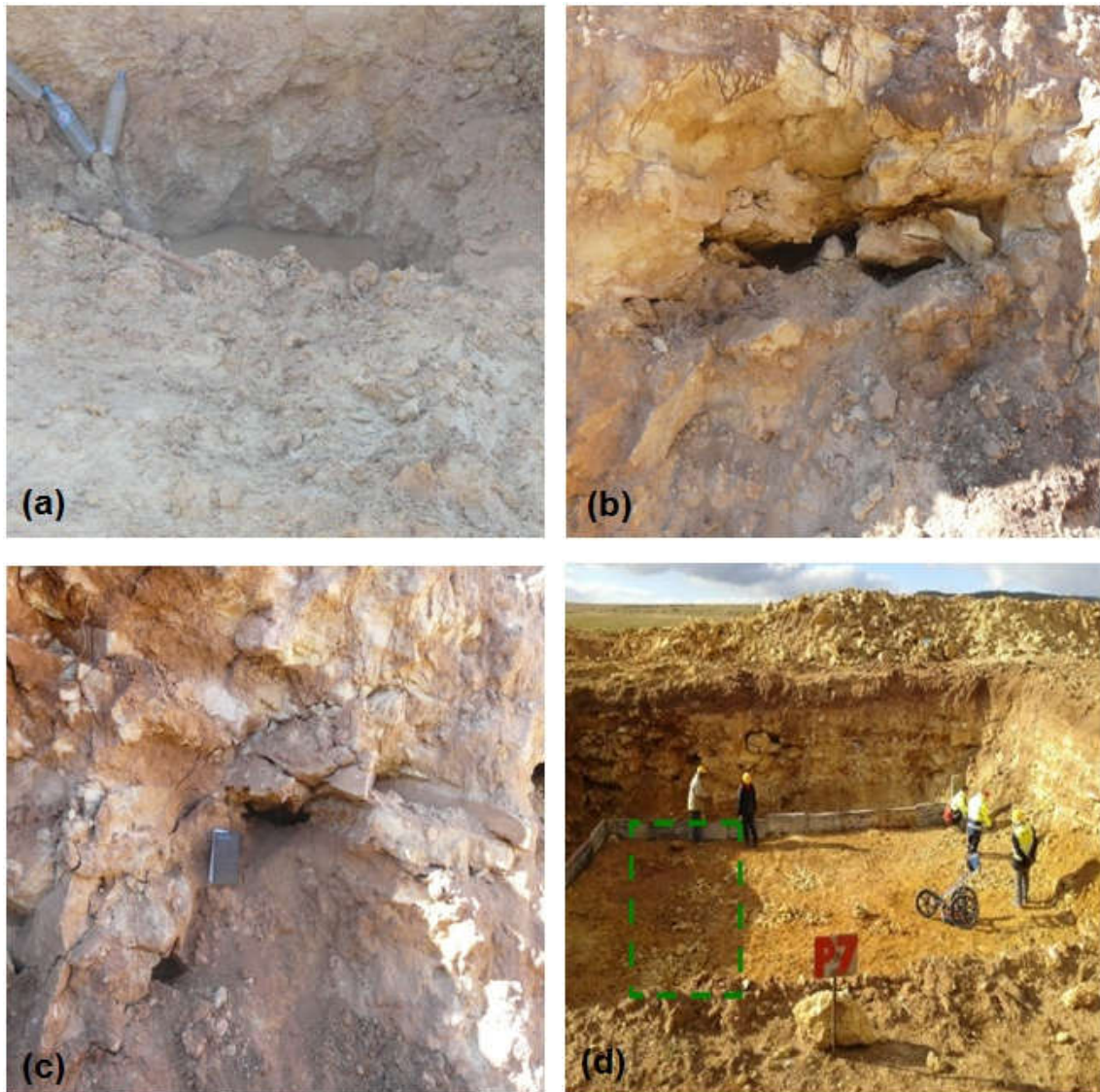


Fig.VI.13 Vues générales des cavités et fractures.

VI.3.6 Conclusion

L'étude géophysique réalisée sur le viaduc 1050 de la ligne ferroviaire Tiaret-Saida a permis de mettre en évidence trois zones anormales :

- la première zone se situe au début de région étudiée aux alentours de la pile P14,
- la seconde zone se situe au milieu du site étudié à côté de la pile P10,
- la troisième zone s'étend entre les piles P3 et P7.

VI.4 Application de la tomographie électrique pour la détection des cavités souterraines (Exemple de la ville de Tolga)

VI.4.1 Introduction

Les méthodes de reconnaissance géophysiques sont efficaces à l'étape des études préliminaires, pour des projets de construction qui couvrent de larges surfaces. Elles permettent d'obtenir rapidement et à faible coût une évaluation générale du sous-sol. Pratiquement, on trouve les méthodes électriques, sismiques, électromagnétiques, etc.

La présente étude est consacrée à la recherche des indices d'instabilités représentés par des vides souterrains, en utilisant la méthode électrique par panneaux. Dans la ville de Tolga, wilaya de Biskra, Sud-Est de l'Algérie, on trouve des cavités souterraines d'origine naturelles qui sont formées par le processus de dissolution du calcaire (Fig.VI.14). La présence de ces cavités influence la stabilité des constructions. L'objectif de ce travail consiste à tester la capacité de la méthode de tomographie électrique et pour détecter et délimiter les cavités souterraines.

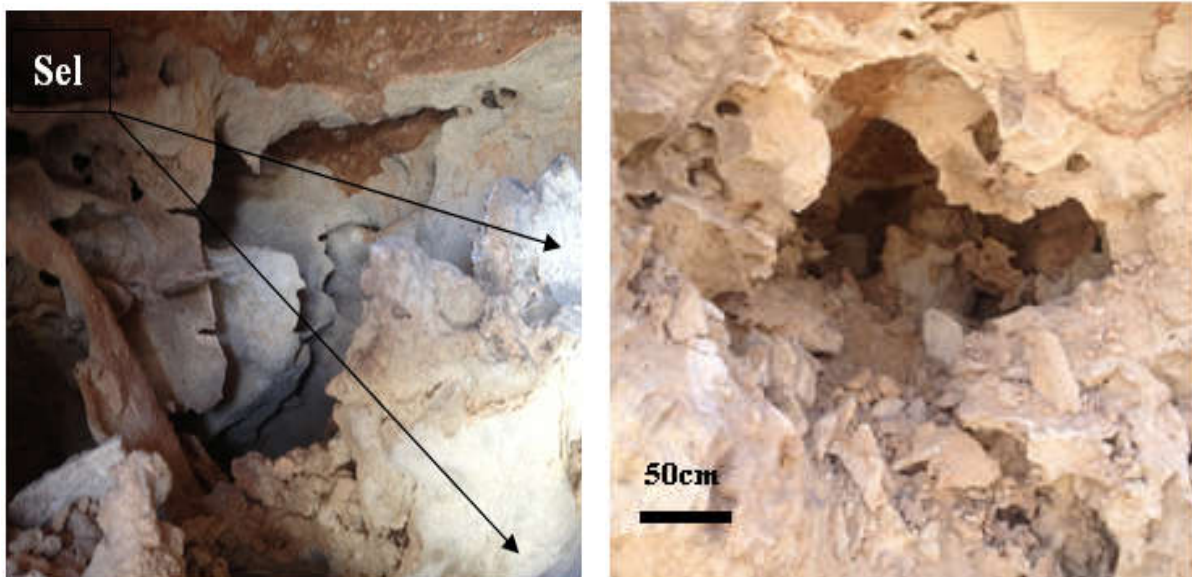


Fig.VI.14 Illustration d'une cavité souterraine de la ville de Tolga (25 mars 2013).

VI.4.2 Méthodologie

Le programme de reconnaissance géophysique comprenait dix profils de tomographie électrique 2D (Fig.VI.15). Les caractéristiques des profils sont représentées dans le tableau ci-dessous (Tab.VI.1). L'objectif principal de cette étude était de mettre en évidence les vides souterrains responsables des indices d'instabilités des constructions en milieu urbain.

Tableau VI.1 Caractéristiques des profils électriques.

Numéro des profils	Nombre des électrodes	Espacement (m)	Direction
1	30	02	Ouest-East
2	29	02	Sud-Nord
3	30	02	Ouest-East
4	25	01	Ouest-East
5	25	01	Ouest-East
6	25	01	Ouest-East
7	25	0.5	Sud-Nord
8	24	0.5	Sud-Nord
9	28	01	Nord-Sud
10	28	01	Ouest-East

La disposition optimale des profils permet de collecter le maximum des informations sur la zone expérimentée (Fig.VI.14). Pour la mesure de résistivité, nous avons utilisé le résistivimètre SARIS. Le dispositif utilisé dans l'ensemble de mesures pour tous les profils électriques est Wenner, en considérant une acquisition 2D. Ce dispositif possède une sensibilité horizontale, donc il est recommandé pour détecter les structures horizontales. Cependant, il est déconseillé pour la détection des structures verticales.

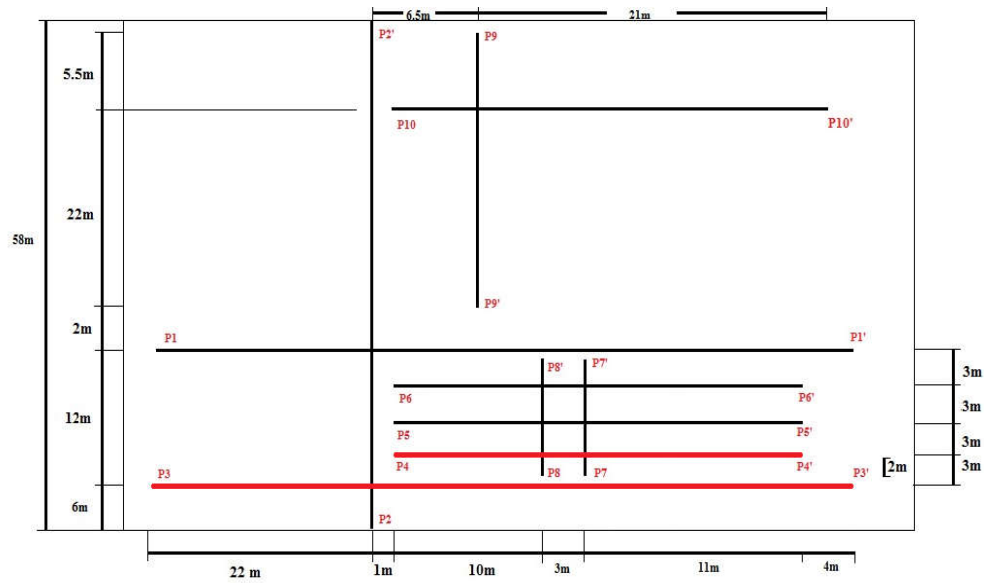


Fig.VI.15 Disposition de l'ensemble des panneaux électriques.

Après la collection des données, l'étape suivante concerne l'inversion des données. L'inversion des données obtenues de l'imagerie électrique est effectuée par Res2Dinv, qui détermine automatiquement en deux dimensions le modèle de résistivité et de polarisation provoquée du sous sol. Ce code d'inversion est capable de calculer les valeurs de résistivité apparente, par la technique d'optimisation non linéaire de moindres carrés.

VI.4.3 Résultats et discussions

Les résultats des mesures géophysiques enregistrés sont illustrés sur les figures (Figs.VI.16, 17, 18 et 19), pour les profils électriques P1 à P10, respectivement. Les mesures géophysiques obtenues montrent que les valeurs des résistivités apparentes de tous les panneaux électriques varient d'un minimum de $10 \Omega \cdot m$ jusqu'à un maximum de $500 \Omega \cdot m$ et plus. Les résultats sont présentés sous forme des pseudo-sections ou des panneaux électriques. Res2Dinv représente trois pseudo-sections, la première pseudo-section correspond la résistivité apparente mesurée, la seconde pseudo-section correspond la résistivité apparente calculée, et la dernière pseudo-section représente le modèle d'inversion proposé (Fig.VI.3).

Dans cette étude, on présente uniquement le modèle d'inversion. Les mesures de tomographie électrique ont permis d'établir trois panneaux correspondant aux profils P1, P2 et P3 (Fig.VI.16). Sur la figure ci-après (Fig.VI.16) le panneau électrique P1 montre que le sol est composé de l'argile de 16 m de longueur et sur une profondeur de 1,30 m, avec une gamme de résistivité apparente allant de 35 à $40 \Omega \cdot m$. Cependant, le panneau P1 montre l'existence des formations carbonatées correspondant aux calcaires ayant des valeurs de résistivités très

élevées de l'ordre de $200 \Omega \cdot m$, elles sont situées sur une profondeur de 3 m. Les deux premiers panneaux comportent approximativement des caractéristiques similaires (argile, argile carbonatée et des formations carbonatées). Le panneau électrique P3 indique une couche conductrice d'argile près de la surface, de résistivité inférieure à $15 \Omega \cdot m$. Aussi, ce panneau comporte une couche d'argile carbonatée située à une profondeur de 3 m, sa résistivité apparente est de l'ordre de 30 à $50 \Omega \cdot m$. On remarque aussi un très fort contraste de résistivité apparente des matériaux carbonatés dont les résistivités augmentent entre 70 à $85 \Omega \cdot m$.

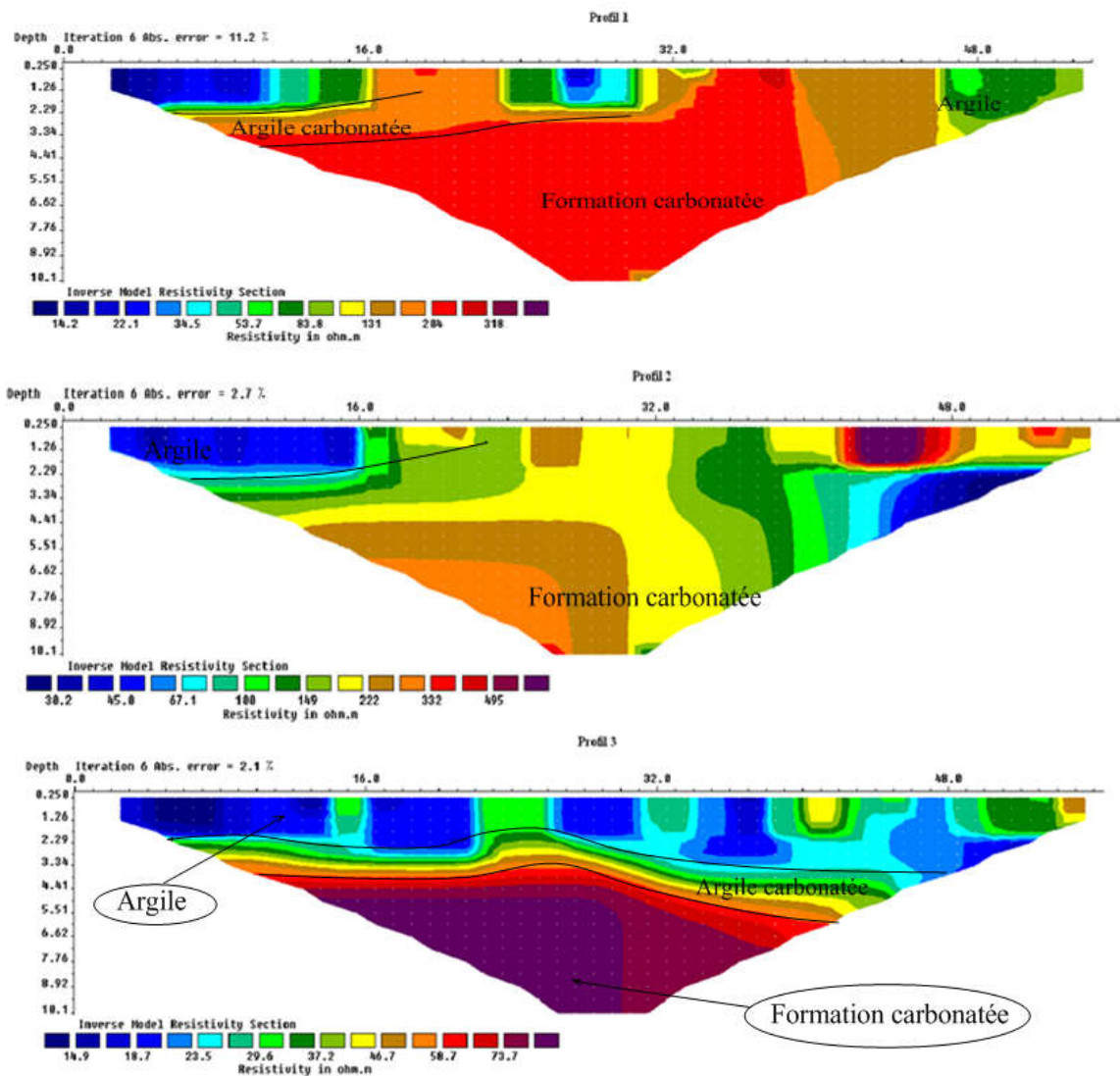


Fig.VI.16 Résultats des mesures géophysiques des profils P1, P2 et P3.

Les panneaux électriques P4, P5 et P6 respectivement (Fig.VI.17) ont été réalisés parallèlement au fond de fouille dans le sens longitudinal, en considérant un espacement d'environ 3 m. Les résultats obtenus sont présentés sur la (Fig.VI.17). Le panneau P4 montre

une formation carbonatée couvrant la totalité de ce profil, la résistivité est de l'ordre $200 \Omega \cdot m$. Aussi, on remarque la présence d'une zone argileuse très conductrice de résistivité $20 \Omega \cdot m$. Le panneau électrique P5 montre l'existence d'une zone très résistive dont la valeur de résistivité est plus de $200 \Omega \cdot m$, ceci peut être expliqué par la présence d'une cavité allongée horizontalement. Les deux profils P4 et P5 présentent des caractéristiques semblables, correspondant à des formations carbonatées. Cependant, le panneau électrique P6 est caractérisé par des formations carbonatées; en plus, il existe une zone conductrice au centre de ce panneau de résistivité apparente égale à $20 \Omega \cdot m$, cette zone correspond à une formation argileuse.

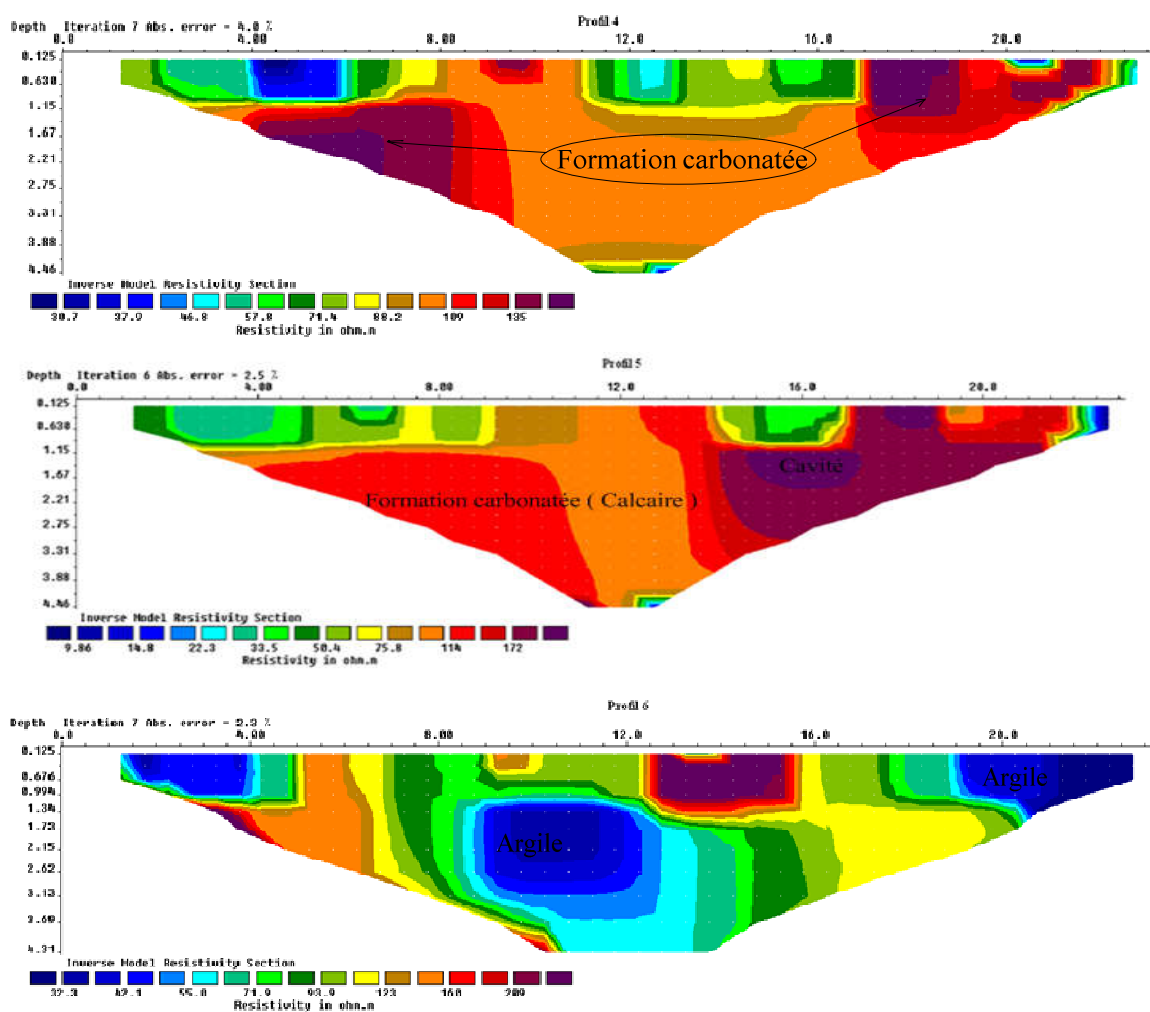


Fig.VI.17 Résultats des mesures géophysiques des profils P4, P5 et P6.

Les profils P7 et P8 ont été réalisés au fond de fouille qui a été excavée dans le sens transversal. Ces panneaux électriques (Fig.VI.18) montrent que le sol de fondation, contient des formations carbonatées (Calcaire) qui s'étalent en profondeur et en surface du sol, les

valeurs de la résistivité du calcaire varient entre 120 à 170 $\Omega\cdot\text{m}$. Les résultats montrent clairement un sous-sol électriquement résistant ; par ailleurs, on peut conclure que la méthode de tomographie électrique permet de caractériser les formations existantes dans le site étudié.

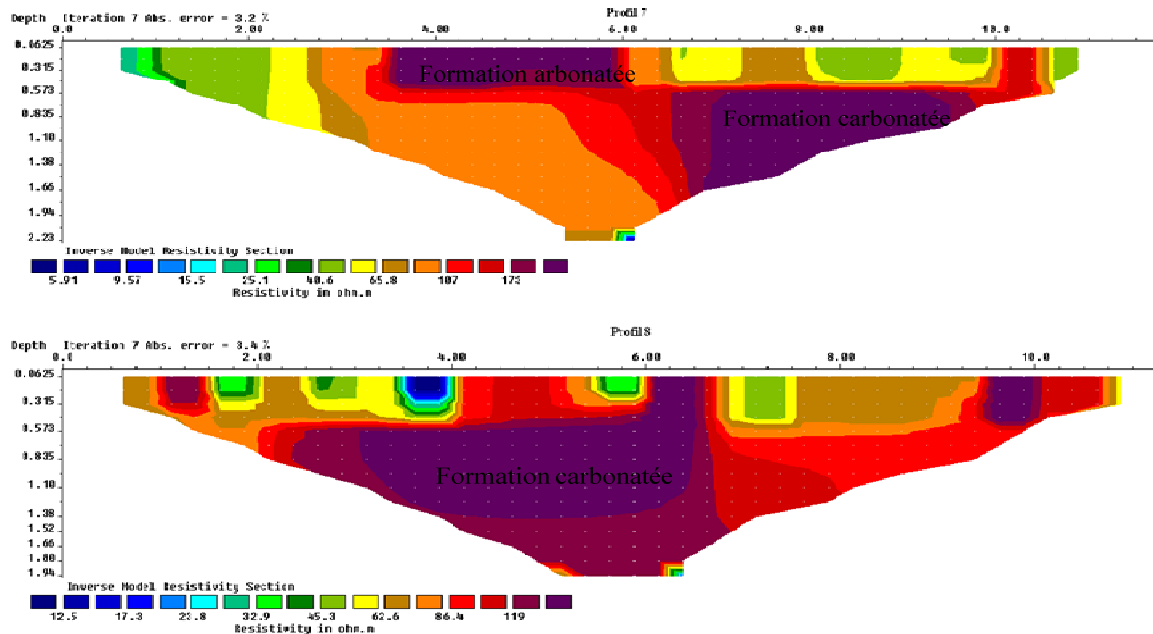


Fig.VI.18 Résultats des mesures géophysiques des profils P7 et P8.

L'analyse de pseudo-section du profil électrique P9 représenté sur la figure (Fig.VI.19), permet de remarquer une zone de résistivité très élevée (300 $\Omega\cdot\text{m}$), elle correspond à des calcaires massifs et compacts. Le profil P10 montre que le sol de fondation est formé d'une couche d'argile située au-dessus d'une matrice rocheuse ; deux zones très résistives ont été distinguées, la première est située à 8 m de profondeur à gauche du profil P10, tandis que la seconde elle est à l'extrémité droite, les valeurs de résistivité sont supérieures à 265 $\Omega\cdot\text{m}$.

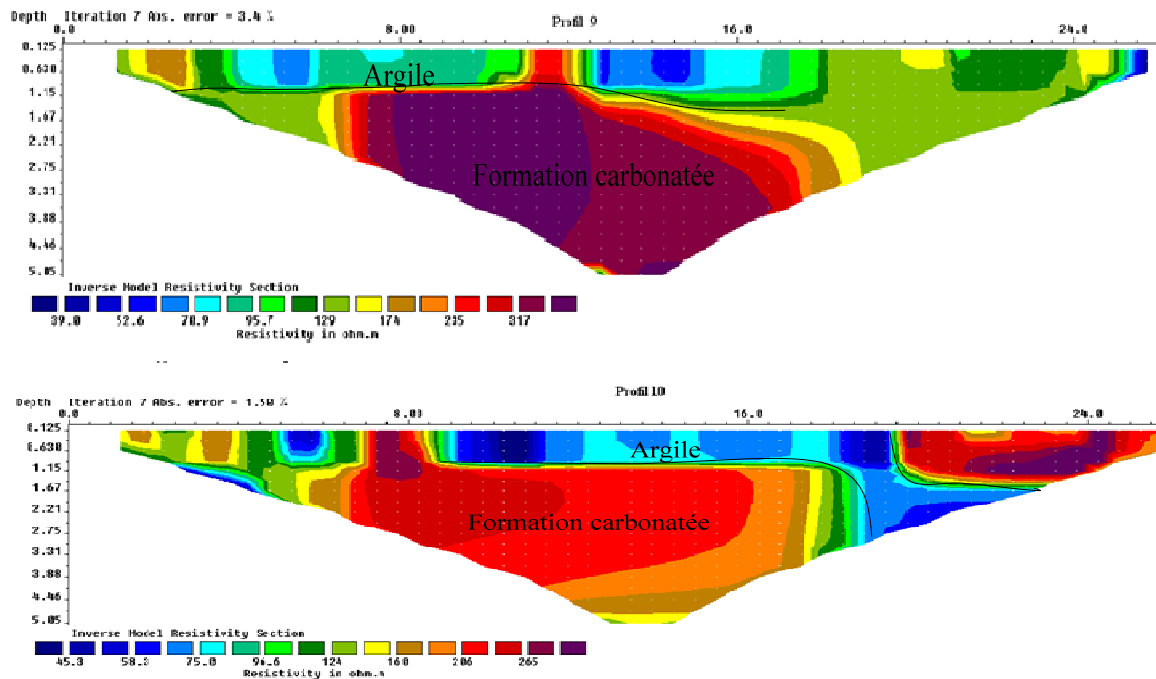


Fig.VI.19 Résultats des mesures géophysiques des profils P9 et P10.

VI.4.4 Investigations géotechniques

Afin de vérifier l'existence des cavités souterraines et d'évaluer la performance de la méthode géoélectrique, des sondages mécaniques, et des essais de pénétration dynamique ont été réalisés. Les résultats des sondages mécaniques montrent bien la continuité des formations carbonatées du terrain étudié, ce qui ramène à un site composé par une forte proportion de calcaire poreux blanchâtre, des argiles limoneuse fortement carbonatées, des tufs graveleux et caillouteux avec des passages sablo-limoneux.

VI.4.5 Conclusion

L'étude géophysique par prospection électrique en mode de tomographie électrique permet de préciser la localisation et l'extension des cavités. La présence des cavités souterraines dans la région de Tolga est essentiellement due à la dissolution de la matière. Les panneaux électriques ont donné des coupes verticales au-dessous des profils réalisés, ces panneaux comportent des informations nécessaires pour des interprétations correctes. La confrontation des résultats obtenus par les sondages mécaniques est une méthode très efficace.

Des tests par pénétration dynamiques exécutés ont donné des résistances du terrain très satisfaisantes. La solution proposée pour réaliser l'infrastructure est l'excavation totale en masse et la reconstitution du sol par un tout venant d'oued (TVO) traité avec un liant hydraulique, à titre d'exemple 15 % de ciment résistant aux sulfates compacté couche par

couche de 20 à 30 cm. Les cavités et les vides localisés, selon leurs dimensions, peuvent être remplis par un coulis de ciment ou du béton.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'apparition d'événements indésirables représente un véritable danger dont il convient d'étudier la possibilité et la probabilité d'occurrence et d'envisager les conséquences. Ces événements peuvent être en particulier des affaissements, des montées de fontis et des effondrements liés à la présence de cavités souterraines et leurs risques. Les cavités souterraines non connues sont dangereuses pour l'homme non seulement dans les zones urbanisées, mais aussi dans des terrains en cours d'aménagement. C'est pourquoi la prise en compte de cet aléa est devenue depuis plusieurs années une préoccupation majeure des entreprises en génie civil.

La tomographie électrique permet de détecter et de localiser les cavités souterraines dans le proche sous-sol et également pour caractériser les sols. L'utilisation de cette méthode géophysique doit être considérée comme une étape dans la méthodologie générale dans la phase de reconnaissance. Son objectif principal est d'apporter des compléments aux études préalables et de définir en surface les zones à risques.

Dans un premier temps, nous avons effectué une analyse théorique de la méthode électrique, son historique, son principe de mesure, les différents dispositifs utilisés en prospection électrique, ainsi que les avantages et les inconvénients de chaque dispositif de mesure.

Nous avons réalisé dans la première partie une étude visant à contribuer à la reconnaissance des sols par tomographie électrique. Puis, nous avons étudié par modélisation numérique la capacité des différents dispositifs utilisés en imagerie électrique en mode 2D, afin de détecter les cavités souterraines dans le proche sous-sol. Les cavités modélisées ont des sections circulaires et rectangulaires avec différentes résistivités du milieu encaissant (résistant et conducteur), ceci nous a permis de choisir le meilleur dispositif de mesure. La résolution dépend fortement du dispositif de mesure utilisé, et de la distance inter-électrodes.

Dans un deuxième temps, et pour la résolution du problème inverse, nous avons présenté deux applications pour la détection des cavités souterraines et la caractérisation des sols par des mesures de résistivité électrique pour la résolution du problème inverse. La première application consiste à analyser la résolution des images du sous-sol et tester la capacité de la méthode de tomographie électrique pour détecter et délimiter les cavités, dans le cadre de la construction d'un projet de bâtiments dans la ville de Tolga, wilaya de Biskra (site de 138/318 L.S.P à Tolga), et la deuxième concernant une prospection géophysique réalisée sur le viaduc

1050 de la ligne ferroviaire Tiaret-Saida, Nord-Ouest de l'Algérie entre PK : 37+037 et PK 37+565.

L'étude a conclu que la tomographie électrique est une technique efficace pour la reconnaissance du sol. Les résultats de la modélisation numérique ont montré que le dispositif dipôle-dipôle a donné de bons résultats pour la détection des cavités souterraines dans le proche sous-sol, en l'absence de bruit. Mais, en présence du bruit, les dispositifs: gradient, pôle-pôle et pôle dipôle ont donné de bons résultats comparativement aux autres dispositifs. Avec le développement continu de l'acquisition des données et les techniques d'interprétation, la méthode de résistivité a un intérêt pour différentes applications.

Les avantages généraux de la méthode de tomographie électrique peuvent être résumés comme suit:

- La technique est non destructive, l'objet intérieur peut être investi sans le dégrader comme par exemple le sondage mécanique ou l'excavation.
- Le levé est rapide.
- L'échelle de prospection peut atteindre plusieurs centaines de mètres.
- L'équipement est relativement léger et flexible, et permet l'accès aux terrains difficiles.
- L'intégration des résultats de tomographie électrique avec des résultats d'une autre méthode géophysique, par exemple, les méthodes EM, peut réduire les difficultés d'interprétation et éliminer les ambiguïtés lors de l'interprétation.
- La technique peut être utilisée dans le cas de la présence des couches conductrices, ce qui fait une bonne alternative aux méthodes EM comme le radar géologique.

Les inconvénients généraux de la technique sont :

- Perturbation possible des objets conducteurs en contact galvanique avec le sol, comme par exemple, les conduites, les objets métalliques enterrés, etc.
- Le contact galvanique (électrode-sol) est exigé.
- Une grande profondeur de pénétration nécessite un long profil électrique.

Perspectives

Les méthodes d'investigation géophysiques sont appliquées après la réalisation des études préliminaires et des avant-projets. Elles apportent des informations supplémentaires sur le modèle géologique et permettent de réaliser un second zonage plus précis, au droit des anomalies mesurées. Le développement récent de l'appareillage d'acquisition et des logiciels d'inversion, permettront d'acquérir des données de bonne qualité et donner des résultats très optimistes.

En génie civil, il y a de nombreux problèmes rencontrés nécessitant l'emploi de cette méthode. Celle-ci est devenue récemment très populaire et largement utilisée.

Nous souhaiterons appliquer cette méthode géophysique pour d'autres objectifs, telle que l'auscultation non-destructive dans le domaine du génie civil en sites urbains et en sites en cours d'aménagement. L'évaluation des ouvrages d'art (barrages et ponts), pour savoir s'il y a de l'érosion interne dans les barrages en terre (digues) et la surveillance des glissements de terrain actifs qui posent des problèmes de nos jours sur l'environnement, surtout dans les hauts-plateaux et au nord de l'Algérie.

Bibliographie

Abu-Shariah MII (2009) Determination of cave geometry by using a geoelectrical resistivity inverse model. *Eng Geol* 105:239–244

Aizebeokhai A (2010) 2D and 3D geoelectrical resistivity imaging: theory and field design. *Sci Res Essays* 5(23):3592–3605

Aizebeokhai AP, Oyeyemi KD (2014) The use of the multiple-gradient array for geoelectrical resistivity and induced polarization imaging. *J Appl Geophys* 111:364–376

Al-fares W, Bakalowicz M, Guérin R, Dukhan M (2002) Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area (Hérault, France) with ground penetrating radar. *J Appl Geophys* 51:97–106

Al-Heety AJ, Shanshal ZM (2016) Integration of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography in engineering geophysics for soil characterization. *Arab J Geosci* 9:1–11

AL-Menshed FH (2011) Evaluation of resistivity method in delineation ground water hydrocarbon contamination southwest of Karbala city. Ph.D. Thesis, Dept. of Geology, College of Science, University of Baghdad, p 210

Aning AA (2012) Bosumtwi impact crater: use of electrical resistivity tomography (ERT) to map the geometry of the inner wall of the crater and the impact related structures. (Doctoral dissertation, Paris 11)

Archie GE (1942) The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Pet Trans Am Inst Min Metall Pet Eng* 146:54–62

Astier JL (1971) *Géophysique appliquée à l'hydrogéologie*. Masson, Paris

Barker R, Moore J (1998) The application of time-lapse electrical tomography in groundwater studies. *The Leading Edge* 17:1454–1458

Bayrak M, Şenel L (2012) Two-dimensional resistivity imaging in the Kestelek boron area by VLF and DC resistivity methods. *J Appl Geophys* 82:1–10

Bergström G (1913) Försök med elektrisk malmletning. Sveriges Geologiska Undersöknings Arsbok Stockholm 7(6):1–10

Binley A, Winship P, West LJ, Pokar M, Middleton R (2002) Seasonal variation of moisture content in unsaturated sandstone inferred from borehole radar and resistivity profiles. *J Hydrol* 267:160–172

Carbonel D, Rodríguez V, Gutiérrez F, McCalpin JP, Linares R, Roqué C, Zarroca M, Guerrero J (2014) Sinkhole characterisation combining trenching, ground penetrating radar (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT). *Earth Surf Process Landf* 39:214–227

Carbonel D, Rodríguez-Tribaldos V, Gutiérrez F, Galve JP, Guerrero J, Zarroca M, Roqué C, Linares R, McCalpin JP, Acosta E (2015) Investigating a damaging buried sinkhole cluster in an urban area (Zaragoza city, NE Spain) integrating multiple techniques: geomorphological surveys, DInSAR, DEMs, GPR, ERT, and trenching. *J Geomorphol* 229:3–16

Carrara E et al. (2001) Resistivity and radar surveys at the archaeological site of Ercolano. *J Environ Eng Geophys* 6:123–132

Chambers JE, Loke MH, Ogilvy RD, Meldrum PI (2003) Noninvasive monitoring of DNAPL migration through a saturated porous medium using electrical impedance tomography. *J Contam Hydrol* 68:1–22

Dahlin T (2001) The development of DC resistivity imaging techniques. *Comput Geosci* 27:1019–1029

Dahlin T (1993) On the Automation of 2D Resistivity Surveying for Engineering and Environmental Applications. PhD Thesis Department of Engineering Geology, Lund University, p187

Dahlin T (1996) 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break* 14:275–283

Dahlin T, Bernstone C (1997) A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode array. In: Proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems, vol 2, Reno, Nevada, pp 927–935

- Dahlin T, Loke MH (1997) Quasi-3D resistivity imaging: mapping of 3D structures using two dimensional dc resistivity techniques, 3rd Mtg., Environ. Eng. Geophysics. Assn., Expanded Abstracts, pp 143–146
- Dahlin T, Loke MH (1998) Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *J Appl Geophys* 38:237–249
- Dahlin T, Rosqvist H, Leroux V (2010) Resistivity-IP mapping for landfill applications. *Near Surf Geosci* 28:101–105
- Dahlin T, Zhou B (2004) A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophys Prospect* 52:379–398
- Dahlin T, Zhou B (2006) Multiple gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *Near Surf Geophys* 4:113–123
- Daily W, Ramirez A, Johnson R (1998) Electrical impedance tomography of a perchloroethylene release. *J Environ Eng Geophys* 2:189–201
- Dey A, Morrison HF (1979) Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophys Prospect* 27:106–136
- DeGroot-Hedlin C, Constable S (1990) Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics* 55:1613–1624
- Edwards LS (1977) A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics* 42(5):1020–1036
- Ebraheem AM, Al Mulla MM, Sherif MM, Awad O, Akram SF, Al Suweidi NB, Shetty A (2014) Mapping groundwater conditions in different geological environments in the northern area of UAE using 2D earth resistivity imaging survey. *Environ Earth Sci* 72:1599–1614
- Ebraheem AM, Al Matari AS, Shetty A, Akram SF, Al Mulla MM (2009) A 2D Earth resistivity imaging survey for saltwater intrusion delineation in the coast aquifer of east UAE. Ninth gulf conference, PP. 406–421

- El Khammari K, Najine A, Jaffal M, Aïfa T, Himi M, Vasquez D, Casas A, Andrieux P (2007) Imagerie combinée géoélectrique–radar géologique des cavités souterraines de la ville de Zaouit Ech Cheikh (Maroc). *CR Geosci* 339:460–467
- El-Qady G, Hafez M, Abdalla MA, Ushijima K (2005) Imaging subsurface cavities using geoelectric tomography and ground-penetrating radar. *J Cave Karst Stud* 67:174–181
- El-Qady G (2006) Exploration of a geothermal reservoir using geoelectrical resistivity inversion: case study at Hammam Mousa, Sinai, Egypt. *J Geophys Eng* 3:114
- Evjen HM (1938) Depth factor and resolving power of electrical measurements. *Geophys.* 3:78–95
- Farooq M, Park S, Kim JH, Song YS, Sabir MA, Umar M, Tariq M, Muhammad S (2014) Time-lapse electrical resistivity investigations for imaging the grouting injection in shallow subsurface cavities. *Sci World J*. Article ID 178203. doi:10.1155/2014/178203
- Farooq M, Park S, Song YS, Kim JH, Tariq M, Abraham AA (2012) Subsurface cavity detection in a karst environment using electrical resistivity (er): a case study from yongweol-ri, South Korea. *Earth Sci Res J* 16:75–82
- Fehdi C, Baali F, Boubaya D, Rouabhia A (2011) Detection of sinkholes using 2D electrical resistivity imaging in the Cheria Basin (north-east of Algeria). *Arab J Geosci* 4:181–187
- Frohlich RK, Urish DW, Fuller J, Reilly MO (1994) Use of geoelectrical method in groundwater pollution surveys in a coastal environment. *J Appl Geophys* 32:139–154
- Goes BJM, Meekes JAC (2004) An effective electrode configuration for the detection of DNAPLs with electrical resistivity tomography. *J Environ Eng Geophys* 9:127–141
- Griffiths DH, Barker RD (1993) Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology. *J Appl Geophys* 29:211–226
- Hallof PG (1957) On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements. PhD Thesis, MIT

Hammoum H, Khaldaoui F, Zoreik A, Touat M, Chekhar M, Bouzida R, Benamar A (2015) Utilisation de la résistivité électrique pour le dimensionnement d'un ouvrage de drainage. Bull Eng Geol Environ 74:247–258

Hawamdeh A, Jaradat R, Alsaad Z (2014) Integrated application of geophysical methods for investigation of the Al-Berktain archaeological site in the city of Jerash, Jordan. Environ Earth Sci 73:3665–3674

Keary P, Brooks M, Hill I (2002) An introduction to geophysical exploration. Blackwell Scientific Publication, Oxford, pp 183–207

Keller GV, Frischknecht FC (1966) Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press, New York, p 519

Kunetz G (1966) Principles of direct current resistivity prospecting. Geoexploration monographs, Gebruder-Borntraeger, Berlin. 103 pp

LaMoreaux PE, Wilson BM, Memon BA (1984) Guide to the hydrology of carbonate rocks. UNESCO, France

Leroux V, Dahlin T (2002) Induced polarisation survey at a waste site in southern Sweden. In: 8th EEGS-ES Meeting

Lesmes DP, Morgan FD (2001) Dielectrical spectroscopy of sedimentary rocks. J Geophys Res 106(B7):13329–13346

Li Y, Oldenburg DW (1992) Approximate inverse mappings in DC resistivity problems. Geophys J Int 109:343–362

Loke MH (2000) Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. Technical note of Geotomo Software. Available on line at <http://www.goelectrical.com>

Loke MH (1994) The inversion of two dimensional resistivity data. Unpublished PhD thesis, Univ. of Birmingham

Loke MH (2001) Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: a practical guide to 2D and 3D surveys, 62 pp. Available at <http://www.goelectrical.com>

Loke MH (2002) Rapid 3D Resistivity and IP inversion using the least-squares method. Geoelectrical Imaging 2D and 3D, Geotomo software

Loke MH (2011) Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys, 140 pp. Available at www.geoelectrical.com

Loke MH (2014) Rapid 2-D resistivity & IP inversion using the least-squares method, geoelectrical imaging 2D & 3D, GEOTOMO SOFTWARE, Malaysia

Loke MH (2015) Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys, E-mail: drmhloke@yahoo.com, geotomo@gmail.com, p 176

Loke MH, Acworth I, Dahlin T (2003) A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Explor Geophys* 34:182–187

Loke MH, Barker RD (1996) Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophys Prospect* 44:131–152

Loke MH, Dahlin T (2002) A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *J Appl Geophys* 49:149–162

Loke MH, Wilkinson PB, Chambers JE (2010) Fast computation of optimized electrode arrays for 2D resistivity surveys. *J Comput Geosci* 36(11):1414–1426

Long M, Donohue S, L'Heureux JS, Solberg IL, Rønning JS, Limacher R, O'Connor P, Sauvin G, Rømoen M, Lecomte I (2012) Relationship between electrical resistivity and basic geotechnical parameters for marine clays. *Can Geotech J* 49(10):1158–1168

Marescot L (2004) Modélisation directe et inverse en prospection électrique sur des structures 3D complexes par la méthode des Éléments Finis, Ph.D. thesis, Université de Nantes, Université de Lausanne, p208

Marescot L (2008) Imagerie électrique pour géologues: acquisition, traitement, interprétation. www.tomoquest.com

Martínez J, Benavente J, García-Aróstegui JL, Hidalgo MC, Rey J (2009) Contribution of electrical resistivity tomography to the study of detrital aquifers affected by seawater intrusion–extrusion effects: the river Vélez delta (Vélez-Málaga, southern Spain). *Eng Geol* 108:161–168

Martínez-Pagán P, Cano ÁF, Ramos da Silva GR, Olivares AB (2010) 2-D electrical resistivity imaging to assess slurry pond subsoil pollution in the Southeastern Region of Murcia, Spain. *JEEG* 15:29-47

Martínez-Pagán P, Gómez-Ortiz D, Martín-Crespo T, Manteca JI, Rosique M (2013) The electrical resistivity tomography method in the detection of shallow mining cavities. A case study on the Victoria Cave, Cartagena (SE Spain). *Eng Geol* 156:1–10

Metwaly M, El-Qady G, Massoud U, El-Kenawy A, Matsushima J, Al-Arifi N (2010) Integrated geoelectrical survey for groundwater and shallow subsurface evaluation: case study at Siliyin spring, El-Fayoum, Egypt. *Int J Earth Sci* 99:1427–1436

Metwaly M, AlFouzan F (2013) Application of 2-D geoelectrical resistivity tomography for subsurface cavity detection in the eastern part of Saudi Arabia. *Geosci Front* 4:469–476

Najine A, Jaffal M, Aïfa T, Filahi M, Arioua A, Boukdir A, Andrieux P, Rejiba F (2006) Reconnaissance de cavités souterraines par tomographie électrique et radar géologique dans le centre ville de Béni-Mellal (Maroc). *B Lab Ponts Chaussées* 260:83–89

Naudet V (2004) Les méthodes de résistivité électrique et de potentiel spontané appliquées aux sites contaminés (Doctoral dissertation, Université Paris VI)

Naudet V, Lazzari M, Perrone A, Loperte A, Piscitelli S, Lapenna V (2008) Integrated geophysical and geomorphological approach to investigate the snowmelt-triggered landslide of Bosco Piccolo village (Basilicata, southern Italy). *Eng Geol* 98:156–157

Nguyen F, Garambois S, Jongmans D, Pirard E, Loke MH (2005) Image processing of 2D resistivity data for imaging faults. *J Appl Geophys* 57(4):260–277

Nouioua I, Fehdi C, Boubaya D, Serhane B, Djellal A (2015) Mapping underground cracks using 2D electrical resistivity tomography: the case of the landslide of Kef Essenoun phosphate deposit, Djebel Onk (northeast of Algeria). *Arab J Geosci* 8:7731–7738

Nouioua I, Rouabhia A, Fehdi C, Boukelloul ML, Gadri L, Chabou D, Mouici R (2013) The application of GPR and electrical resistivity tomography as useful tools in detection of sinkholes in the Cheria Basin (northeast of Algeria). *Environ Earth Sci* 68:1661–1672

Parasnis DS (1986) Principles of applied geophysics. Chapman & Hall, London

- Palacky GJ (1987)** Resistivity characteristics of geologic targets. In: Nabighian MN (ed) *Electromagnetic methods in applied geophysics*, vol 1, SEG Investigations in Geophysics 3:53–129
- Parasnis DS (1986)** Principles of applied geophysics. Chapman & Hall, London
- Parker WL (1977)** Understanding inverse theory. *Ann Rev Earth Planet Sci* 5:35–64
- Parkhomenko EI (1967)** Electrical properties of rocks. In: Keller GV (ed) Plenum Press, New York (translated from Russian)
- Park MK, Park S, Yi M-J, Kim C, Son J-S, Kim J-H, Abraham AA (2014)** Application of electrical resistivity tomography (ERT) technique to detect underground cavities in a karst area of South Korea. *Environ Earth Sci* 71:2797–2806
- Pazdirek O, Blaha V (1996)** Examples of resistivity imaging using ME-100 resistivity field acquisition system. In: EAGE 58th conference and technical exhibition. Extended Abstract, Amsterdam
- Penz S (2012)** Modélisation et Inversion de données électriques en courant continu : vers une prise en compte efficace de la topographie (Doctoral dissertation, Paris, ENMP)
- Petersson W (1907)** Om malmsökande medelst elektricitet. *Jern-Kontorets Annaler* 2–3:153–171
- Ponton J (2008)** Caractérisation hydro-géophysique par tomographie électrique d'un glissement de terrain argileux de type "coulée" à l'échelle de la parcelle et du versant, Rapport de stage 80 pp
- Rehman F, Abuelnaga HSO, Harbi HM, Cheema T, Atef AH (2016)** Using a combined electrical resistivity imaging and induced polarization techniques with the chemical analysis in determining of groundwater pollution at Al Misk Lake, Eastern Jeddah, Saudi Arabia. *Arab J Geosci* 9:1–11
- Reynolds JM (1997)** An introduction to applied and environmental geophysics. Wiley, Chichester
- Roy A, Apparao A (1971)** Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics* 36:943–959

- Samouëlian A et al (2003) Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale. *Soil Sci Soc Am J* 67(5):1319–1326
- Samouëlian A, Richard G, Cousin I, Guérin R, Bruand A, Tabbagh A (2004) Three dimensional crack monitoring by electrical resistivity measurement. *Eur J Soil Sci* 55:751–762
- Sandberg SK, Slater LD, Versteeg R (2002) An integrated geophysical investigation of the hydrogeology of an anisotropic unconfined aquifer. *J Hydrol* 267:227–243
- Sasaki Y (1992) Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophys Prospect* 40:453–463
- Schlumberger C (1920) *Étude de la prospection électrique du sous-sol: Gaultier-Villars et Cie., Paris, 94 pp*
- Seaton WJ, Burbey TJ (2002) Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrane. *J Appl Geophys* 51:21–41
- Sharma PV (1997) *Environmental and Engineering Geophysics. Cambridge University Press*
- Shokri BJ, Ardejani FD, Moradzadeh A (2016) Mapping the flow pathways and contaminants transportation around a coal washing plant using the VLF-EM, Geo-electrical and IP techniques—a case study, NE Iran. *Environ Earth Sci* 75(1):62
- Silvester PP, RL Ferrari (1996) *finite elements for electrical engineers. Cambridge university press*
- Šumanovac F (2006) Mapping of thin sandy aquifers by using high resolution reflection seismics and 2-D electrical tomography. *J Appl Geophys* 58:144–157
- Szalai S, Koppán A, Szarka L (2007) Effect of Positional Inaccuracies on Multielectrode Results, 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Istanbul, P28
- Telford WM, Geldart LP, Sheriff RE (1990) *Applied geophysics, 2nd edn. Cambridge University Press, New York*
- Van Nostrand RG, Cook KL (1966) *Interpretation of resistivity data. US geological survey, professional paper 499, USGS, Washington, DC*

Van Schoor M (2002) Detection of sinkholes using 2D electrical resistivity imaging. *J Appl Geophys* 50:393–399

Xu D, Hu X-Y, Shan C-L, Li R-H (2016) Landslide monitoring in southwestern China via time-lapse electrical resistivity tomography. *Appl Geophys* 13:1–12

Yakupov VS (1973) Electrical conductivity of frozen soils. Proceedings of the Second International Conference on Permafrost, Yakutsk, USSR, USSR contribution volume, pp 312–314

Zaidi FK, Kassem OMK (2012) Use of electrical resistivity tomography in delineating zones of groundwater potential in arid regions: a case study from Diriyah region of Saudi Arabia. *Arab J Geosci* 5:327–333

Zhdanov MS (2002) *Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems (Methods in Geochemistry and Geophysics)*, 592pp

Zhou W, Beck BF, Adams AL (2002) Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. *Environ Geol* 42:922–9287

Zhou B, Dahlin T (2003) Properties and effects of measurement errors on 2D resistivity imaging surveying. *Near Surf Geophys* 1(3):105–117

Zohdy AAR, Eaton GP, Mabey DR (1974) Application of surface geophysics to groundwater investigation. United States Geological Survey Book 2, Chapter D1, 116 pp

Annexe

Utilisation du programme Res2Dinv

Lecture des fichiers

L'utilisation du programme Res2Dinv commence par la lecture d'un fichier **.DAT** (menu File, option Read data file). Le Res2Dinv est capable de lire les fichiers importés par plusieurs résistivimètres comme par exemple : SCINTREX _{Canada}, ABEM _{Suède}, STING _{USA}, PASI _{Italie}, IRIS _{France}, etc. Ces fichiers (*******.dat**) ont une structure particulière au logiciel et sont organisés de la manière suivante :

Ligne 1	Nom du fichier
Ligne 2	Espacement inter-électrode le plus petit
Ligne 3	Type de configuration utilisée :
	1 → Wenner
	2 → Pôle-pôle
	3 → Dipôle-dipôle
	6 → Pôle-dipôle
	7 → Wenner-Schlumberger
	8 → Dipôle-dipôle équatorial
	10 → Offset Pôle-dipôle
	11 → Dispositif général
	12 → Léve de cross-borehole
	15 → Gradient
Ligne 4	Nombre de mesures
Ligne 5	Type de repérage, abscisse utilisée :
	0 → première électrode du quadripôle
	1 → milieu du quadripôle
Ligne 6	Mesures de polarisation provoquée (PP)
	0 → pas de mesure de PP

1 → présence de données PP

Ligne 7 1° mesure ; x, a, ρ

Ligne 8 2° mesure ; même

....

....

Ligne n Présence de données topographiques :

0 → pas de données topos

2 → données topos

Ligne n+1 nombre des données topos

Ligne n+2 données topos ; x, z

Ligne n+3 données topos même

....

....

....

Ligne m Numéro du point topo de 1^{ère} électrode

Ligne m+1 0

Ligne m+2 0

Ligne m+3 0

Ligne m+4 0

Le logiciel Res2Dinv requiert des données strictement présentées de cette manière. Un éditeur de texte (Edit data/Edit data file) permet de visualiser les fichiers pour vérifier le format en cas de problème de lecture et de rectifier les éventuelles erreurs. Par ailleurs, il est aussi possible d'éliminer des mauvais points (Edit data/Exterminate bad datum points), de scinder les données quand elles sont très nombreuses (Edit data/Splice large data set), de renverser les pseudosections (Edit data/reverse pseudo-section), etc.

Utilisation du programme Res2Dmod

L'utilisation du programme de modélisation Res2Dmod développé par Loke commence en premier lieu par l'écriture d'un fichier texte d'extension .Mod. Ce fichier (*******Mod**) a une structure particulière au logiciel et organisé selon une manière systématique afin d'éviter les problèmes quand nous lisons le fichier :

Ligne 1	Nom du fichier
Ligne 2	Nombre des électrodes
Ligne 3	Nombre des niveaux des données de pseudo-section
Ligne 4	Signe pour un levé sous-marin 0 → pour non un levé non sous-marin
Ligne 5	L'unité (la petite) d'espacement entre les électrodes
Ligne 6	Signe pour le type de modèle de grille. 2 → pour entrer les profondeurs définies par l'utilisateur des lignes de maillage.
Ligne 7	Décalage du premier bloc du modèle à partir de la 1 ^{ère} électrode 0 → pour éviter les problèmes de lecture
Ligne 8	Nombre des blocs du modèle définis par l'utilisateur
Ligne 9	Nombre des valeurs de résistivité dans le modèle
Ligne 10	Nombre des nœuds par unité d'espacement des électrodes (2 ou 4)
Ligne 11	Les valeurs de résistivité du modèle
Ligne 12	Nombre des rangées des blocs rectangulaires dans le modèle
Ligne 13	Les profondeurs des mailles horizontales
Ligne 14	Les résistivités des blocs de modèle sont données rang par rang
Ligne n	
...	
...	
Ligne n+1	Type de configuration utilisée :

- 1 → Wenner
- 2 → Pôle-pôle
- 3 → Dipôle-dipôle
- 4 → Wenner Bêta
- 5 → Wenner Gamma
- 6 → Pôle-dipôle
- 7 → Wenner-Schlumberger
- 8 → Dipôle-dipôle équatorial

Ligne m+1 0

Ligne m+2 0

Ligne m+3 0

Ligne m+4 0

Après avoir lu le fichier sans rencontrer des problèmes (menu File/Read file with forward model), la commande (menu Edit/Edit model) permet de visualiser le modèle et de changer les valeurs de résistivités, selon le modèle géologique adopté (modélisé), et puis calculer les valeurs de potentiel (Model computation/Calculate potential values). Il y a d'autres paramètres utilisés dans le calcul, comme par exemple : le choix de la méthode de calcul à utiliser (MEF ou MDF), le facteur géométrique pour les profils sous-marins (underwater profil), le changement de type d'électrode sans créer d'autre fichier et leur paramètres (a et n), le type de calcul en cas du modèle de PP et l'ajout d'un nouveau modèle de résistivité. De nombreuses options permettent aussi de changer certains paramètres (échelle verticale et horizontale, échelle de couleur, etc.).

L'étape suivante consiste à enregistrer les résultats au format (******.Dat**) du logiciel de Res2Dinv. Via la sous-option (menu Edit/Save results in Res2Dinv format) afin de faire l'inversion, l'utilisateur peut choisir l'ajout de bruit ou non comme résistivité apparente ou voltage dépendant.

Il est possible d'éditer les pseudo-sections par l'enregistrement direct en fichier .BMP, soit en enregistrant les résultats au format du logiciel Surfer.

Description du clavier de Résistivimètre SARIS

Les touches de fonction



La touche de marche **On**.



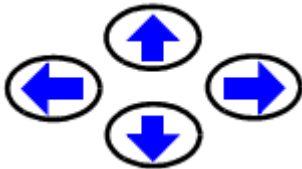
La touche arrêt **Off**.



La touche **Enter** sert à acquitter une séquence de frappes.



La touche **CANCEL** est utilisée pour effacer les données ou pour déplacer le curseur d'un espace en arrière.



Les touches flèches déplacent le curseur soit, à droite, à gauche, vers le haut ou vers le bas.



Arrêt d'urgence :

Arrêtera immédiatement l'injection du courant.



TO



Les touches de fonction **F1** à **F5** accèdent aux options sous-menu. Ces options varieront selon le présent menu. Par exemple, dans l'écran la touche F1 vous permet d'accéder aux paramètres sous-menu.



Appuyez sur la touche **Sounding/Profile** pour faire un SEV ou un profil.



Démarrage de lecture de résistivité une fois le profil a été bien configuré.

Fonction/Touches alphanumériques



En tapant le chiffre **1**, les lettres **a**, **b** et **c**, ainsi que l'accès à l'écran de configuration.



En tapant le chiffre **2**, les lettres **d**, **e** et **f**, ainsi que l'accès à l'écran de levé.



En tapant le chiffre **3**, les lettres **g**, **h** et **i**, ainsi que l'accès à l'écran de mémoire.



En tapant le chiffre **4**, les lettres **j**, **k** et **l**, ainsi que l'accès à l'écran de réglage pour ajuster la luminosité.



En tapant le chiffre **5**, les lettres **m**, **n** et **o**, ainsi que l'accès à l'écran d'aide.



En tapant le chiffre **6**, les lettres **p**, **q** et **r**, ainsi que l'accès à l'écran d'aide.



En tapant le chiffre **7**, les lettres **s**, **t** et **u**, ainsi que l'accès à l'écran d'information.

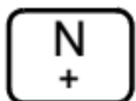


En tapant le chiffre **8**, les lettres **v**, **w** et **x**, ainsi que l'accès à l'écran de note.

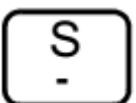


En tapant le chiffre **9**, les lettres **y** et **z**, ainsi que l'accès à l'écran du rappel de données.

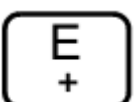
Direction/Signe



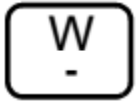
En tapant dans la direction Nord (**North**), l'augmentation du contraste et en entrant un signe positif (+).



En tapant dans la direction Sud (**South**), le décroissant du contraste et en entrant un signe négatif (-).



En tapant dans la direction Est (**East**), l'augmentation du contraste et en entrant un signe positif (+).



En tapant dans la direction Ouest (**West**), le décroissant du contraste et en entrant un signe négatif (-).

Paramètres d'inversion

Inversion settings

Initial damping factor (0.01 to 1.00)

0.1500

Minimum damping factor (0.001 to 0.75)

0.030

Local optimization option (0=No, 1=Yes)

1

Convergence limit for relative change in RMS error in percent (0.1 to 20)

2

Minimum change in RMS error for line search in percent (0.5 to 100)

0.5

Number of iterations (1 to 30)

6

Vertical to horizontal flatness filter ratio (0.25 to 4.0)

2

Model for increase in thickness of layers (0=default 10%, 1=default 25%, 2=user defined)

2

Number of nodes between adjacent electrodes (2 or 4)

4

Flatness filter type, Include smoothing of model resistivity (0=model changes only, 1=directly on model)

0

Reduce number of topographical data points? (0=No, 1=Yes. Recommend leave at 0)

0

Carry out topography modeling? (0=No, 1=Yes)

0

Type of topography trend removal (0=Average, 1=Least-squares, 2=End to end)

0

Type of Jacobian matrix calculation (0=Quasi-Newton, 1=Gauss-Newton, 2=Mixed)

1

Increase of damping factor with depth (1.0 to 2.0)

1.1000

Type of topographical modeling (0=None, 1=No longer supported so do not use, 2=uniform distorted FEM, 3=underwater, 4=damped FEM, 5=FEM with inverse Swartz-Christoffel)

0

Robust data constrain? (0=No, 1=Yes)

1

Cutoff factor for data constrain (0.0001 to 0.1))

0.0500

Robust model constrain? (0=No, 1=Yes)

1

Cutoff factor for model constrain (0.0001 to 1.0)

0.0050

Allow number of model parameters to exceed data points? (0=No, 1=Yes)

1

Use extended model? (0=No, 1=Yes)

1

Reduce effect of side blocks? (0=No, 1=Slight, 2=Severe, 3=Very Severe)

0
Type of mesh (0=Normal, 1=Fine, 2=Finest)
1
Optimise damping factor? (0=No, 1=Yes)
1
Time-lapse inversion constrain (0=None, 1&2=Smooth, 3=Robust)
0
Type of time-lapse inversion method (0=Simultaneous, 1=Sequential)
0
Thickness of first layer (0.25 to 1.0)
0.3750
Factor to increase thickness layer with depth (1.0 to 1.25)
1.0500
USE FINITE ELEMENT METHOD (YES=1, NO=0)
0
WIDTH OF BLOCKS (1=NORMAL WIDTH, 2=DOUBLE, 3=TRIPLE, 4=QUADRUPLE,
5=QUINTIPLE)
1
MAKE SURE BLOCKS HAVE THE SAME WIDTH (YES=1, NO=0)
1
RMS CONVERGENCE LIMIT (IN PERCENT)
2
USE LOGARITHM OF APPARENT RESISTIVITY (0=USE LOG OF APPARENT
RESISTIVITY, 1=USE RESISTANCE VALUES, 2=USE APPARENT RESISTIVITY)
0
TYPE OF IP INVERSION METHOD (0=CONCURRENT, 1=SEQUENTIAL)
0
PROCEED AUTOMATICALLY FOR SEQUENTIAL METHOD (1=YES, 0=NO)
0
IP DAMPING FACTOR (0.01 to 1.0)
0.250
USE AUTOMATIC IP DAMPING FACTOR (YES=1, NO=0)
0
CUTOFF FACTOR FOR BOREHOLE DATA (0.0005 to 0.02)
0.00010
TYPE OF CROSS-BOREHOLE MODEL (0=normal, 1=half size)
0
LIMIT RESISTIVITY VALUES (0=No, 1=Yes)
0
Upper limit factor (10-50)
50.000
Lower limit factor (0.02 to 0.1)
0.020
Type of reference resistivity (0=average, 1=first iteration)
0
Model refinement (1.0=Normal, 0.5=Half-width cells)
1
Combined Marquardt and Occam inversion (0=Not used, 1=used)
0
Type of optimisation method (0=Gauss-Newton, 2=Incomplete GN)

2
Convergence limit for Incomplete Gauss-Newton method (0.005 to 0.05)
0.005
Use data compression with Incomplete Gauss-Newton (0=No, 1=Yes)
0
Use reference model in inversion (0=No, 1=Yes)
1
Damping factor for reference model (0.0 to 0.3)
0.01000
Use fast method to calculate Jacobian matrix. (0=No, 1=Yes)
1
Use higher damping for first layer? (0=No, 1=Yes)
1
Extra damping factor for first layer (1.0 to 100.0)
5.00000
Type of finite-element method (0=Triangular, 1=Trapezoidal elements)
1
Factor to increase model depth range (1.0 to 5.0)
1.050
Reduce model variations near borehole (0=No, 1=Yes)
0
Factor to control the degree variations near the boreholes are reduced (2 to 100)
5.0
Factor to control variation of borehole damping factor with distance (0.5 to 5.0)
1.0
Floating electrodes survey inversion method (0=use fixed water layer, 1=Incorporate water layer into the model)
1
Resistivity variation within water layer (0=allow resistivity to vary freely, 1=minimise variation)
1
Use sparse inversion method for very long survey lines (0=No, 1=Yes)
0
Optimize Jacobian matrix calculation (0=No, 1=Yes)
0
Automatically switch electrodes for negative geometric factor (0=No, 1=Yes)
1
Force resistance value to be constant with the geometric factor (0=No, 1=Yes)
0
Shift the electrodes to round up positions of electrodes (0=No, 1=Yes)
0
Use difference of measurements in time-lapse inversion (0=No, 1=Yes)
0
Use active constraint balancing (0=No, 1=Yes)
0
Type of active constraints (0=Normal, 1=Reverse)
0
Lower damping factor limit for active constraints
0.4000
Upper damping factor limit for active constraints

2.5000

Water resistivity variation damping factor

8.0000

Use automatic calculation for change of damping factor with depth (0=No, 1=Yes)

0