

Présentation de la tomographie électrique

La tomographie de résistivité électrique est une méthode géophysique qui permet d'imager en 2D ou 3D les variations de résistivité électrique du sous-sol en fonction de la profondeur. C'est une méthode très utilisée pour les prospections géophysiques durant les 60 dernières années. Elle se met en place à différentes échelles, de celle de la structure géologique kilométrique, à celle du laboratoire, décimétrique. Les applications de l'imagerie électrique dans la littérature sont multiples : détection de cavités ou de fractures en milieux karstiques (Militzer et al., 1979; Szalai et al., 2002; Nguyen et al., 2005), détection de structures archéologiques (Papadopoulos et al., 2006; Papadopoulos et al., 2007; Drahor et al., 2008), localisation et estimation des directions et vitesses d'écoulements des eaux souterraines et des transports de contaminants (White, 1994; Barker and Moore, 1998), suivi de migrations de polluants et d'eaux salées en milieux côtiers dans le sous-sol (Bevc and Morrison, 1991; Mesbah, 1998; Chambers et al., 1998; Oldenborger et al., 2007; Monego et al., 2010).

Dans cette partie nous présenterons brièvement les lois physiques utilisés dans cette méthode, la grandeur physique mesurée, et les différentes configurations de mesures utilisées. Nous finirons par leur utilisation dans le cadre de la prospection de cavités dans le sous-sol.

4.1 Champs, courant et résistivité électrique

La résistivité électrique ρ correspond à la capacité d'une roche ou d'un sol à résister à la circulation d'un courant électrique d'intensité I par unité de volume plus ou moins hétérogène et anisotrope (Rey et al., 2006). Elle se définit comme le rapport entre la

différence de potentiel V mesurée aux extrémités d'un cylindre (Fig. 4.1) de section S et de longueur l , et l'intensité I du courant électrique, c'est-à-dire

$$\rho = \frac{SV}{lI}. \quad (4.1)$$

L'inverse de la résistivité électrique (exprimée en Ohm m) s'appelle la conductivité électrique, noté σ , et s'exprime en S/m. On définit la résistance R du matériau comme

$$R = \frac{l}{S} \rho. \quad (4.2)$$

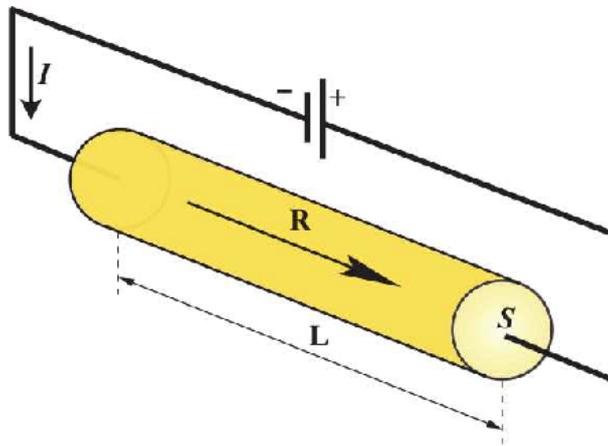


FIGURE 4.1: Schéma illustratif de la résistivité ρ définie à partir d'un courant I circulant à travers un cylindre de résistance R et de surface S .

La mesure électrique est généralement faite en utilisant quatre électrodes (Fig. 4.2). Un courant d'intensité I est injecté dans le milieu par l'intermédiaire de deux électrodes (que l'on appellera C_1 et C_2), et la mesure de différence de potentiel V est effectuée entre les deux autres électrodes P_1 et P_2 . En première approximation, le courant est supposé continu, ce qui permet de négliger le déphasage et donc d'assimiler l'impédance du milieu à sa partie réelle, uniquement représentée par sa résistance R . D'après la loi d'Ohm, dans un demi-espace homogène et infini dans lequel est injecté un courant I à partir d'une source ponctuelle, la résistivité est définie pour chaque mesure de potentiel par

$$\rho = k \frac{V}{I}, \quad (4.3)$$

où k est un facteur qui dépend de la disposition des électrodes. Dans la configuration présentée sur la Figure 4.2,

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}}, \quad (4.4)$$

où r_1 est la distance entre les électrodes C_1 et P_1 , r_2 est la distance entre C_2 et P_1 , r_3 est la distance entre C_1 et P_2 et r_4 est la distance entre C_2 et P_2 .

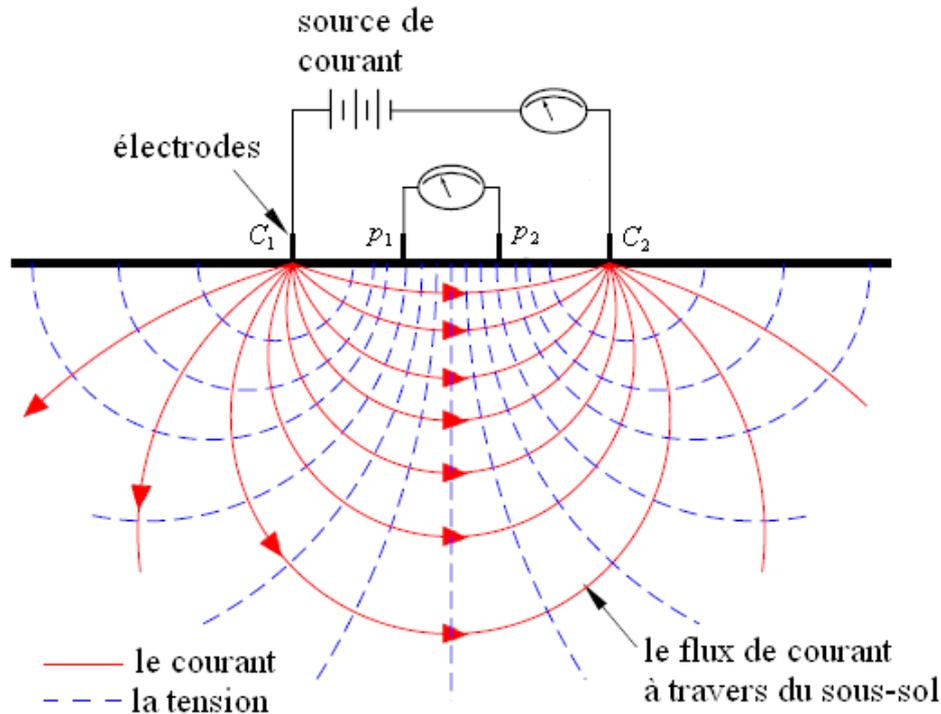


FIGURE 4.2: Dispositif d'électrodes pour la prospection électrique dans un milieu supposé homogène, les lignes de flux de courant (rouge) et les lignes de potentiel électrique égal (bleu) (d'après <http://www.nga.com>).

Ainsi, à partir de la valeur du courant injecté I , de la différence de potentiel V et de l'écartement entre les différentes électrodes, la résistivité électrique apparente du sous-sol est calculée. On la nomme résistivité "apparente" car elle correspond à une résistivité intégrant toutes les résistivités d'un volume de sol sondé non homogène. C'est la résistivité apparente que l'on aurait dans un volume de sol homogène équivalent à celui intégrant les éventuelles hétérogénéités. Pour déterminer les variations de résistivité électriques, il suffit de répéter l'acquisition en utilisant les 4 électrodes à des endroits différents et avec des distances inter-électrodes différentes. La profondeur d'investigation dépend de la configuration utilisée, de la distance inter-électrodes et de la distribution de résistivité électrique dans le sol sondé.

4.2 La résistivité électrique des roches

La résistivité électrique est l'une des propriétés physiques des roches avec la plus grande plage de valeurs possibles, allant de $1.6 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$, pour l'argent, les métaux natifs et le graphite, à $10^7 \Omega\text{m}$ pour du basalte, par exemple. La Figure 4.3, donne les valeurs de résistivité des roches communes, des matériaux du sol et des produits chimiques (Lekmine, 2011).

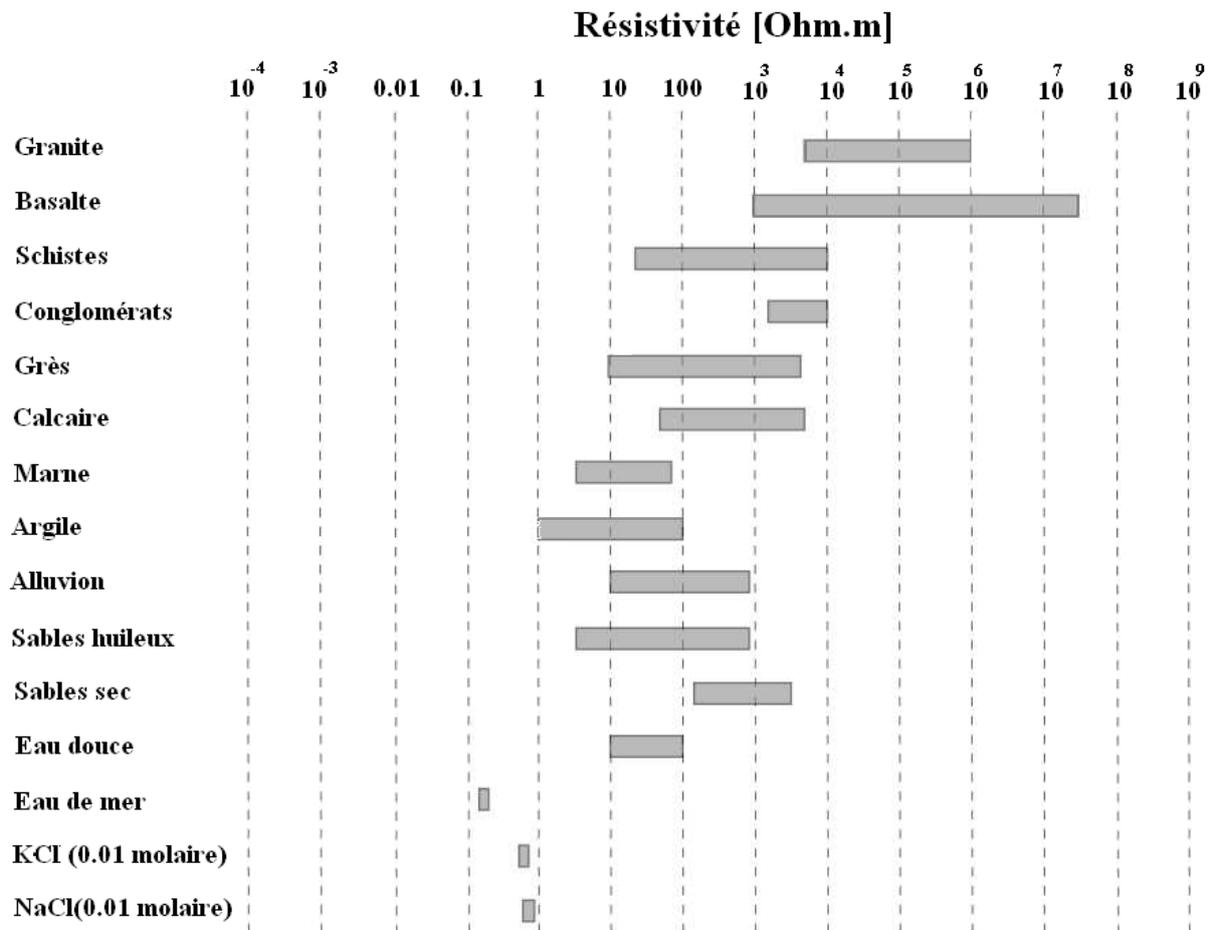


FIGURE 4.3: Gamme de résistivité électrique pour les matériaux géologiques communs (d'après Lekmine, 2011).

La capacité à limiter la propagation du courant est très variable suivant la nature du milieu, sa composition minéralogique et sa teneur en eau. Les roches ignées et métamorphiques ont généralement des valeurs élevées de résistivité. La résistivité de ces roches est fortement dépendante du degré de fracturation, et le pourcentage des fractures remplies avec de l'eau. Les roches sédimentaires, qui sont généralement plus poreuses et ont une teneur plus élevée en eau à l'état naturel, ont normalement des valeurs plus faibles de résistivité.

Cependant, on peut noter les chevauchements entre les valeurs de résistivité des différentes classes de roches et des sols de la Figure 4.3. C'est parce que la résistivité d'un échantillon de roche ou de sol dépend d'un certain nombre de facteurs tels que la porosité, le degré de saturation en eau et la concentration de sels dissous. Par exemple, la résistivité d'un milieu dépend de sa teneur en fluide et de la résistivité de ce fluide et donc de la teneur en ions dissous. Ainsi une eau douce est plus résistante qu'une eau de mer. Les sols argileux sont en moyenne moins résistants que les sols sableux.

Pour convertir une image des variations de résistivité dans le sous-sol en une image géologique, il est important d'avoir une certaine connaissance des valeurs de résistivité typiques pour différents types de matériaux du sous-sol ainsi que d'autres informations a priori comme la géologie de la zone étudiée ou des informations provenant d'autres types de mesures géophysiques ou de points de forages.

4.3 Les différentes configurations de mesures

La configuration des électrodes détermine la sensibilité des mesures à la distribution des résistivités dans les sols. Donc la géométrie utilisée détermine l'information obtenue par la mesure. Typiquement il s'agit de déterminer la configuration la plus adaptée au cas d'étude. Ces géométries sont employées pour le sondage électrique, les traînées et l'imagerie électrique. Plusieurs dispositifs de mesures sont disponibles, Pour les imageries 2D, seules les géométries linéaires sont utilisées : les électrodes sont déployées sur une ligne. Chaque configuration possède ses propres caractéristiques (profondeur d'investigation, nombre de combinaisons possibles, résolution horizontale et résolution verticale). Grâce à différentes combinaisons des positions des électrodes d'injection et des électrodes de mesure du potentiel électrique, il est possible de déterminer la résistivité électrique à différentes profondeurs et dans différentes positions le long du profil d'acquisition. L'espacement entre les électrodes est augmenté pour obtenir des informations sur les couches plus profondes du sous-sol. La Figure 4.4 montre les différentes configurations possibles (Loke, 2004) : trois méthodes Wenner, les méthodes pôle-pôle, dipôle-dipôle, pôle-dipôle, Wenner-Schlumberger et finalement la méthode équatoriale dipôle-dipôle. Le facteur géométrique

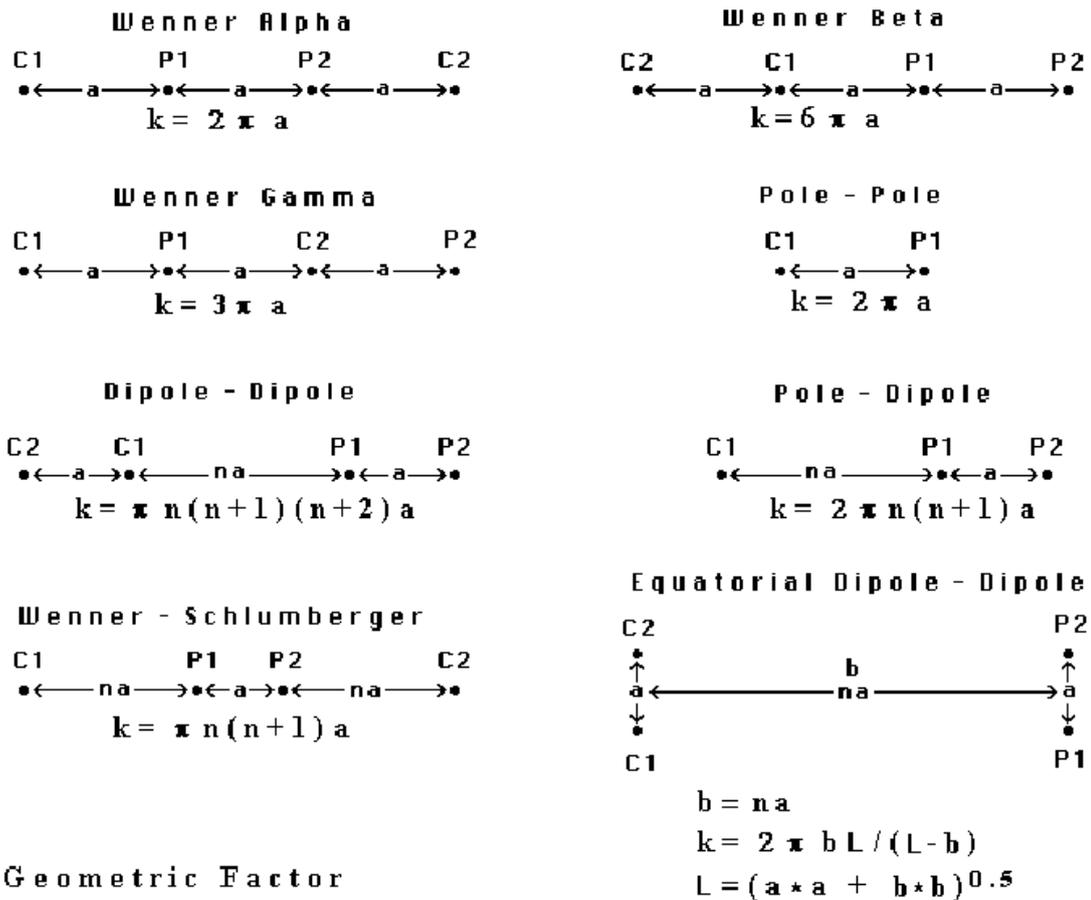


FIGURE 4.4: Différentes géométries d'acquisition de résistivité électrique (d'après Locke, 2004).

k est indiqué pour chacune de ces géométries de mesures.

Pour effectuer sur le terrain une acquisition en 2D, avec l'une ou l'autre de ces configurations, on utilise typiquement un câble multi-conducteur reliant un certain nombre d'électrodes entre elles. Classiquement un espacement constant entre les électrodes adjacentes est utilisé. Le câble multi-conducteur est attaché à une unité de commutation électronique. La séquence de mesures, le type de tableau de mesures et d'autres paramètres sont prédéterminés par l'opérateur. Les mesures sont effectuées et enregistrées automatiquement. La Figure 4.5 montre une séquence de mesures effectuée pour le dispositif de Wenner avec un système à 20 électrodes (Loke, 2004).

Dans cet exemple, les couples d'électrodes de mesure P_1 et P_2 et d'injection C_1 et C_2 sont centrés sur un point commun. La distance inter-électrodes a est fixe et choisie judicieusement pour avoir un maximum de profondeur d'investigation et une résolution adéquate à l'étude du milieu. La première étape consiste à prendre toutes les mesures possibles avec la configuration de Wenner avec un espacement constant entre les électrodes a .

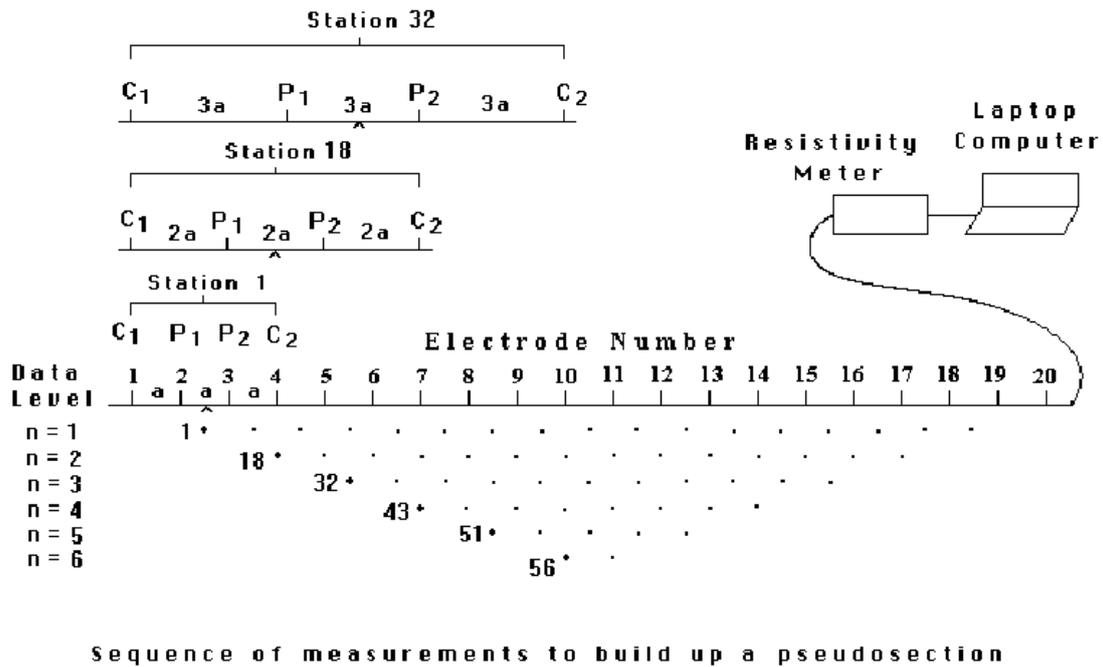


FIGURE 4.5: Principe de construction d'un panneau de mesures de résistivités apparentes pour un dispositif Wenner à 20 électrodes (d'après Loke, 2004).

Pour la première mesure, les électrodes 1, 2, 3 et 4 sont utilisées. Remarquer que l'électrode 1 est utilisée comme la première électrode d'injection de courant C_1 , l'électrode 2 comme la première électrode de mesure de potentiel P_1 , l'électrode 3 comme la deuxième électrode de mesure de potentiel P_2 et l'électrode 4 comme la deuxième électrode d'injection de courant C_2 .

Pour la deuxième mesure, les électrodes numérotées 2, 3, 4 et 5 sont utilisées pour C_1 , P_1 , P_2 et C_2 respectivement. Cette opération est répétée sur toute la ligne d'électrodes jusqu'aux électrodes 17, 18, 19 et 20 pour la dernière mesure avec l'espacement a . Pour un système avec 20 électrodes, noter qu'il y a 17 ($20-3$) mesures possibles avec l'espacement a pour la configuration Wenner.

Après avoir terminé la séquence de mesures avec l'espacement a , la séquence suivante de mesures commence avec un écartement inter-électrodes $2a$. Les électrodes 1, 3, 5 et 7 sont utilisées pour la première mesure. Puis les électrodes 2, 4, 6 et 8 sont utilisées pour la deuxième mesure. Ce processus est répété sur toute la ligne jusqu'à ce que les électrodes 14, 16, 18 et 20 sont utilisées pour la dernière mesure avec un espacement $2a$. Pour un système avec 20 électrodes, noter qu'il y a 14 ($20-2 \times 3$) mesures possibles avec l'espacement de $2a$.

Le même processus est répété pour les mesures avec espacements $3a$, $4a$, $5a$ et $6a$. Pour obtenir les meilleurs résultats, toutes les mesures possibles doivent être effectuées de ma-

nière systématique. Ceci affectera la qualité du modèle d'interprétation obtenu à partir de l'inversion des mesures de résistivité apparente (Dahlin and Loke, 1998).

Pour la configuration Wenner, l'écartement entre électrodes détermine la profondeur d'investigation ainsi que les résolutions horizontale et verticale (Slater et al., 1999). Lorsque l'espacement entre les électrodes augmente, le nombre de mesures possibles diminue. Le nombre de mesures qui peuvent être obtenues pour chaque espacement entre les électrodes, pour un nombre donné d'électrodes le long de la ligne d'enquête, dépend de la configuration d'acquisition utilisée. La configuration Wenner donne le plus petit nombre de mesures possibles par rapport aux autres configurations décrites sur la Figure 4.4. La procédure d'acquisition en mode pôle-pôle est similaire à celle utilisée pour le mode Wenner. Pour le mode dipôle-dipôle, Wenner-Schlumberger et pôle-dipôle, la procédure d'enquête est légèrement différente.

4.4 Pseudo-section

La première étape dans l'interprétation des données en tomographie électrique consiste à construire une pseudo-section. La pseudo-section est une carte de résultats 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. Toutefois la pseudo-section donne une image qui ne représente pas la vraie distribution de résistivité de la subsurface (calculée par inversion en deuxième étape) mais la distribution des valeurs de résistivité apparente en fonction de l'écartement des électrodes et de la position des quadripôles le long du profil.

La pseudo-section est utile comme moyen de présenter les valeurs de résistivité apparente mesurées sous une forme picturale, et comme un guide initial pour l'interprétation quantitative. Une erreur consisterait à essayer d'utiliser la pseudo-section comme une image finale de la résistivité vraie du sous-sol. Par exemple, pour un modèle de distributions de résistivité dans le sous-sol identique, les pseudo-sections obtenues seront différentes selon la configuration de mesures utilisée, comme illustré dans les modélisations ci-après.

4.5 Simulations de pseudo-sections

Pour tester la possibilité d'identifier des cavités à l'aide de mesures de résistivité électrique, nous avons simulé à l'aide de RES2DMOD les pseudo-sections obtenues avec différentes configurations de mesures au-dessus d'une cavité à section carrée.

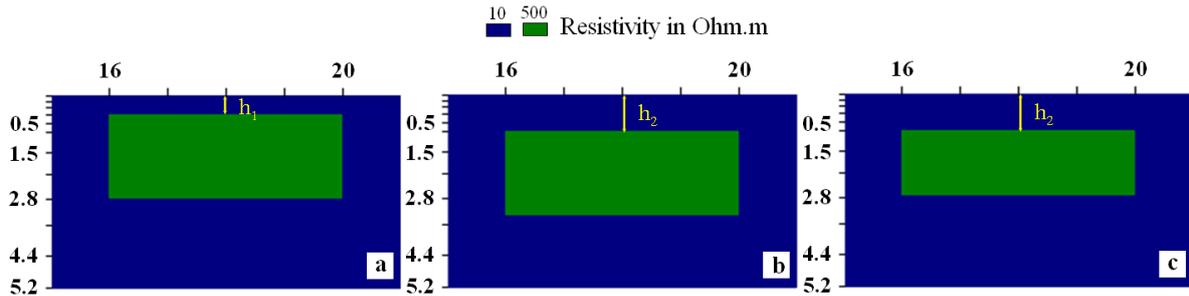


FIGURE 4.6: Les trois modèles utilisés pour modéliser avec RES2DMOD puis tester l'inversion avec RES2DINV avec trois configurations de mesures différentes. a) **Modèle 1** : une cavité de 2.4 m de haut sous une couche de $h_1 = 0.4$ m d'épaisseur. b) **Modèle 2** : une cavité de 2.4 m de haut sous une couche de $h_2 = 1$ m d'épaisseur. c) **Modèle 3** : une cavité de 1.8 m de haut sous une couche de $h_2 = 1$ m d'épaisseur.

Avec le programme RES2DMOD, l'utilisateur peut choisir la méthode des différences finies (Dey and Morrison, 1979) ou la méthode des éléments finis (Silvester and Ferrari, 1996) pour calculer les valeurs de résistivité apparente. Nous avons utilisé la méthode des différences finies.

Nous considérons le premier modèle illustré sur la Figure 4.6. Il consiste en une cavité à section rectangulaire de 4 m d'expansion latérale et 2,4 m d'épaisseur. Le modèle 1 suppose un toit de cavité à une profondeur $h_1 = 0,4$ m. Il n'est pas possible de prendre une résistivité infinie pour définir la cavité. Nous la modélisons par une résistivité de $500 \Omega \text{ m}$, alors que le milieu extérieur est supposé à $10 \Omega \text{ m}$. Un dispositif de 36 électrodes espacées de 1 m a été simulé pour différentes configurations de mesures.

Les pseudo-sections calculées pour deux configurations de mesures différentes, Wenner et dipôle-dipôle, sont présentées sur la Figure 4.7. Ces figures illustrent les sensibilités différentes de chacune de ces méthodes pour la détection d'une cavité placée au centre du profil. La méthode pôle-pôle enregistre des mesures prenant en compte des variations de résistivité en théorie jusqu'à une profondeur de 30 m dans notre exemple alors que les deux autres modes n'enregistrent de l'information que sur les premiers 6 mètres. Cependant en dessous de 6 m de l'axe vertical de cette pseudo-section (Fig. 4.7a), il n'y aucune variation de résistivité, du moins pour l'échelle de couleur prise pour cette visualisation. En mode dipôle-dipôle, pour un jeu d'électrodes correspondant à des mesures en dessous de 4 m de profondeur, la présence de la cavité ne change pas la valeur de résistivité apparente mesurée, à la différence du cas de la méthode Wenner.

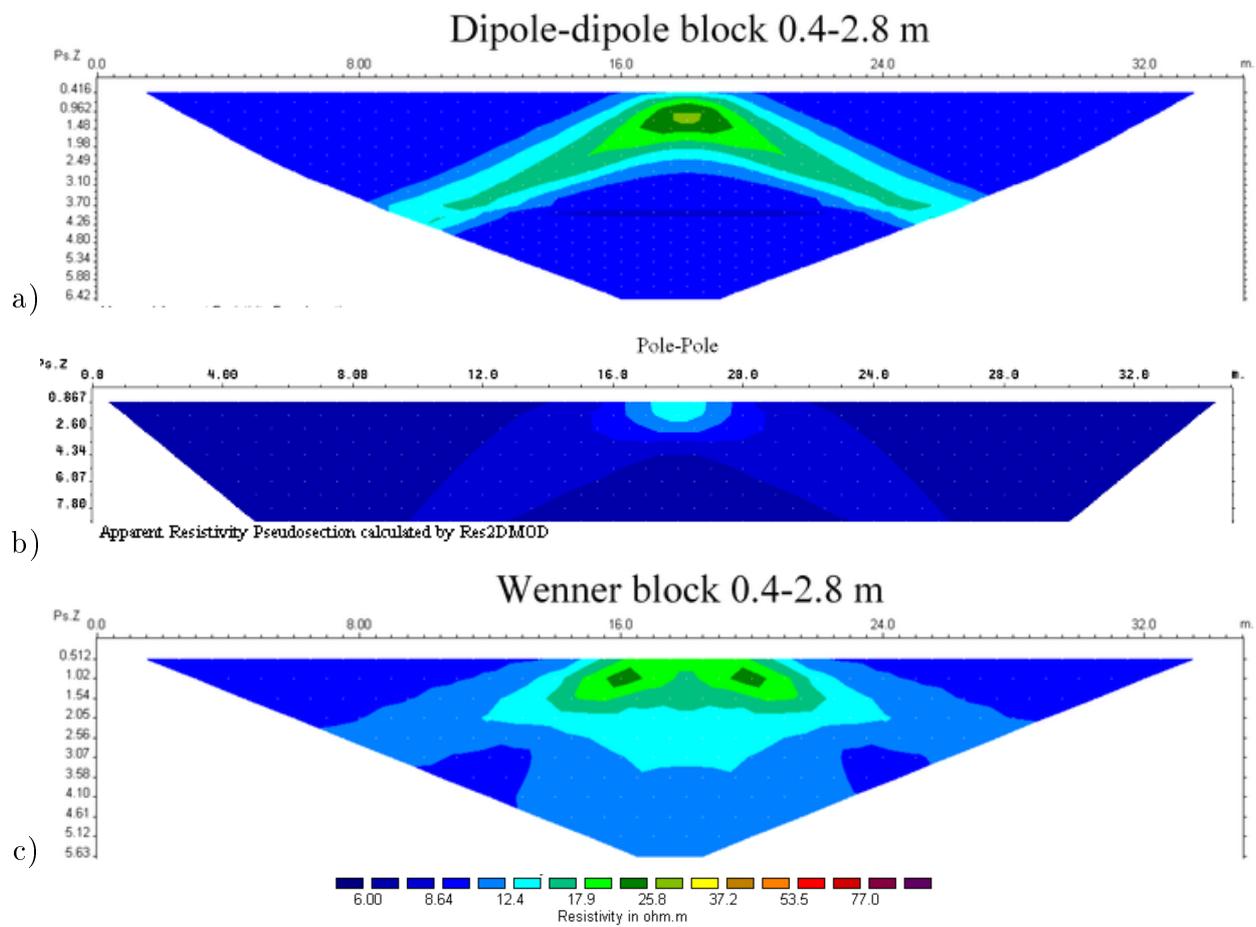


FIGURE 4.7: Pseudo sections calculées pour le modèle 1 avec trois configurations de mesures différentes : a) mode dipôle-dipôle, b) pôle-pôle et c) Wenner.

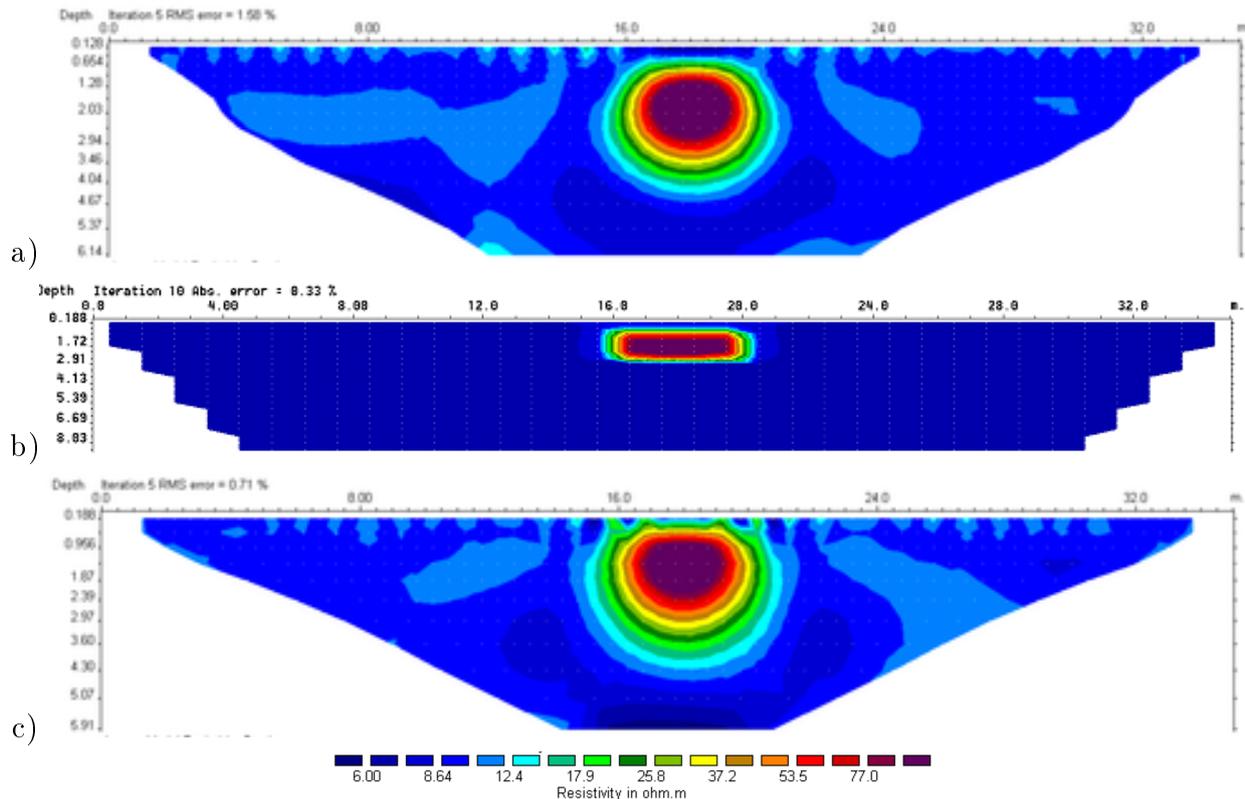


FIGURE 4.8: Modèles de distribution de résistivité inversés et interpolés spatialement pour le modèle 1 avec trois configurations de mesures différentes : a) mode dipôle-dipôle, b) pôle-pôle et c) Wenner.

4.6 Modèle de distribution de résistivité électrique

Pour aller plus loin, les données des pseudo-sections sont inversées en utilisant le programme RES2DINV en utilisant les options standards. L'inversion consiste à chercher le modèle de distribution de résistivité électrique qui explique le mieux les données au sens des moindres carrés. Pour augmenter la résolution, dans le processus d'inversion, nous avons recherché des modèles de distribution de résistivité pour des mailles de tailles correspondantes à celles que l'on aurait avec des électrodes espacées de 0,5 m au lieu de 1 m. La Figure 4.8 présente les modèles de distribution de résistivité électrique obtenus au bout de 10 itérations pour les pseudo-sections présentées sur la Figure 4.7. Il est à noter que les images présentées sur la Figure 4.8 sont obtenues par interpolation des points de calcul. Plus on va en profondeur, moins de points de calcul il y a (comme expliqué sur la Figure 4.5). Une autre représentation, moins jolie, mais plus correcte est faite en blocs comme sur la Figure 4.9.

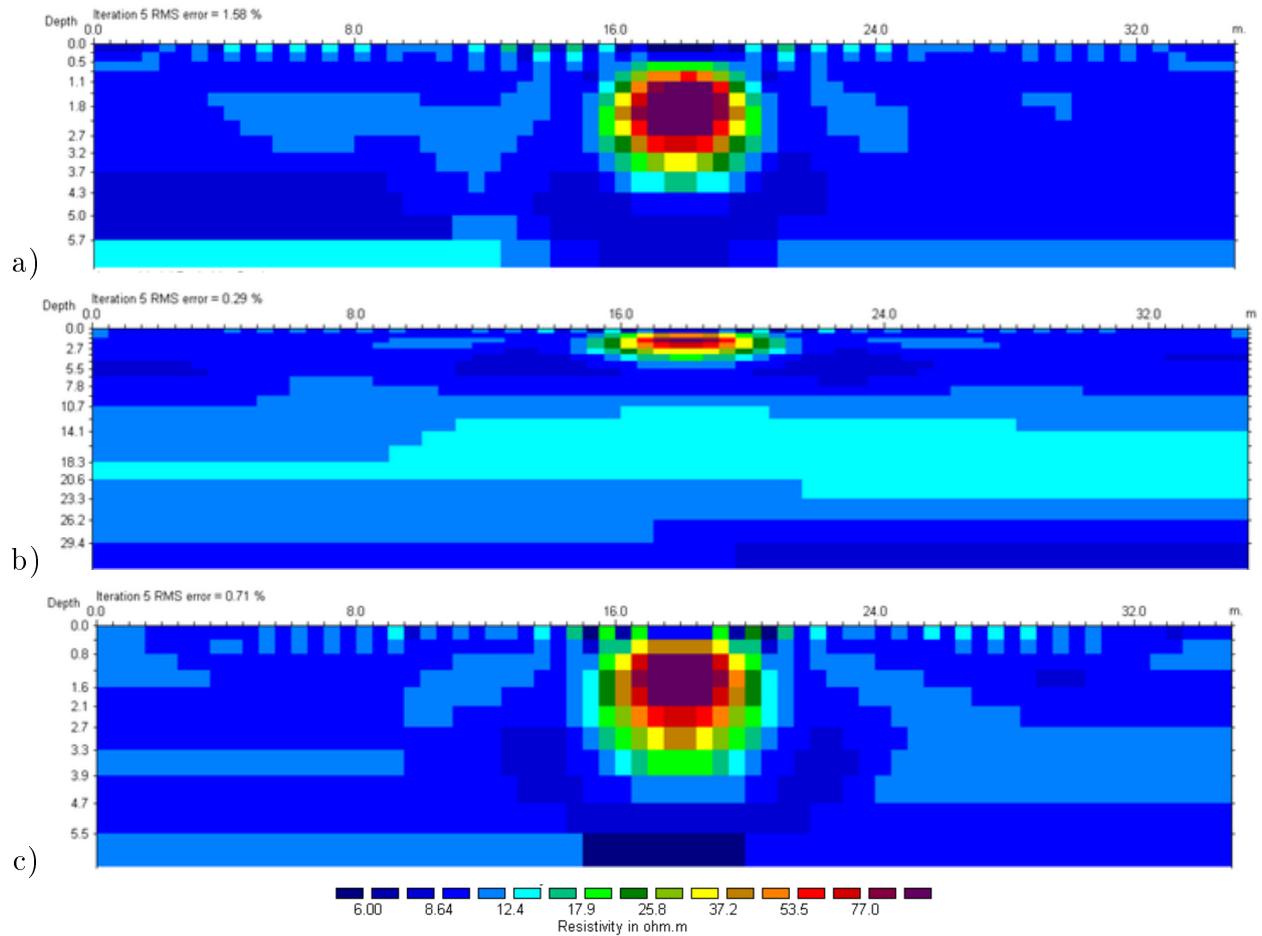


FIGURE 4.9: Présentation en blocs des modèles de distribution de résistivité inversés pour le modèle 1 avec trois configurations de mesures différentes : a) mode dipôle-dipôle, b) mode pôle-pôle et c) mode Wenner.

4.7 Tests numériques

Pour pouvoir mieux comparer les trois configurations de mesures et tester leur sensibilité à la présence de cavités, nous avons procédé, à l'aide de RES2DMOD et RES2DINV, aux calculs puis inversion des trois modèles décrits sur la Figure 4.6 pour les trois configurations : dipôle-dipôle, pôle-pôle et Wenner. Pour augmenter la résolution, dans le processus d'inversion, nous avons là aussi recherché des modèles de distribution de résistivité pour des mailles de tailles correspondant à celles que l'on aurait avec des électrodes espacées de 0,5 m au lieu de 1 m.

Les trois modèles de cavités étudiés sont :

- **modèle 1** : une cavité de 2.4 m de haut est sous une couche de sol de $h_1 = 0.4$ m d'épaisseur.
- **modèle 2** : une cavité de 2.4 m de haut est sous une couche de sol de $h_2 = 1$ m d'épaisseur.
- **modèle 3** : une cavité de 1.8 m de haut est sous une couche de sol de $h_2 = 1$ m d'épaisseur.

Les résultats dans chacun de ces modèles sont présentés dans les Figures 4.10, 4.11 et 4.12.

Les Figures 4.13, 4.14 et 4.15 montrent les valeurs de contrastes de résistivité inversés le long de coupes verticales faites au milieu du profil et horizontales faites au milieu de la cavité. Ces images montrent les différences de sensibilité des trois configurations testées.

Pour le modèle 1, nous observons dans la distribution horizontale que les trois configurations montrent clairement la position du bloc cavité de départ. Par contre, en coupe verticale, nous observons que la limite supérieure est bien marquée par la configuration Wenner, alors que les deux autres configurations surestiment la profondeur du toit de la cavité. Les configurations Wenner et dipôle-dipôle inverse une résistivité électrique maximale d'environ 200 Ωm . Avec le mode pôle-pôle, la résistivité maximale est de seulement environ 100 Ωm . La limite inférieure du bloc cavité du modèle est relativement bien marquée avec la configuration Wenner mais diffuse en mode dipôle-dipôle et pôle-pôle.

Pour le modèle 2, nous observons une délimitation de la limite supérieure correcte par les trois configurations. La limite inférieure est par contre très mal définie avec les configurations dipôle-dipôle et pôle-pôle. Le mode Wenner, même si la valeur maximale de la résistivité inversé est faible, marque mieux la limite inférieure de la cavité que les deux autres méthodes.

Pour le modèle 3, nous observons que les trois méthodes détectent une position raisonnable de la cavité horizontalement et verticalement.

En conclusion, les trois configurations testées permettent de bien déterminer la position

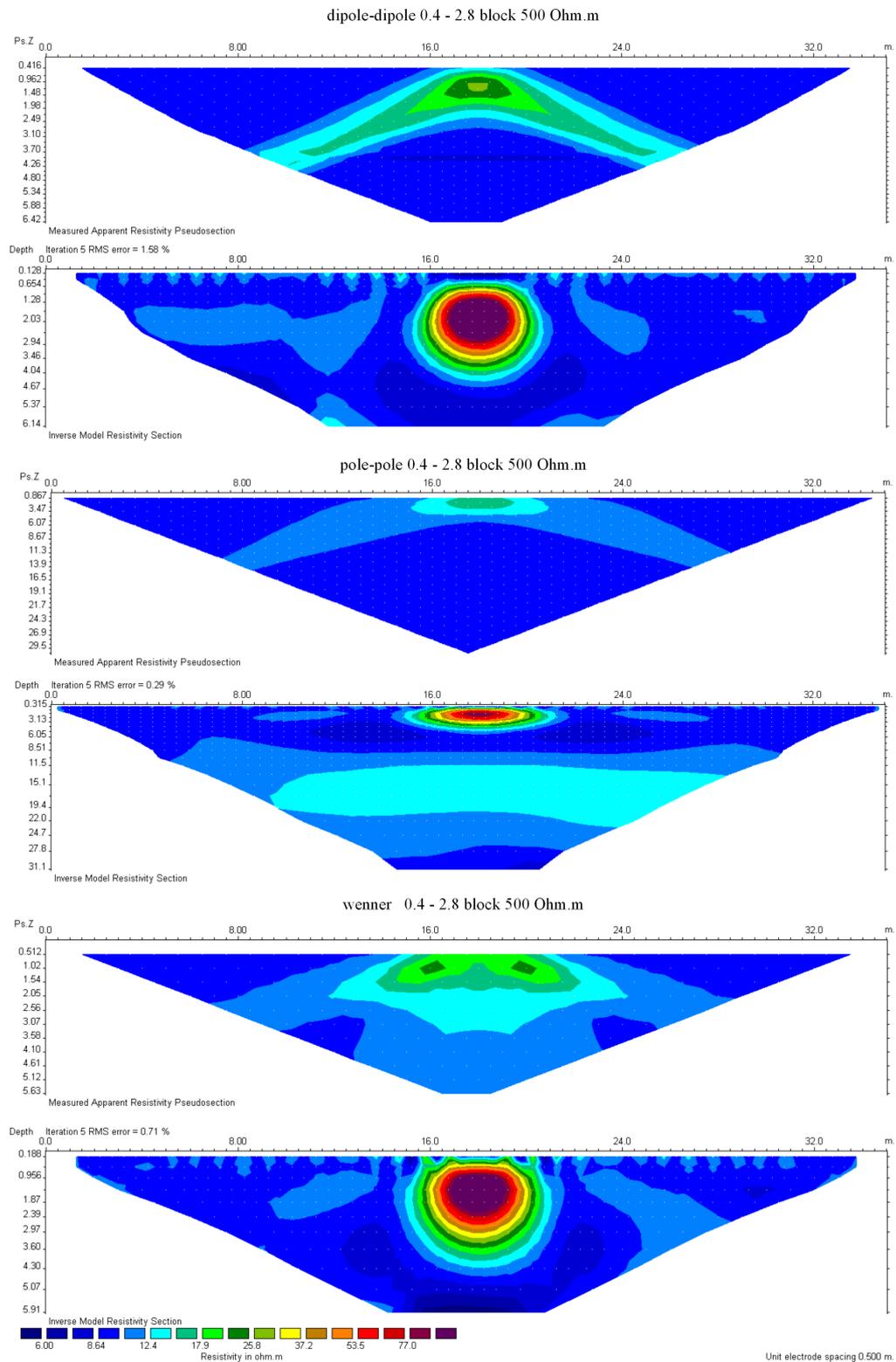


FIGURE 4.10: Pseudo-sections simulées et inversées pour les trois configurations de mesures testées pour le modèle 1 de la Figure 4.6.

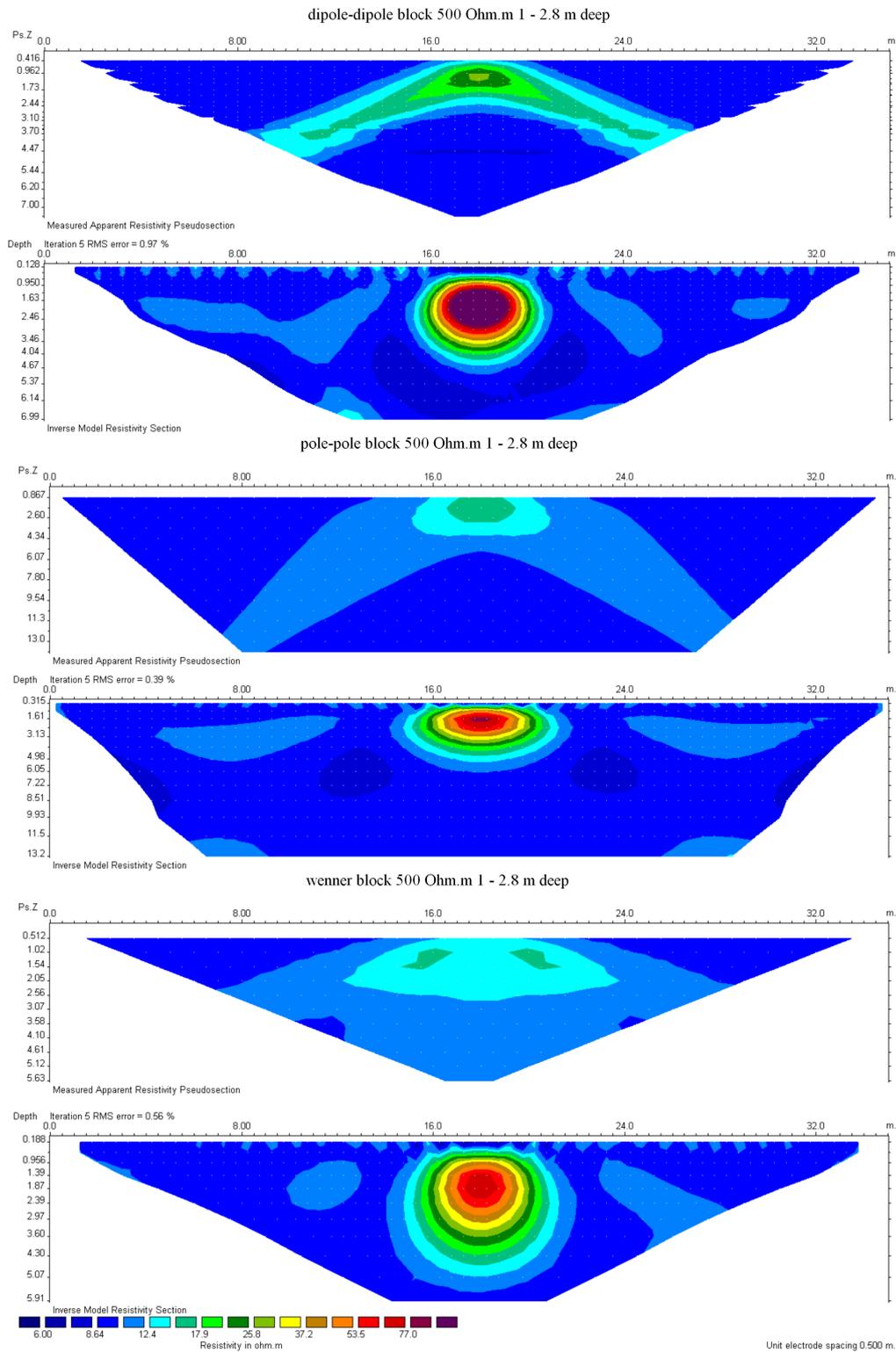


FIGURE 4.11: Pseudo-sections simulées et inversées pour les trois configurations de mesures testées pour le modèle 2 de la Figure 4.6.

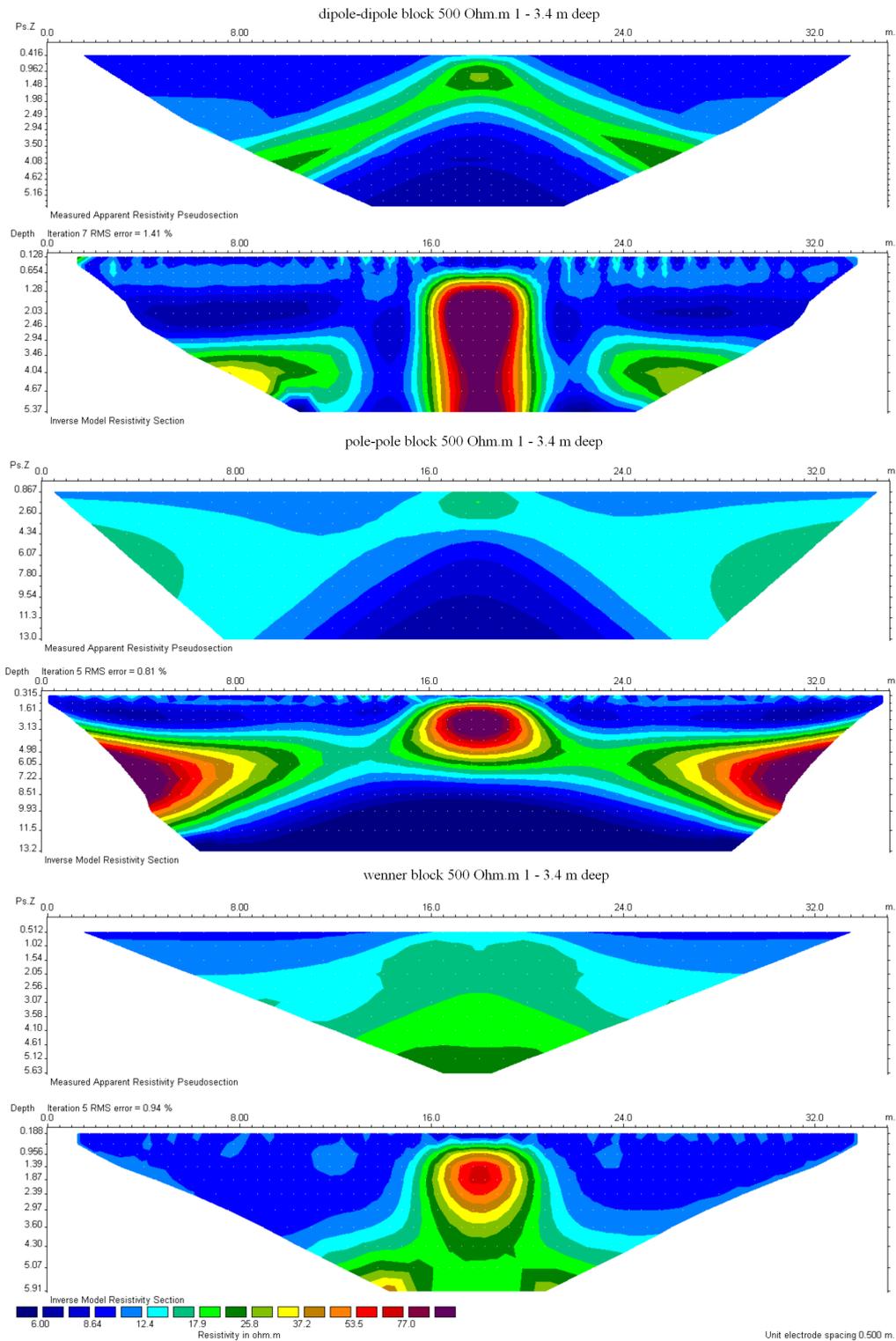


FIGURE 4.12: Pseudo-sections simulées et inversées pour les trois configurations de mesures testées pour le modèle 3 de la Figure 4.6.

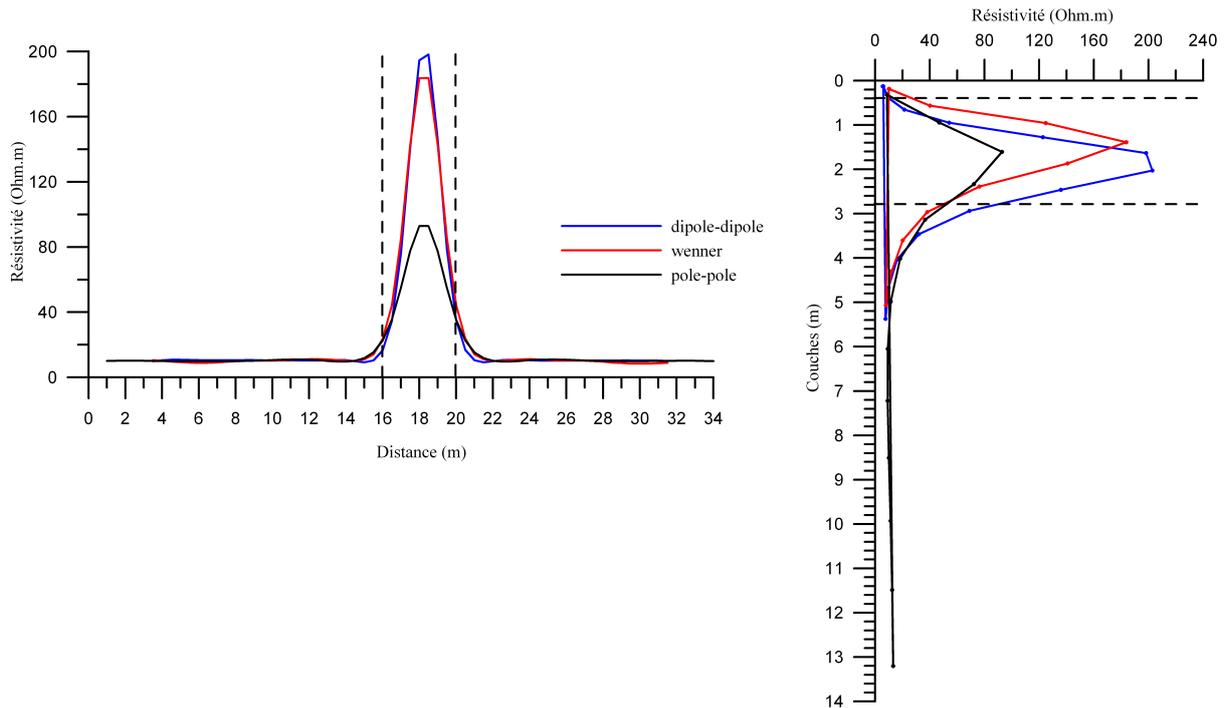


FIGURE 4.13: Comparaisons des trois configurations de mesures pour la détermination des limites horizontales (coupe à 1.6 m de profondeur) et verticales de la cavité du modèle 1. Les limites de cavités sont indiquées par des pointillées.

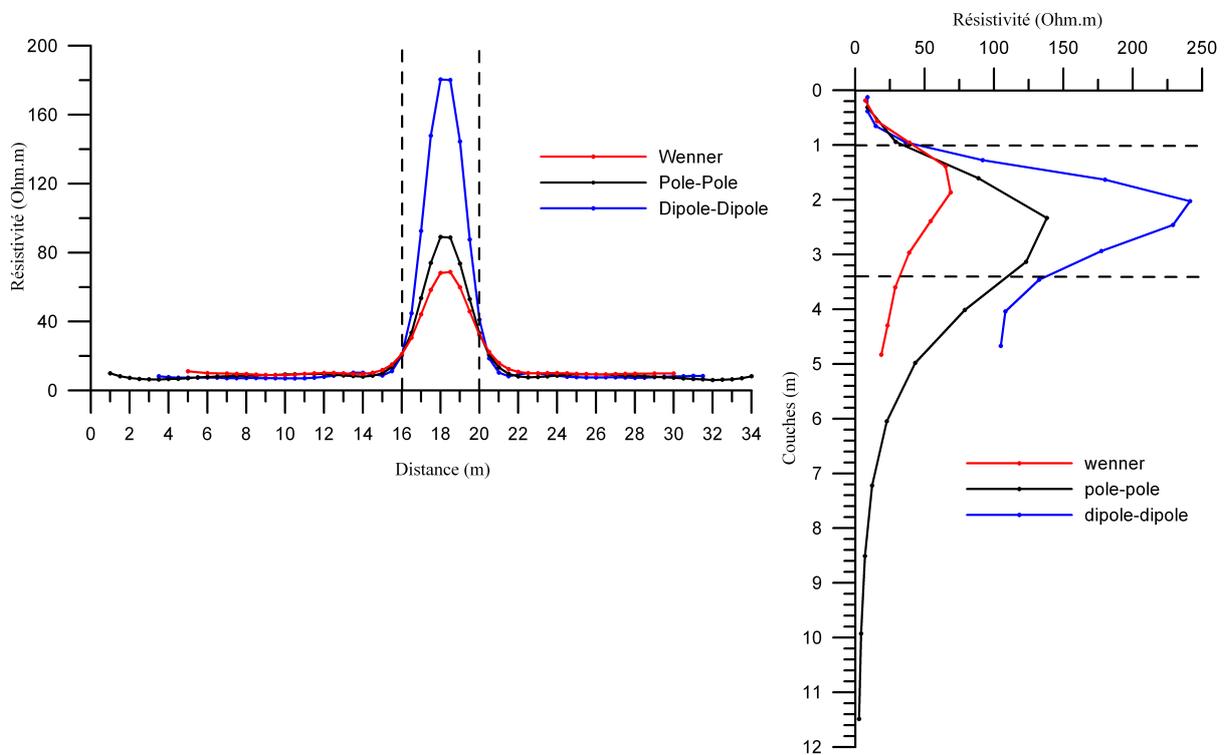


FIGURE 4.14: Comparaisons des trois configurations de mesures pour la détermination des limites horizontales (coupe à 2.2 m de profondeur) et verticales de la cavité du modèle 2. Les limites de cavités sont indiquées par des pointillées.

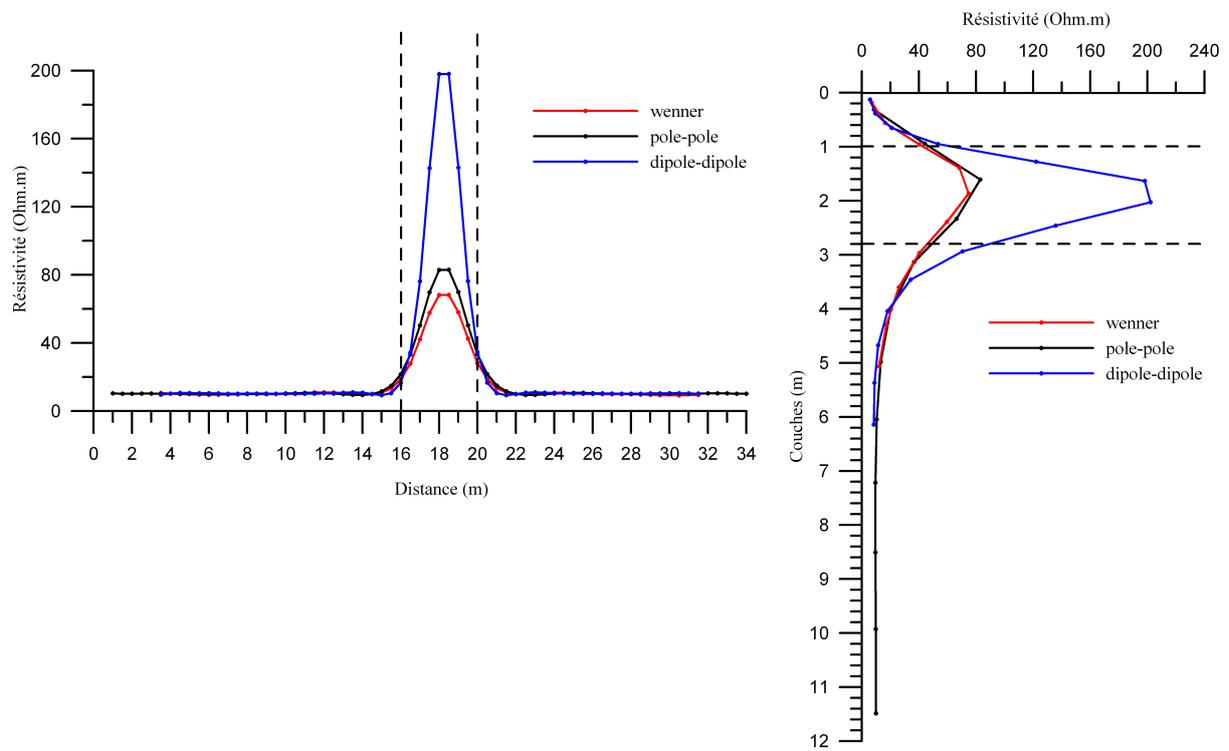


FIGURE 4.15: Comparaisons des trois configurations de mesures pour la détermination des limites horizontales (coupe à 1.9 m de profondeur) et verticales de la cavité du modèle 3. Les limites de cavités sont indiquées par des pointillées.

latérale de la cavité modélisée par un bloc de forte résistivité. Par contre, la détermination des limites supérieures et inférieures d'une cavité se fait mieux avec la méthode Wenner.

4.8 Remarques sur la tomographie électrique

D'après nos simulations, la présence de cavités dans le sous-sol est en effet décelable par des mesures de résistivité seules. Cependant, la résolution spatiale dépend fortement de la configuration de mesures utilisée, notamment de la distance entre les électrodes.

De plus il peut-être parfois difficile de planter les électrodes sur des terrains bétonnés ou goudronnés. Par exemple, l'installation de 48 électrodes dans le sous-sol bétonné d'un gymnase d'Alep (Syrie) a demandé 4 heures de travail. Chaque trou a du être fait à la perceuse électrique.

