

Rapport de stage de Master

Etude de l'effet topographique sur les mesures de
résistivité électrique dans les plantations d'hévéas
en Thaïlande

Présenté par Sylvain Pasquet



Table des matières

Table des illustrations	3
1 Remerciements	5
2 Présentation du projet de collaboration IRD – LDD.....	6
2.1 Introduction.....	6
2.2 Description du site expérimental de Ban Non Tun	7
2.3 Méthodes géophysiques utilisées	8
2.4 Analyse des résultats obtenus	9
3 Etude de l'effet topographique sur les mesures de la résistivité électrique apparente	12
3.1 Carte topographique	12
3.2 Cartographie détaillée de résistivité électrique.....	14
3.2.1 Méthode et équipement utilisés pour la cartographie	15
3.2.2 Présentation et discussion des résultats obtenus.....	18
3.3 Etat de l'art : modélisation de l'effet topographique	25
3.4 Modélisation de l'effet topographique.....	27
4 Conclusion et perspectives.....	39
5 Bibliographie	40

Table des illustrations

Figure 1 : Carte topographique du site de Ban Non Tun avec la position des arbres (points verts).	7
Figure 2 : Cartes de potentiel spontané (a.) et de résistivité électrique apparente pour $a = 0.5$ m (b.).	9
Figure 3 : Comparaison de la carte de résistivité électrique apparente (a.) avec les résultats des observations agronomiques (b. circonférence ; c. état des arbres).	10
Figure 4 : Pluviométrie sur le site de Ban Non Tun entre 2007 et 2010.	10
Figure 5 : Modèle de résistivité électrique obtenu par ERT sur le site de Ban Non Tun dans la direction S-N.....	11
Figure 6 : Cartes de résistivité électrique apparente obtenues avec différents espacements inter-électrodes (a. $a = 0.5$ m, b. $a = 1$ m, c. $a = 2$ m).	12
Figure 7 : Mesures topographiques avec le tachéomètre Nikon DTM-332.	13
Figure 8 : Superposition des isolignes d'altitude topographique et des positions des arbres sur la carte de résistivité électrique apparente ($a = 0.5$ m) du site de Ban Non Tun.....	13
Figure 9 Positionnement de la zone d'étude détaillée sur le site expérimental. Sur l'agrandissement de la carte de résistivité électrique apparente, les carrés et les croix représentent les positions des trainés azimutaux.	14
Figure 10 : Configuration d'électrodes "pôle-pôle".	15
Figure 11 : Configuration d'électrodes "Wenner- α ".	15
Figure 12 : Configuration d'électrodes "Wenner-Schlumberger".	16
Figure 13 : Configuration d'électrodes "dipôle-dipôle" axial.	16
Figure 14 : Résistivimètre « RM-15 » et multiplexeur « MPX-15 ».	16
Figure 15 : Equipement utilisé pour la cartographie de résistivité électrique sur le site de Ban Non Tun.	17
Figure 16 : Cartes de résistivité électrique apparente pour trois dispositifs (a. "pôle-pôle" avec $a = 0.25$ m ; b. "Wenner- α " avec $a = 0.25$ m ; c. "dipôle-dipôle" avec $a = 0.25$ m et $n = 1$). Les points noirs représentent les positions des mesures.....	20
Figure 17 : Cartes de résistivité électrique avec un dispositif "pôle-pôle" pour différents écartements inter-électrode (a. $a = 0.25$ m, b. $a = 0.5$ m, c. $a = 1$ m, d. $a = 2$ m).	22
Figure 18 : Anisotropie dans le plan horizontale et isolignes de résistivités (a.) et topographiques (b.).	23
Figure 19 : Cartes de résistivité électrique apparente avec la configuration « pôle-pôle » pour un écartement inter-électrode de 0.5 m (a. carte réalisée avec la barre de 1 m, b. carte réalisée avec la barre de 2 m, c. isolignes de résistivité électrique apparente superposées avec les valeurs des incertitudes).	24
Figure 20 : Cartes de résistivité électrique apparente avec la configuration « pôle-pôle » pour un écartement inter-électrode de 1 m (a. carte réalisée avec la barre de 1 m, b. carte réalisée avec la barre de 2 m, c. isolignes de résistivité électrique apparente superposées avec les valeurs des incertitudes).	25
Figure 21 : Résistivités électriques apparentes mesurées sur le site de Ban Non Tun par RM15 sur un profil perpendiculaire à la structure topographique (a. orientation 00° , b. orientation 90°).	29
Figure 22 : Modèle homogène de résistivité électrique 1000 Ohm.m utilisé pour les simulations d'effet topographique. La structure topographique a une largeur de 4 m et une hauteur de 0.5 m. ...	29
Figure 23 : Valeurs de résistivité électrique apparente calculées pour un modèle homogène ($\rho = 1000$ Ohm.m, $L = 4$ m et $h = 0.5$ m) avec 3 écartements d'électrodes (a. orientation 00° , b. orientation 90°).	30

Figure 24 : Résistivités électriques apparentes calculées avec l'orientation 90° pour différentes pentes de structure topographique en milieu homogène.	31
Figure 25 : Amplitude des anomalies calculées pour un modèle homogène en fonction de la pente de la structure topographique pour différents écartements inter-électrode et alignement d'électrodes (a. amplitude de l'anomalie résistante centrale, b. amplitude des anomalies conductrices latérales).	32
Figure 26 : Modèle à deux couches ($\rho_1 = 1000 \text{ Ohm.m}$ et $\rho_2 = 100 \text{ Ohm.m}$) utilisé pour les simulations d'effet topographique. La structure topographique a une largeur de 4 m et une hauteur de 0.5 m. ..	33
Figure 27 : Résistivités apparentes calculées pour un modèle à 2 couches ($\rho_1 = 1000 \text{ Ohm.m}$, $\rho_2 = 100 \text{ Ohm.m}$, $L = 4 \text{ m}$ et $h = 0.5 \text{ m}$) avec 3 écartements d'électrodes (a. orientation 00°, b. orientation 90°).	34
Figure 28 : Amplitude des anomalies calculées pour un modèle à deux couches en fonction de la pente de la structure topographique pour différents écartements inter-électrode et alignement d'électrodes (a. amplitude de l'anomalie résistante centrale, b. amplitude des anomalies latérales).	35
Figure 29 : Amplitudes maximum calculées pour différents écartements avec deux orientations de dispositifs pour un modèle à 2 couches (a. amplitude en fonction de la hauteur de la structure topographique, b. amplitude en fonction de la largeur de la structure).	36
Figure 30 : Modèle à trois couches ($\rho_1 = 3000 \text{ Ohm.m}$, $\rho_2 = 1000 \text{ Ohm.m}$ et $\rho_3 = 100 \text{ Ohm.m}$) utilisé pour les simulations d'effet topographique. La structure topographique a une largeur de 4 m et une hauteur de 0.5 m.	36
Figure 31 : Résistivités apparentes calculées pour un modèle à trois couches ($\rho_1 = 3000 \text{ Ohm.m}$, $\rho_2 = 1000 \text{ Ohm.m}$, $\rho_3 = 100 \text{ Ohm.m}$, $L=4 \text{ m}$ et $h = 0.5 \text{ m}$) avec 3 écartements d'électrodes (a. orientation 00°, b. orientation 90°).	37
Figure 32 : Amplitudes maximum calculées pour différents écartements avec deux orientations de dispositifs pour un modèle à 3 couches (a. amplitude en fonction de la hauteur de la structure topographique, b. amplitude en fonction de la largeur de la structure).	38

1 Remerciements

Ce projet de recherche n'aurait pas vu le jour sans le soutien d'un grand nombre de personnes. Je souhaiterais exprimer toute ma gratitude au NRCT pour m'avoir autorisé à effectuer mon stage en Thaïlande. Je voudrais également remercier tout le personnel du LDD et de l'Office of Science for Land Development à Bangkok pour leur hospitalité et leur collaboration, avec des remerciements particulier à l'attention de Dr Im-Erb Rungsun pour ses conseils avisés.

Je voudrais également transmettre mes remerciements à tous mes collègues de l'IRD et du CIRAD, et plus particulièrement à Marine Souchier, pour leur soutien sans faille au cours des 6 derniers mois. Je ne peux bien sûr pas oublier Khun Amphawan Chooaeng, Khun Jiraporn Mahaphan, Khun Khruawan Panjam et Hans-Gerhard Nehring qui m'ont si gentiment et patiemment aidé dans toutes mes démarches administratives.

Mes sincères remerciements également à tous les enseignants et étudiants Thaïs que j'ai pu rencontrer pour leur gentillesse et leur disponibilité. Je voudrais plus particulièrement remercier Dr. Vidhaya Trelo-Ges et Khun Weerachon Sakphong de Khon Kaen University, Khun Jaruwan Saengsri et Khun Pranutkun Sungwalwong de Kasetsart University, et Khun Jessada Sopharat et Khun Sakanam Lim de Prince of Songkla University.

Ma plus profonde gratitude va bien sûr à mon directeur de stage, Dr. Gaghik Hovhannissian, qui a cru en moi dès le début, et m'a offert son soutien et ses conseils tout au long de ces six mois. Ce stage n'aurait pas été possible sans sa patience et sa ténacité pour obtenir la validation du projet.

Finalement, je voudrais remercier tous nos assistants Thaïs, et plus particulièrement Khun Kasem Posri et Khun Weerawut Yotjamrut pour leur volonté constante de rendre service et d'améliorer les conditions de travail en toutes circonstances. Pour finir, je voudrais adresser des remerciements tous particuliers à mes amis Khun Worraphan Chintachao et Khun Ratchapol Siriboon, qui m'ont non seulement aidé sur le terrain, mais m'ont également fait découvrir la Thaïlande, ses traditions et sa langue.

2 Présentation du projet de collaboration IRD - LDD

2.1 Introduction

Au cours des années 60-70, le Nord-Est de la Thaïlande, majoritairement recouvert de forêts naturelles, a vu ses couverts arborés pérennes être remplacés par des cultures annuelles (riz, maïs, canne à sucre, manioc). Les sols sableux de cette région, pauvres en matière organique et fragiles, ont été fortement dégradés par l'érosion hydrique et éolienne induite par cette déforestation brutale. La disparition des arbres a également entraîné une remontée de la nappe aquifère profonde, provoquant une salinisation des sols et les rendant peu à peu stériles [Williamson D.R. et al., 1989]. L'utilisation massive d'engrais et de produits chimiques divers pour la fertilisation des sols a également contribué à ce désastre écologique.

Fin des années 80 – début 90, les institutions gouvernementales Thaï, et en particulier le Land Development Department (LDD), se sont penchées sur ce problème afin de trouver des solutions de remédiation garantissant à la fois une croissance de la productivité agricole, une augmentation des revenus des agriculteurs et une assurance pour la préservation de l'environnement. Le LDD, partenaire de longue date de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), est un organisme gouvernemental auprès du ministère de l'agriculture. Il s'occupe de gérer l'aménagement des sols, la réorganisation de l'usage des terres agricoles, la préservation des ressources, et conseille les agriculteurs sur ces différents sujets. Le projet de coopération scientifique entre le LDD et l'IRD "Impact assessment of planting rubber trees on sandy soils in NE Thailand, Phase 2" a pour objectif d'étudier les conditions spécifiques d'hévéaculture au Nord-Est de la Thaïlande et de proposer de nouvelles approches pour l'utilisation des sols et des ressources en eau afin d'augmenter la production de latex naturel et les revenus des agriculteurs.

Pour répondre à une demande mondiale de caoutchouc naturel et de papier en forte croissance, le gouvernement a pris la décision de subventionner le développement des plantations d'hévéas et d'eucalyptus dans le Nord-Est de la Thaïlande. Depuis 1991 la Thaïlande est devenue le premier producteur et exportateur mondial de caoutchouc naturel. Plus de 80% de cette production est assurée par des propriétaires de petites plantations (inférieures à 10 ha), il est donc nécessaire de protéger et développer ce secteur économique.

Le Sud de la Thaïlande présente des conditions climatiques et environnementales proches de celles de l'Amazonie, région d'origine de l'arbre hévéa. La température moyenne observée est de $26^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ avec des précipitations de 1800 à 3000 mm/an distribuées régulièrement tout au long de l'année (120 à 240 jours de pluie par an) [Gonçalves et al., 1999]. Le Nord-Est de la Thaïlande, et plus particulièrement la région de Khon Kaen, est caractérisé par un climat tropical semi-aride, bien loin de ces conditions. Si la température est favorable à la croissance des hévéas (26°C en moyenne), les précipitations sont très irrégulières et de faible intensité (1300-1400 mm/an en moyenne, répartis surtout entre avril et octobre) [Watanabe et al., 2004]. Cette irrégularité peut entraîner un manque ou un excès d'eau prolongé pouvant ralentir la croissance des arbres et diminuer la production de latex [Rao et al., 1998]. Dans les cas les plus graves, ces crises hydriques peuvent entraîner des maladies ou la mort pure et simple de la plante.

2.2 Description du site expérimental de Ban Non Tun

Le site expérimental de Ban Non Tun se situe environ 20-25 km au Sud-Ouest de la ville de Khon Kaen et s'étend sur une superficie de 3.75 ha en forme de pentagone irrégulier allongé dans la direction Nord-Sud. La différence d'altitude entre la partie Sud (amont) et la partie Nord (aval) est d'un peu plus de 10 m avec des pentes entre 2 et 5 %. Cette surface est bombée, avec la partie centrale du site plus élevée par rapport aux zones latérales (Figure 1).

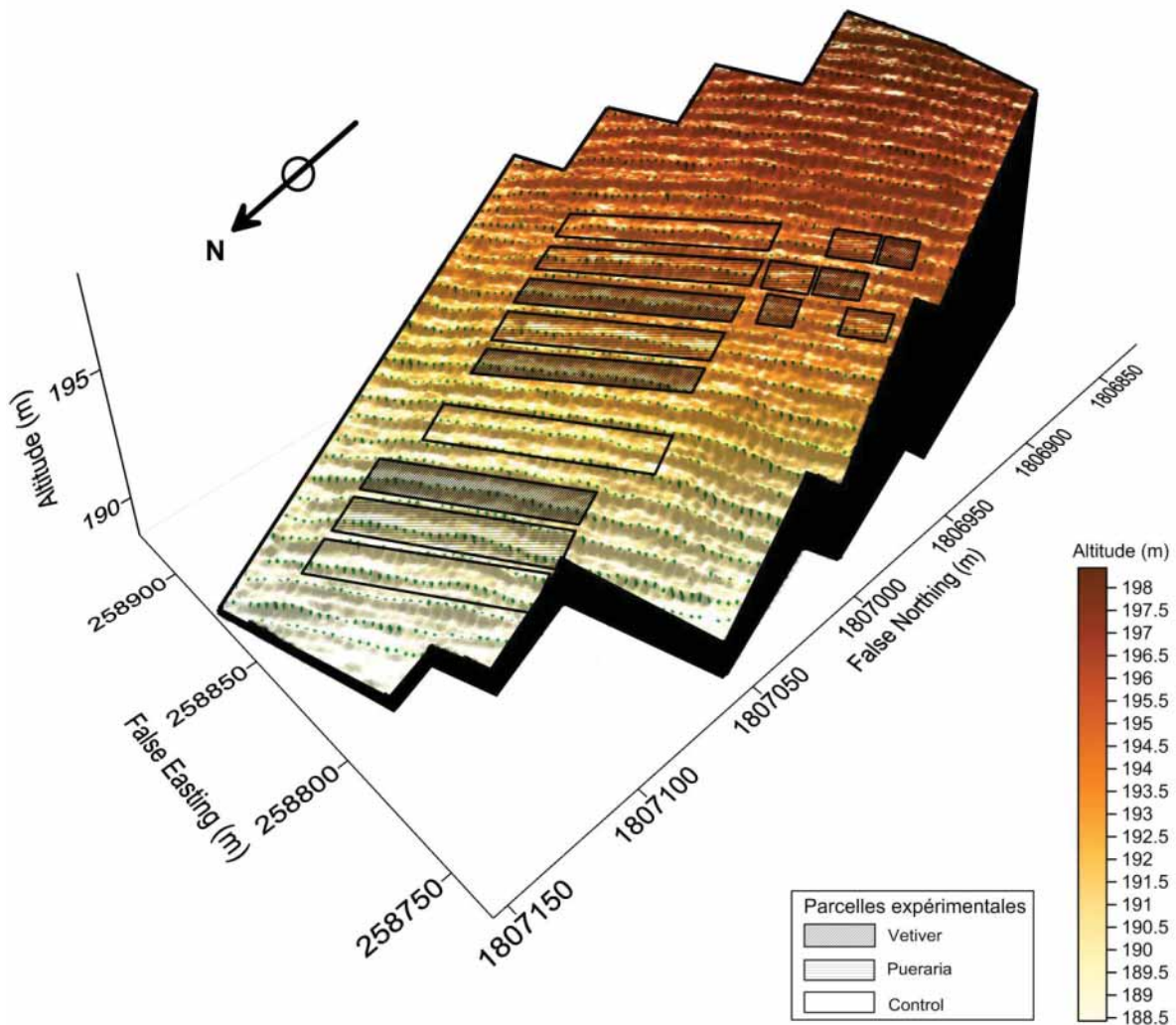


Figure 1 : Carte topographique du site de Ban Non Tun avec la position des arbres (points verts).

Ce site présente une plantation d'hévéas où les arbres sont plantés tous les 2.5 m le long de rangs espacés les uns des autres de 7 m. Les rangs sont légèrement surélevés par rapport aux inter-rangs. Ces structures ont été créées par le propriétaire pour protéger les racines des arbres de l'excès d'eau lors de la saison des pluies.

Pour les expérimentations agronomiques, des parcelles de *Pueraria* et de *Vetiver* ont été installées sur certains espaces inter-rang. Les parcelles de *Pueraria* ont pour objectif l'enrichissement naturel des sols grâce à l'azote échangé entre la plante et le sol lors de sa dégradation, alors que les parcelles de *Vetiver* servent à diminuer l'impact des excès d'eau. Le couvert végétal de ces parcelles permet également de protéger le sol contre l'érosion hydrique et éolienne.

La croissance de tous les arbres est suivie par des mesures régulières (deux fois par an) de leur circonférence à une hauteur constante ($h = 1.40$ m). Des observations plus fréquentes (mensuelles) sont réalisées sur les lignes d'arbres au milieu de chaque parcelle.

Une centrale d'acquisition des données permet d'enregistrer les informations des différents capteurs hydrologiques et géophysiques installés sur un transect central suivant la pente, et de deux stations météorologiques implantées en amont et en aval du site.

Les études menées sur ce site ont pour but d'étudier les particularités d'expérimentation agronomique en relation avec la variabilité spatiale des sols.

2.3 Méthodes géophysiques utilisées

Différentes méthodes géophysiques ont été utilisées pour étudier la variabilité spatiale des sols. Ces méthodes non-destructives permettent d'obtenir une cartographie détaillée des sols rapidement et à relativement moindre coût, contrairement aux approches traditionnelles des sciences du sol (sondages à la tarière, piézomètres, tensiomètres, sondes à neutrons,...) qui fournissent des informations spatiales très localisées (voir ponctuelles).

Trois différentes méthodes géophysiques ont été utilisées sur le site de Ban Non Tun :

- Cartographie de résistivité électrique (RM15)
- Cartographie de potentiel spontané (PS)
- Tomographie de résistivité électrique (ERT)

La méthodologie de cartographie de résistivité électrique effectuée a permis d'obtenir des cartes de la variabilité spatiale des propriétés électriques du sol correspondant à trois profondeurs d'investigation différentes (0.5, 1 et 2 m environ). Les résultats de plusieurs travaux montrent que les propriétés électriques du sol sont liées à ses caractéristiques physico-chimiques (morphologie, texture, contenu en eaux et en argile, salinité, présence de polluants...)[*Samouëlian et al.*, 2005; *Tabbagh et al.*, 2000; *Moëys et al.*, 2006]. La résistivité électrique peut donc s'avérer un paramètre performant pour caractériser la variabilité spatiale des sols.

La cartographie PS se fonde sur l'étude des potentiels électriques naturels (ou spontanés) générés dans le sol par des phénomènes physiques et électrochimiques tels que les écoulements de fluides en milieu poreux (potentiel électrocinétique), les gradients de concentration en ions (potentiel de diffusion) ou les phénomènes redox (potentiel de minéralisation) [*Hovhannissian et al.*, 2002; *Pinettes et al.*, 2002]. Ces potentiels naturels sont mesurés à l'aide d'un voltmètre et de deux électrodes impolarisables implantées dans le sol. L'application de cette méthode est simple, rapide et particulièrement utile pour la reconnaissance des hétérogénéités superficielles du sous-sol. Elle permet d'obtenir des informations phénoménologiques et qualitatives sur les propriétés du sol. En général, cette méthode est couplée avec d'autres méthodes géophysiques pour faciliter l'interprétation des résultats obtenues.

La tomographie (ou ERT pour Electrical Resistivity Tomography) permet d'obtenir la répartition des valeurs de la résistivité électrique dans un plan vertical le long d'un profil d'électrodes implantées à la surface du sol. Les mesures sont effectuées avec un Syscal Pro 72 électrodes permettant de réaliser des séquences automatiques en choisissant différentes paires d'électrodes d'injection et de

mesure. On peut ainsi représenter les résistivités électriques apparentes observées sur une pseudo-section en profondeur.

2.4 Analyse des résultats obtenus

Dans le cadre de la réalisation du projet de collaboration IRD - LDD, une cartographie PS (Figure 2.a.) a été réalisée sur le site expérimental de Ban Non Tun au début de l'année 2010 (janvier-février). Elle a été suivie d'une cartographie de résistivité électrique apparente - ρ_a (Figure 2.b.) à la fin de cette même année (octobre-novembre). Les valeurs de potentiel spontané varient dans une gamme de ± 70 mV et sont en moyennes proches de 0 mV. La carte de résistivités électriques révèle une hétérogénéité importante des valeurs observées (de 20 à 1000 Ohm.m), avec des anomalies conductrices très localisées (environ 50 Ohm.m).

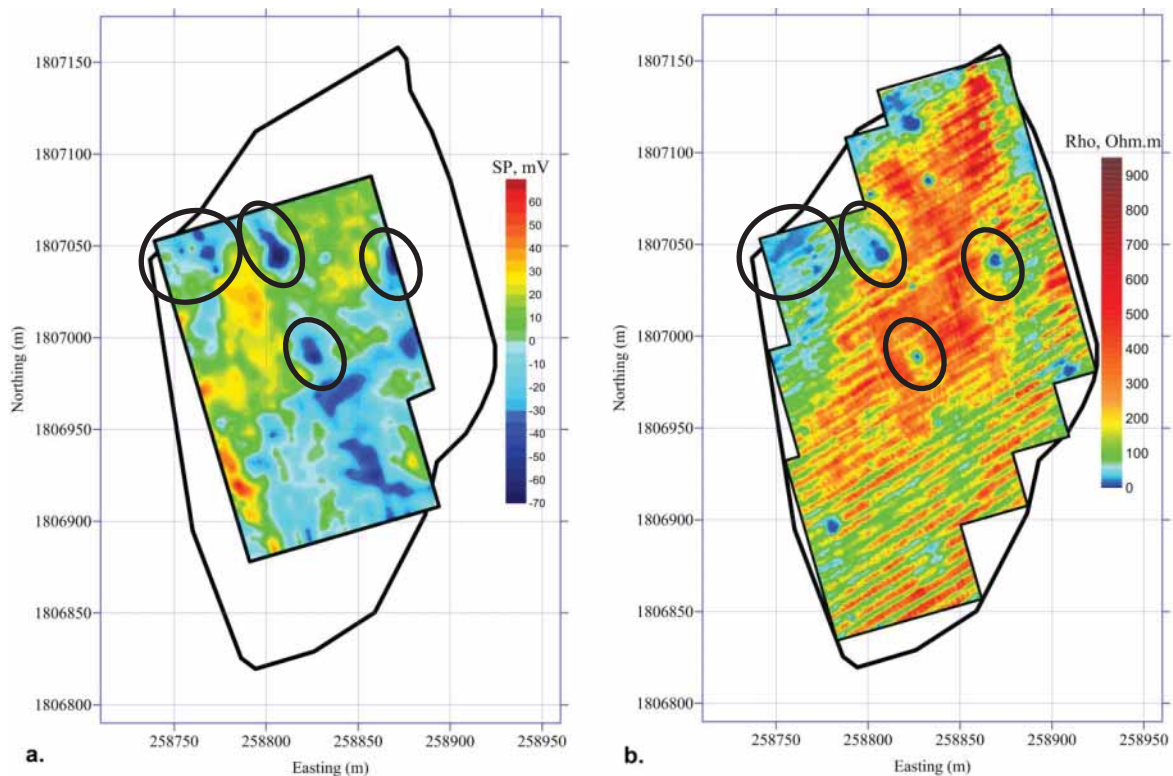


Figure 2 : Cartes de potentiel spontané (a.) et de résistivité électrique apparente pour $a = 0.5$ m (b.).

La comparaison de ces 2 cartes a permis de mettre en évidence des anomalies PS et ρ_a correspondant aux mêmes emplacements sur le site (marqués par des ellipses). A des anomalies de potentiel spontané fortement négatives (de -50 à -70 mV) correspondent des anomalies conductrices, avec ρ_a de l'ordre de 20 Ohm.m. L'observation aux mêmes endroits d'anomalies négatives du potentiel spontané et de faible résistivité peut être expliquée par la présence d'argiles humides dans le sol. En général, celles-ci sont chargées négativement à leur surface et peuvent être à l'origine du potentiel électrique négatif mesuré par la méthode PS. Les argiles sont également connues pour leur très forte capacité de rétention d'eau. Cette eau, présente dans le sol, est naturellement chargée en ions et peut générer une conductivité électrique plus élevée (ou résistivité plus faible) par rapport au milieu environnant (grès, sable,...).

Les résultats de plusieurs sondages à la tarière aux emplacements de ces anomalies confirment la présence d'argiles dans la partie superficielle du sol (entre 15 et 30 cm de profondeur). A d'autres

endroits, les argiles n'apparaissent que dans les couches plus profondes ou proches de la zone d'altération des roches mères.

Une comparaison des circonférences (Figure 3, b.) des arbres observées en septembre 2009 avec la distribution de la résistivité électrique apparente (carte avec $a = 0.5$ m, Figure 3, a.) montre une tendance générale à la faible croissance des arbres dans les zones moins résistantes. Seule une croissance relativement élevée des arbres plantés sur une zone conductrice située à l'Est du site (ellipse rouge) contredit cette tendance. Une étude approfondie de cette zone est prévue pour comprendre cette différence de fonctionnement.

Les hévéas plantés dans les parcelles de *Pueraria* sont majoritairement caractérisés par des grands diamètres. Cette croissance particulièrement élevée est probablement liée à la forte concentration d'azote dans le sol, suite à l'expérimentation agronomique.

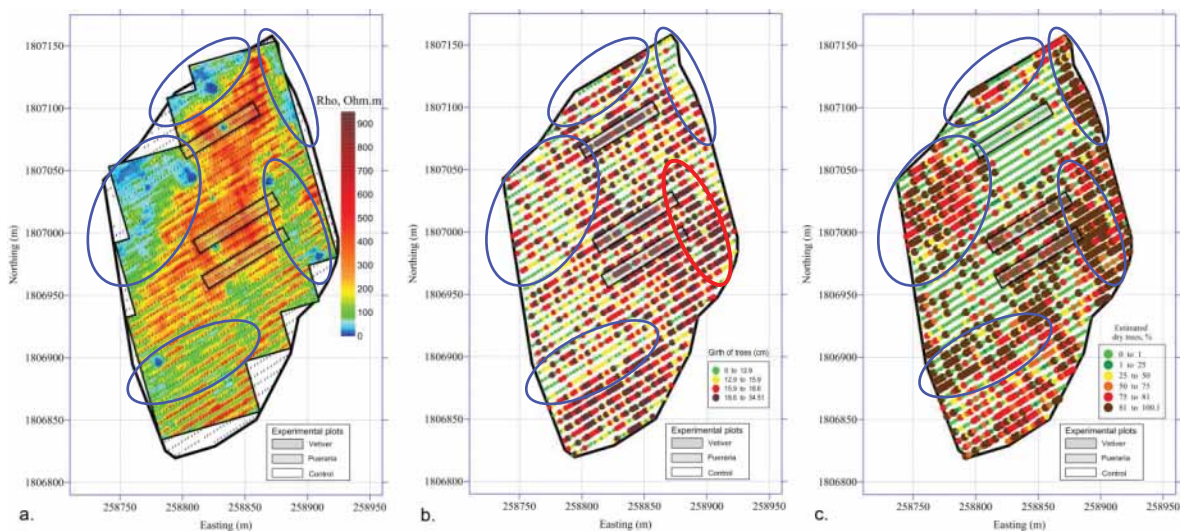


Figure 3 : Comparaison de la carte de résistivité électrique apparente (a.) avec les résultats des observations agronomiques (b. circonférence ; c. état des arbres).

La croissance naturelle des arbres a été perturbée par une crise hydrique due à une longue période sans évènement pluvieux majeur entre octobre 2009 et juin 2010 (Figure 4). En effet, si en 2007 on a observé des valeurs de pluviométrie correspondant aux moyennes annuelles caractéristiques de la région (environ 1300 mm), l'année 2008 a été caractérisée par une pluviométrie plus importante (plus de 1900 mm), suivie d'un déficit considérable de pluies au cours de l'année 2009 (seulement 1170 mm). Ces conditions climatiques extrêmes ont considérablement endommagé les arbres de cette plantation, entrainant leur assèchement partiel ou complet.

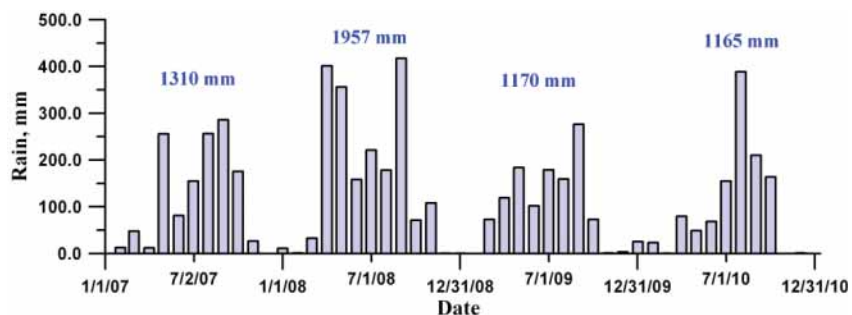


Figure 4 : Pluviométrie sur le site de Ban Non Tun entre 2007 et 2010.

En juillet 2010, une observation de l'état de chaque arbre a été réalisée pour évaluer leur endommagement. Pour représenter le degré d'endommagement des arbres sur une carte, on les a classés selon les critères suivants :

- arbres non-détériorés – 0 % ;
- arbres partiellement détériorés caractérisés par le rapport entre le nombre de branches sèches et le nombre total de branches, exprimé en pourcentage ;
- arbres dont la partie haute est complètement sèche et présentant des nouvelles branches dans la partie basse du tronc – 80 % ;
- arbres complètement secs – 100 %.

Les résultats de cette observation (Figure 3.c) ont été comparés avec la distribution des résistivités électriques apparentes (Figure 3.a). On peut remarquer un endommagement très élevé des arbres localisés dans les zones moins résistantes. Il faut également noter le grand nombre d'arbres endommagés dans les deux parcelles de *Pueraria* situées les plus au Sud.

Du point de vue de l'interaction entre la plante et le sol, l'endommagement des arbres correspondant à des zones moins résistantes peut être expliqué par la présence d'argiles dans le sol. Dans des conditions de faible humidité, la forte capacité de rétention d'eau des argiles peut entraver le fonctionnement normal des racines des arbres.

Les arbres fortement endommagés situés sur les parcelles de *Pueraria* avaient une plus forte croissance. Ils avaient donc besoin d'une quantité d'eau plus importante pour leur fonctionnement normal. La densité élevée des racines de *Pueraria* au voisinage de celles des hêtres a pu créer une forte compétition entre les deux plantes dans des conditions de faible humidité et épaisseur de sol (Figure 5).

La tomographie de résistivité électrique (Figure 5) révèle une épaisseur plus importante de sol correspondant à la parcelle située au Nord du site. Très vraisemblablement, le positionnement de cette parcelle en aval du site est à l'origine des conditions (hydriques, épaisseur et texture des sols) plus favorables à la croissance des hêtres, ce qui explique aussi la meilleure résistance des arbres face à cette crise hydrique.

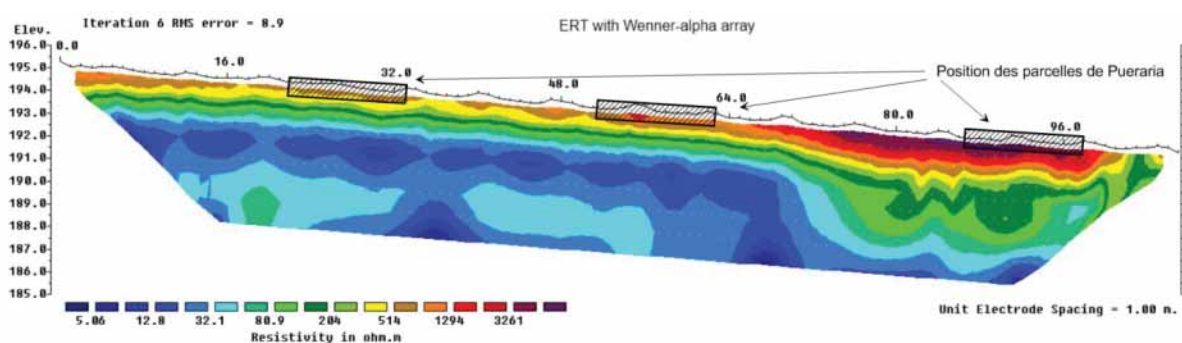


Figure 5 : Modèle de résistivité électrique obtenu par ERT sur le site de Ban Non Tun dans la direction S-N.

Les cohérences entre les observations agronomiques, les prospections pédologiques et les variations spatiales de la résistivité électrique apparente montrent la performance de ce paramètre pour caractériser la variabilité spatiale des sols.

Les résultats de la cartographie de ρ_a correspondant à trois profondeurs d'investigation différentes (Figure 6) révèlent des anomalies résistantes étendues le long des rangs des arbres.

Cependant, il n'est pas facile de donner une explication exhaustive à ces anomalies particulières. Dans le cas du site de Ban Non Tun, plusieurs sources peuvent être à l'origine de ces anomalies (topographie, structure et texture du sol, fonctionnement du système racinaire des arbres,...).

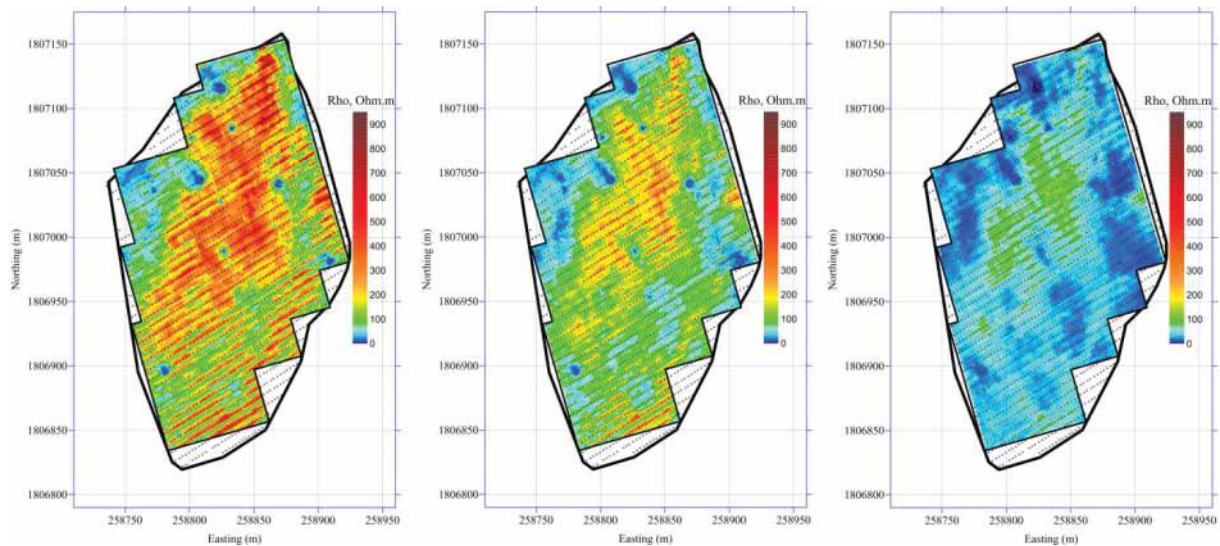


Figure 6 : Cartes de résistivité électrique apparente obtenues avec différents espacements inter-électrodes (a. $a = 0.5$ m, b. $a = 1$ m, c. $a = 2$ m).

Le stage que j'effectue dans le cadre de ce projet a pour objectif d'estimer la contribution des différentes sources pouvant générer ces anomalies. L'influence des structures topographiques sur les mesures de résistivité électrique apparente sera évaluée à l'aide de calculs numériques. Des mesures détaillées sur le terrain en utilisant différentes configurations d'électrodes permettront d'estimer la part de l'anomalie liée à la dégradation probable de la structure du sol lors de la création des structures surélevées. Ces travaux permettront d'évaluer le degré d'adaptation des différents dispositifs pendant les prospections géophysiques dans les plantations d'hévéas. Ils contribueront aussi à une compréhension plus profonde des phénomènes, et à une meilleure interprétation des résultats de cartographie de résistivité électrique.

3 Etude de l'effet topographique sur les mesures de la résistivité électrique apparente

3.1 Carte topographique

A mon arrivée en Thaïlande, j'ai participé activement à la réalisation d'une carte topographique détaillée afin d'effectuer une comparaison minutieuse entre les cartes topographique et de résistivité électrique. Nous avons choisi une résolution de 4×1 m pour cette carte, soit environ 10 000 points de mesures correspondant aux positions du dispositif de mesure de ρ_a . Les relevés topographiques ont été réalisés avec un tachéomètre Nikon DTM-332 (Figure 7) permettant une précision inférieure à 0.10 m dans le plan horizontal, et inférieure à 0.05 m pour l'altitude Z.



Figure 7 : Mesures topographiques avec le tachéomètre Nikon DTM-332.

Une superposition des isolignes d'altitudes et de la carte de résistivité électrique apparente obtenue pour $a = 0.5$ m (Figure 8) montre la cohérence entre les structures topographiques (rangs des arbres) et les anomalies résistantes étendues.

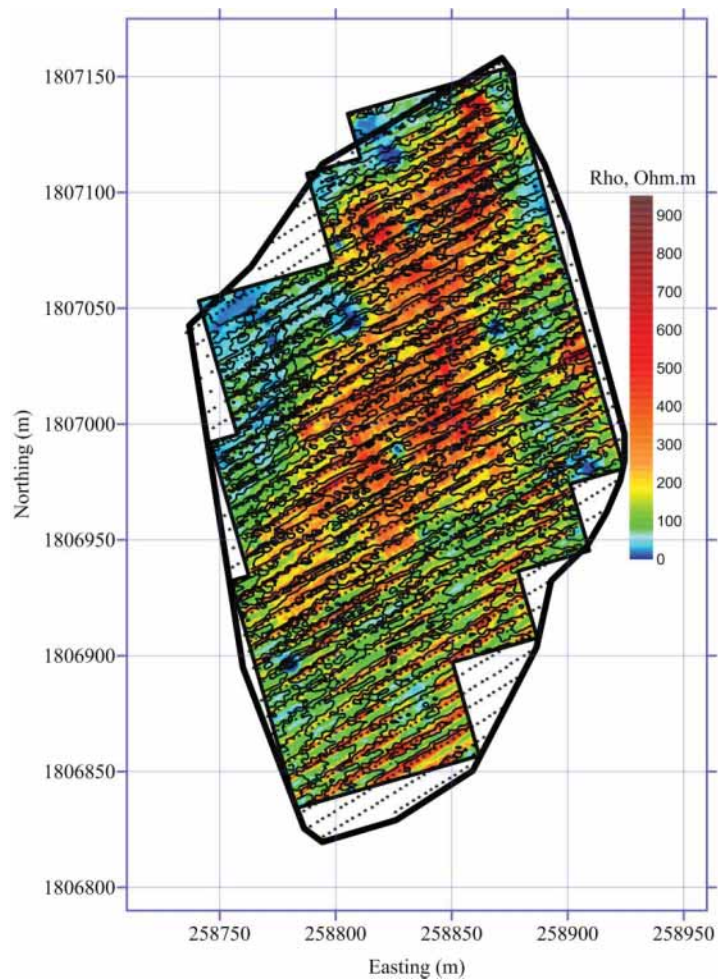


Figure 8 : Superposition des isolignes d'altitude topographique et des positions des arbres sur la carte de résistivité électrique apparente ($a = 0.5$ m) du site de Ban Non Tun.

3.2 Cartographie détaillée de résistivité électrique

Afin de mieux identifier les sources des anomalies observées sur la carte de résistivité électrique, une zone restreinte (20 m x 12 m) a été choisie dans la partie Sud-Ouest du site pour réaliser des prospections plus détaillées (Figure 9). Cette zone, centrée sur une ligne d'arbres, regroupe à la fois des anomalies résistantes étendues et une anomalie conductrice sur la structure topographique.

Pour simplifier leur représentation, les cartes sont toutes référencées dans un système de coordonnées locales associé à cette petite zone d'étude. Dans ce système, l'axe des abscisses est parallèle à l'alignement des arbres et orienté dans la direction SW-NE, l'axe des ordonnées ayant une orientation SE-NW.

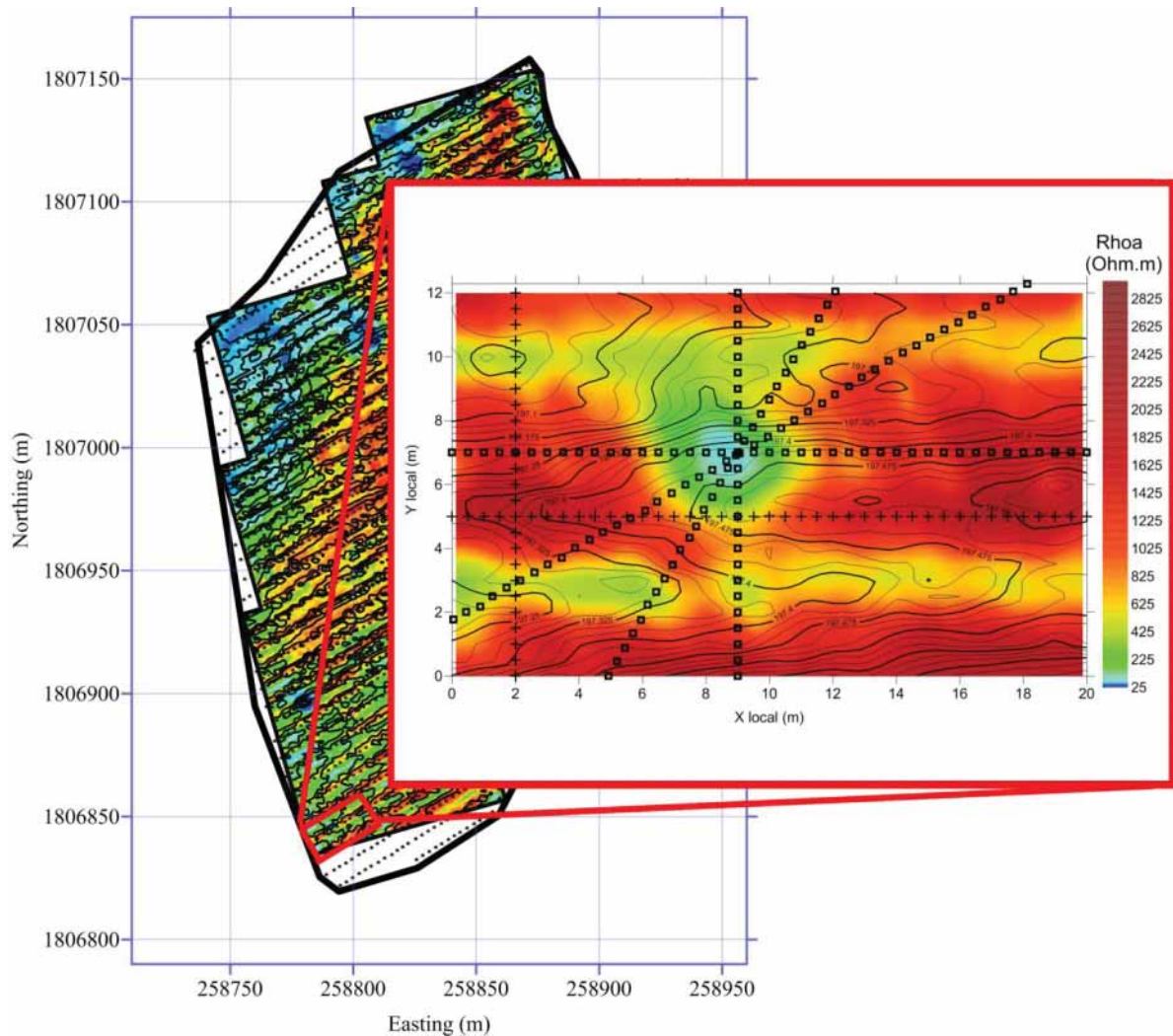


Figure 9 Positionnement de la zone d'étude détaillée sur le site expérimental. Sur l'agrandissement de la carte de résistivité électrique apparente, les carrés et les croix représentent les positions des trainsés azimutaux.

3.2.1 Méthode et équipement utilisés pour la cartographie

Une mesure de la résistivité électrique apparente ρ_a nécessite l'utilisation de 4 électrodes : deux électrodes (appelées « électrodes d'injection ou A et B ») permettent d'injecter un courant électrique dans le sol avec une intensité contrôlée I et les deux autres (appelées « électrodes de mesure ou M et N ») servent à mesurer la différence de potentiel ΔV créée par ce courant. La résistivité électrique apparente est calculée par une formule, dérivée de la loi d'Ohm :

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} ;$$

où K est le coefficient géométrique dépendant des distances entre les 4 électrodes. Il est défini par :

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} ;$$

où AM , AN , BM et BN sont les distances entre les différentes électrodes [Telford et al., 1990].

La cartographie de la résistivité électrique apparente sur le site de Ban Non Tun a été réalisée en utilisant une configuration d'électrode « pôle-pôle » (Figure 10). Avec cette configuration, la cartographie de la résistivité électrique est effectuée en déplaçant seulement deux électrodes (A et M, appelées aussi « électrodes mobiles »), les deux autres (B et N, appelées aussi « électrodes fixes ») étant installées à une distance d'au moins 20 à 25 fois l'écartement maximal entre les électrodes mobiles, considérée comme infinie en raison de leur faible influence sur les mesures.

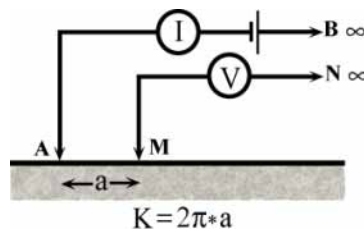


Figure 10 : Configuration d'électrodes "pôle-pôle".

En plus de ce dispositif, les mesures de la résistivité électrique apparente sur la petite surface ont été réalisées avec des configurations d'électrodes « Wenner- α », « Wenner-Schlumberger » et « dipôle-dipôle » axial.

La particularité du dispositif « Wenner- α » (Figure 11) est d'avoir les mêmes écartements entre toutes les électrodes ($AM = MN = NB = a$), les électrodes de mesure M et N étant positionné sur la même ligne entre les électrodes d'injection A et B.

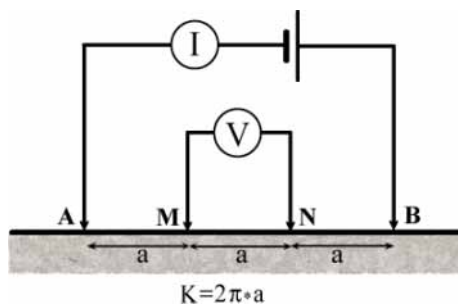


Figure 11 : Configuration d'électrodes "Wenner- α ".

Le dispositif « Wenner-Schlumberger » (Figure 12) est une évolution du dispositif « Wenner- α » dans laquelle les distances AM et NB sont égales à n fois l'écartement entre les 2 électrodes de mesures M et N (appelé aussi « dipôle de mesure »).

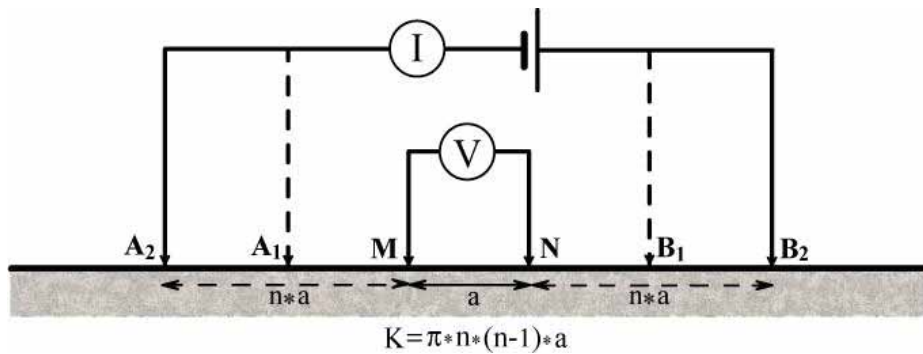


Figure 12 : Configuration d'électrodes "Wenner-Schlumberger".

Le dispositif « dipôle-dipôle » axial (Figure 13) est caractérisé par un écartement identique entre les électrodes d'injection A et B et les électrodes de mesures M et N ($AB = MN = a$), toutes étant alignées sur la même ligne. L'écartement entre les centres des deux dipôles est un multiple de la taille des dipôles (na).

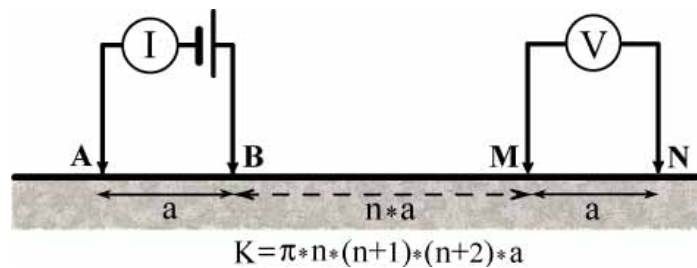


Figure 13 : Configuration d'électrodes "dipôle-dipôle" axial.

Les mesures de résistivités électriques apparentes ont été réalisées en utilisant un résistivimètre « RM-15 » avec un multiplexeur « MPX-15 » (Figure 14) permettant d'effectuer jusqu'à 8 mesures successives pour une même position.



Figure 14 : Résistivimètre « RM-15 » et multiplexeur « MPX-15 ».

Pour faciliter le déplacement des électrodes, l'équipement est monté sur un cadre modulable fixé à une barre sur laquelle sont installées des électrodes en aciers inoxydables avec un espacement fixe (Figure 15). Afin de pouvoir mettre en œuvre les mesures avec tous les dispositifs décrits ci-dessus,

trois différentes barres ont été utilisées : une barre de 1 m avec 5 électrodes espacées de 0.25 m, une barre de 2 m avec 5 électrodes tous les 0.5 m et une barre de 1.25 m avec 6 électrodes écartées de 0.25 m.



Figure 15 : Equipement utilisé pour la cartographie de résistivité électrique sur le site de Ban Non Tun.

Les mesures de résistivités apparentes sont enregistrées après avoir créé un bon contact entre le sol et les électrodes. Un protocole spécifique programmé à l'avance permet de réaliser et enregistrer 8 mesures en configuration « pôle-pôle » avec 3 espacements différents entre les électrodes A et M.

L'utilisation de la barre de 1 m avec 5 électrodes permet d'effectuer :

- 4 mesures avec $a = 0.25$ m ;
- 2 mesures avec $a = 0.5$ m ;
- 2 mesures avec $a = 1$ m (en inversant A et M pour la deuxième mesure).

Le même protocole a été utilisé avec la barre de 2 m (5 électrodes), ce qui donne la possibilité de réaliser :

- 4 mesures avec $a = 0.5$ m ;
- 2 mesures avec $a = 1$ m ;
- 2 mesures avec $a = 2$ m (en inversant A et M pour la deuxième mesure).

Un autre protocole permet d'effectuer les mesures avec les configurations « Wenner- α », « Wenner-Schlumberger » et « dipôle-dipôle » en utilisant la barre de 1.25 m à 6 électrodes:

- 3 mesures « Wenner- α » avec $a = 0.25$ m ;
- 1 mesure « Wenner-Schlumberger » avec $a = 0.25$ et $n = 3$;
- 3 mesures « dipôle-dipôle » avec $a = 0.25$ et $n = 1$;
- 1 mesure « dipôle-dipôle » avec $a = 0.25$ et $n = 3$.

L'utilisation de plusieurs écartements inter-électrode permet d'obtenir des cartes de résistivité électrique apparente intégrant des profondeurs différentes. Pour un milieu homogène, on considère que la profondeur d'investigation correspond :

- à l'écartement entre A et M pour le dispositif « pôle-pôle » ;
- à la moitié de la distance entre les centres des deux dipôles pour le dispositif « dipôle-dipôle » ;
- à $AB/3$ pour le « Wenner- α » ;
- à $AB/2$ pour le « Wenner-Schlumberger ».

L'analyse bibliographique nous a permis de distinguer les différentes réponses observées sur une même structure topographique lors de l'utilisation de différentes configurations d'électrode. Elle a également montré que l'effet topographique dépend aussi de l'orientation des électrodes et de la direction de prospection par rapport à l'axe de la structure.

Afin de pouvoir utiliser toutes ces caractéristiques, des cartes de résistivité électrique apparente très détaillées ont été effectuées sur la petite zone expérimentale en utilisant les 4 dispositifs décrits ci-dessus. Pour chaque dispositif, une double cartographie a été réalisée en changeant l'orientation de l'alignement des électrodes, et en gardant la direction des profils toujours perpendiculaire à l'axe de la structure topographique.

3.2.2 Présentation et discussion des résultats obtenus

3.2.2.1 Comparaison des cartes effectuées avec différentes configurations d'électrodes

Les résultats de la cartographie de résistivité électrique apparente obtenus sur la petite surface par des dispositifs « pôle-pôle », « Wenner- α » et « dipôle-dipôle » avec le même écartement inter-électrode 0.25 m ont été comparés pour étudier les probables différences entre les réponses observées sur les mêmes structures (Figure 16).

Les protocoles d'observations choisis pour les prospections avec le dispositif « pôle-pôle » permettent d'obtenir une répartition homogène et équidistante des points de mesures en utilisant la barre de 5 électrodes (Figure 16.a.). Pour les dispositifs « Wenner- α » (Figure 16.b.) et « dipôle-dipôle » (Figure 16.c.), on utilise la barre avec 6 électrodes. Les répartitions des points de mesure sont alors hétérogènes (manque de points entre les profils) et les positions des mesures ne sont pas identiques pour les cartographies réalisées avec ces différents dispositifs. Ces différences de densité et de positionnement des points de mesure peuvent créer des difficultés pour comparer les cartes. Afin de s'affranchir de ces difficultés, nous avons appliqué la méthode d'interpolation *nearest neighbor* avec un pas d'échantillonnage régulier et identique pour toutes les cartes. Une même échelle de couleur est utilisée pour représenter les valeurs de la résistivité électrique apparente.

Sur les trois cartes, on peut distinguer une anomalie très conductrice de forme circulaire de diamètre 5 - 6 m avec les coordonnées de son centre : $x = 9$ m et $y = 7$ m. L'anomalie très résistante allongée, correspondant à la ligne des arbres, est délimitée par deux anomalies faiblement conductrices qui s'étendent dans les zones inter-rang. On peut également distinguer deux anomalies résistantes près des limites supérieures et inférieures de la carte qui correspondent aux deux rangs d'arbres voisins de la zone d'étude.

La comparaison des cartes révèle que l'anomalie conductrice circulaire est plus large sur la carte « pôle-pôle » que sur les deux autres cartes. La valeur minimale de la résistivité observée au centre de cette anomalie est de 70 Ohm.m sur la carte « pôle-pôle » tandis que sur les deux autres cartes, cette zone est caractérisé par des valeurs proches de 100 Ohm.m. On peut également remarquer que les dimensions géométriques des anomalies correspondant aux inter-rangs sont plus élevées sur la carte « pôle-pôle », avec des valeurs de résistivité électrique plus faibles par rapport aux deux autres cartes. L'anomalie résistante correspondant à la structure surélevée a des valeurs maximales de résistivité électrique plus grandes sur les cartes « Wenner- α » et « dipôle- dipôle » (respectivement 2700 et 2900 Ohm.m) que sur la carte « pôle-pôle » (2200 Ohm.m). L'ensemble des caractéristiques de ces anomalies permet de supposer que la profondeur d'investigation du dispositif « pôle-pôle » est supérieure à celles des deux autres.

Les portions de relief surélevées correspondant aux lignes des arbres ont été mises en place en extrayant le sol des zones inter-rang pour le transférer sur les lignes des arbres. Cette opération a très certainement entraîné une dégradation importante de la structure de ces sols, ce qui pourrait entraîner une augmentation de leur résistivité électrique. En tenant compte de la meilleure caractérisation de cette couche résistante superficielle par les dispositifs « Wenner- α » et « dipôle- dipôle » (avec un écartement de 0.25 m), on peut supposer que son épaisseur est très limitée, probablement inférieure à 20 cm (Figure 16).

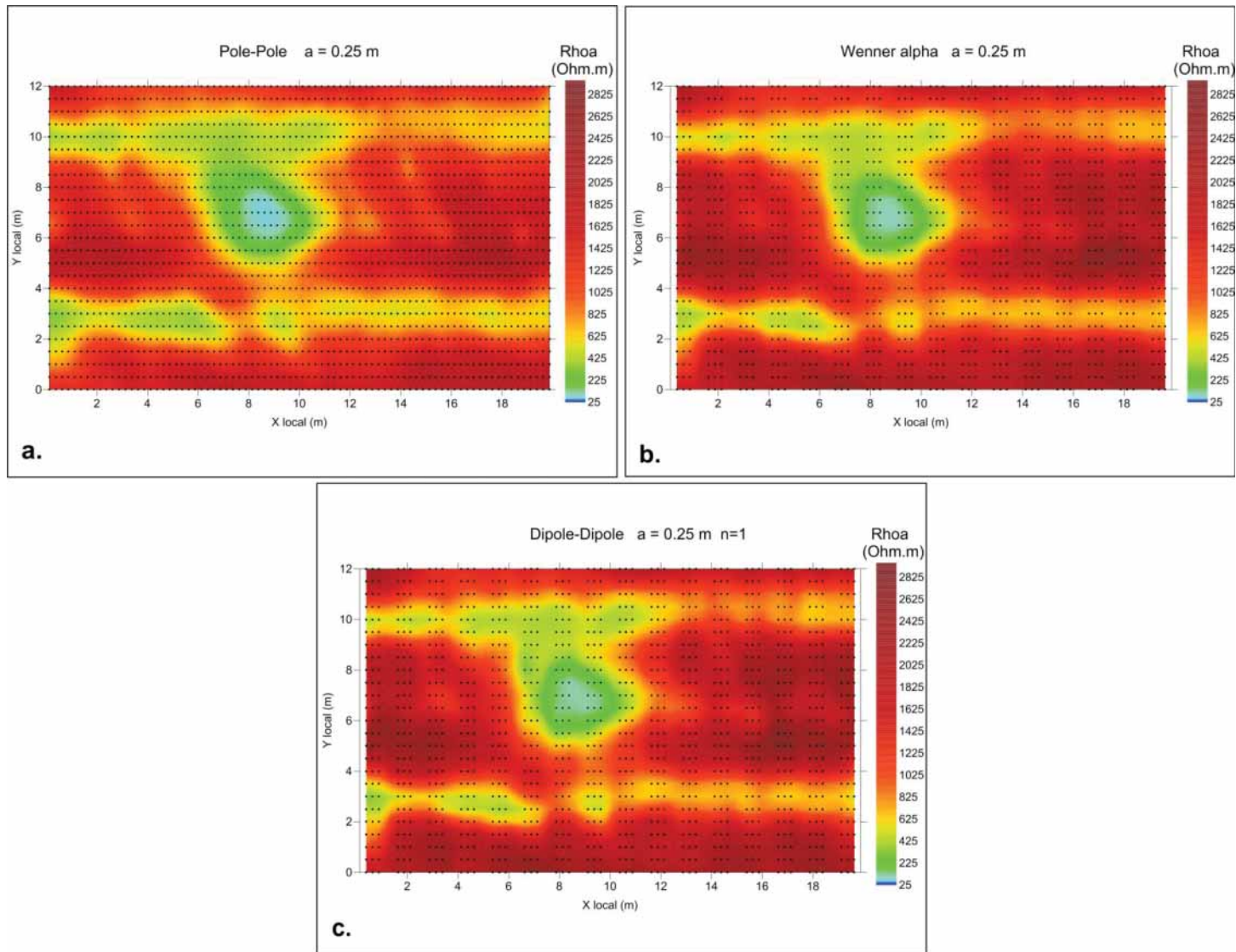


Figure 16 : Cartes de résistivité électrique apparente pour trois dispositifs (a. "pôle-pôle" avec $a = 0.25$ m ; b. "Wenner- α " avec $a = 0.25$ m ; c. "dipôle-dipôle" avec $a = 0.25$ m et $n = 1$). Les points noirs représentent les positions des mesures

3.2.2.2 Comparaison des cartes effectuées en configuration « pôle-pôle » pour différents écartements inter-électrodes

Les cartographies effectuées par le dispositif « pôle-pôle » avec différents écartements entre les électrodes mobiles ($a = 0.25, 0.5, 1$ et 2 m) permettent d'obtenir des informations sur la répartition des résistivités électriques à différentes profondeurs. La comparaison de ces cartes montre une diminution considérable des valeurs de ρ_a en profondeur (Figure 17).

Pour des profondeurs correspondant à des écartements inter-électrode de 0.25 (Figure 17.a.) et 0.5 m (Figure 17.b.), l'anomalie conductrice circulaire se distingue clairement par un contraste élevé sur le fond des couches superficielles résistantes. Sur la carte obtenue avec un écartement inter-électrode de 1 m (Figure 17.c.), on peut remarquer une diminution générale des valeurs de ρ_a et une tendance à leur répartition homogène. Sur cette carte, on peut encore distinguer les traces des parties très résistantes des couches superficielles ainsi que la partie centrale de l'anomalie circulaire. Pour une profondeur correspondant à un écartement inter-électrode de 2 m (Figure 17.d.), on ne distingue que sa forme sur le fond de l'anomalie résistante. L'existence d'une couche argileuse dans la zone d'altération à l'interface avec la roche mère pourrait expliquer la diminution très importante des valeurs de résistivité électrique observées à cette profondeur.

L'anomalie résistante correspondant au rang des arbres est visible sur toutes les cartes. L'intensité de cette anomalie diminue avec l'augmentation de l'écartement inter-électrode (2000 Ohm.m pour $a = 0.25$ m, 1200 Ohm.m pour $a = 0.5$ m, 500 Ohm.m pour $a = 1$ m et 80 Ohm.m pour $a = 2$ m). On peut remarquer une diminution très significative de sa largeur en comparant les cartes correspondant aux écartements inter-électrode 0.5 et 1 m.

Les anomalies correspondant aux zones inter-rangs deviennent légèrement plus conductrices entre les écartements 0.25 et 0.5 m (de 500 à 300 Ohm.m) et leur largeur augmente de 1 à 2 m environ. Sur la carte réalisée avec un écartement inter-électrode de 1 m, on ne distingue plus ces anomalies sur le fond des couches conductrices présentes à cette profondeur. Sur la carte réalisée avec un écartement inter-électrode de 2 m, on peut apercevoir deux anomalies allongées et très conductrices. Ces anomalies sont légèrement décalées par rapport aux positions des anomalies correspondant aux inter-rangs visibles sur les cartes obtenues avec des écartements inter-électrodes plus faibles.

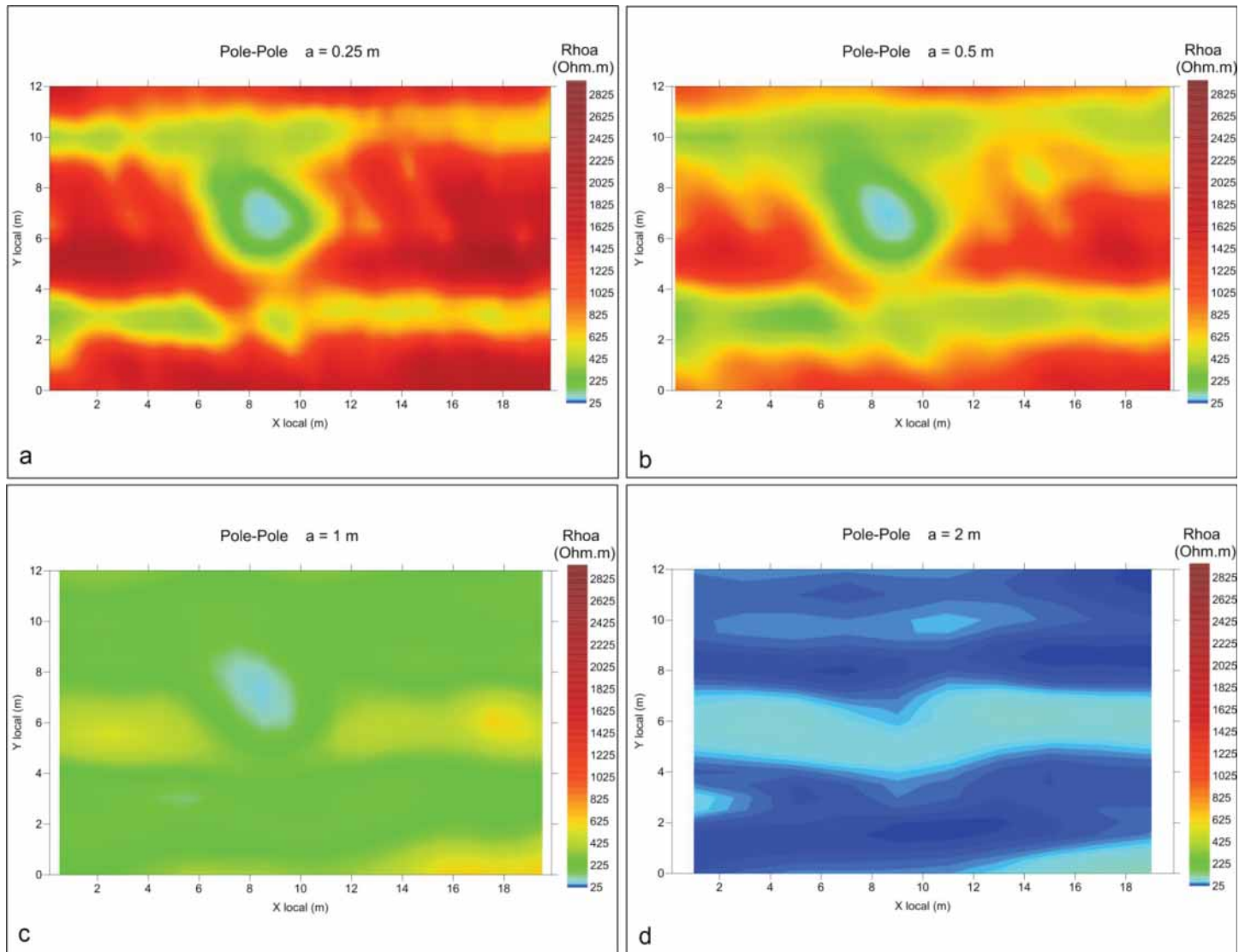


Figure 17 : Cartes de résistivité électrique avec un dispositif "pôle-pôle" pour différents écartements inter-électrode (a. a = 0.25 m, b. a = 0.5 m, c. a = 1 m, d. a = 2 m).

Nous avons utilisé les résultats obtenus réalisés dans les deux directions de profils en configuration pôle-pôle avec un écartement inter-électrode de 25 cm pour calculer l'indice d'anisotropie dans le plan horizontal (Figure 18). Les résultats de plusieurs travaux montrent que l'influence de la topographie sur les mesures de résistivité électrique dépend de l'alignement des électrodes par rapport à la structure. Il serait donc naturel, en présence d'un effet topographique, d'attendre des indices d'anisotropie élevés à l'emplacement de la structure topographique.

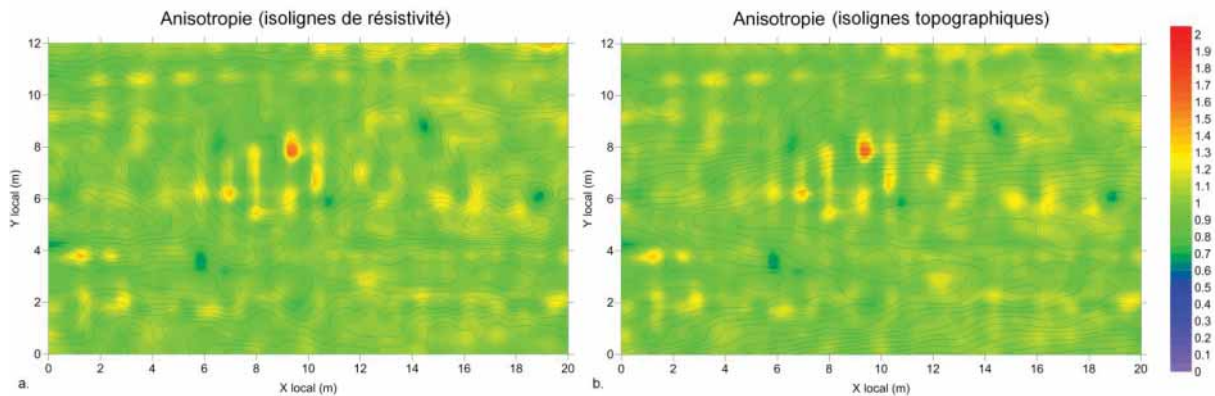


Figure 18 : Anisotropie dans le plan horizontal et isolignes de résistivités (a.) et topographiques (b.).

Les valeurs de l'indice d'anisotropie sont en moyenne très proches de 1, sauf pour quelques points localisés dans les zones caractérisées par des gradients élevés de la résistivité électrique, ce qu'on peut remarquer en superposant sur cette carte les isolignes de ρ_a (Figure 18.a). On n'observe pas la même cohérence avec les lignes de niveau topographiques (Figure 18.b).

On peut constater que la zone correspondant à la structure topographique est caractérisée par des indices proches de 1. Ce résultat confirme que l'effet topographique est très faible par rapport à l'influence de la couche superficielle résistante. Les valeurs élevées de l'indice sont probablement liées à l'incertitude de positionnement des électrodes.

Pendant la cartographie avec le dispositif « pôle-pôle », les mesures avec des écartements inter-électrode de 0.5 m (Figure 19) et 1 m (Figure 20) ont été effectuées à deux reprises en utilisant successivement la barre de 1 m (Figure 19.a et Figure 20.a) et celle de 2 m (Figure 19.b et Figure 20.b). Comme toutes les mesures ont été réalisées sur les mêmes points, il nous est possible d'effectuer une comparaison entre les deux cartes afin d'évaluer la reproductibilité des mesures et d'estimer les incertitudes qui pourraient être engendrées par une différence de positionnement des électrodes. Pour cela, les différences entre les valeurs de ρ_a observées sur les deux cartes ont été calculées et exprimées en pourcentage (Figure 19.c et Figure 20.c).

Une comparaison visuelle entre les deux cartes obtenues pour les mêmes écartement inter-électrode ne révèle pas de différences particulièrement marquées. La représentation des différences entre les valeurs correspondant à un même écartement et au même point de mesure montre des incertitudes ne dépassant pas $\pm 18\%$ pour un écartement $a = 0.5$ m, et inférieures à $\pm 15\%$ pour un écartement $a = 1$ m.

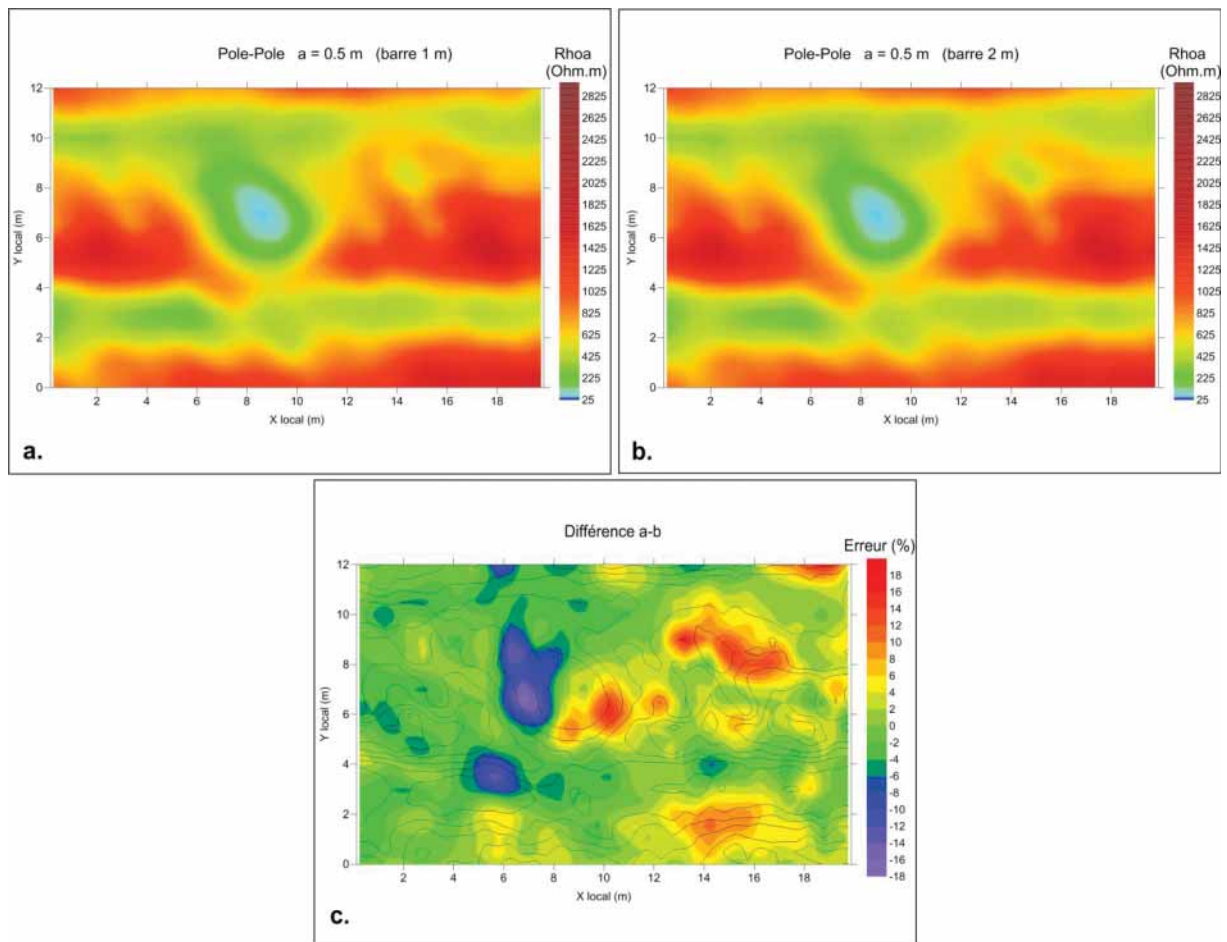


Figure 19 : Cartes de résistivité électrique apparente avec la configuration « pôle-pôle » pour un écartement inter-électrode de 0.5 m (a. carte réalisée avec la barre de 1 m, b. carte réalisée avec la barre de 2 m, c. isolignes de résistivité électrique apparente superposées avec les valeurs des incertitudes).

La superposition des isolignes de résistivité électrique avec la distribution des incertitudes montre que les valeurs d'incertitude élevées correspondent assez souvent aux zones de transition entre les différentes anomalies qui présentent de forts gradients de résistivité.

Une analyse minutieuse de ces incertitudes dans les zones limites entre les anomalies résistantes et conductrices révèle un léger décalage (15-20 cm vers la gauche) de la barre de 2 m par rapport à celle de 1 m lors des prospections. Si on attribue ces incertitudes (jusqu'à $\pm 20\%$ dans notre cas) uniquement à des différences de positionnement des électrodes, cela peut se traduire par un décalage maximum de 30-40 cm des limites entre les anomalies présentes sur la carte obtenue en utilisant la barre de 2 m. Une telle erreur est donc acceptable pendant les travaux de cartographie des sols couvrant des superficies de plusieurs hectares.

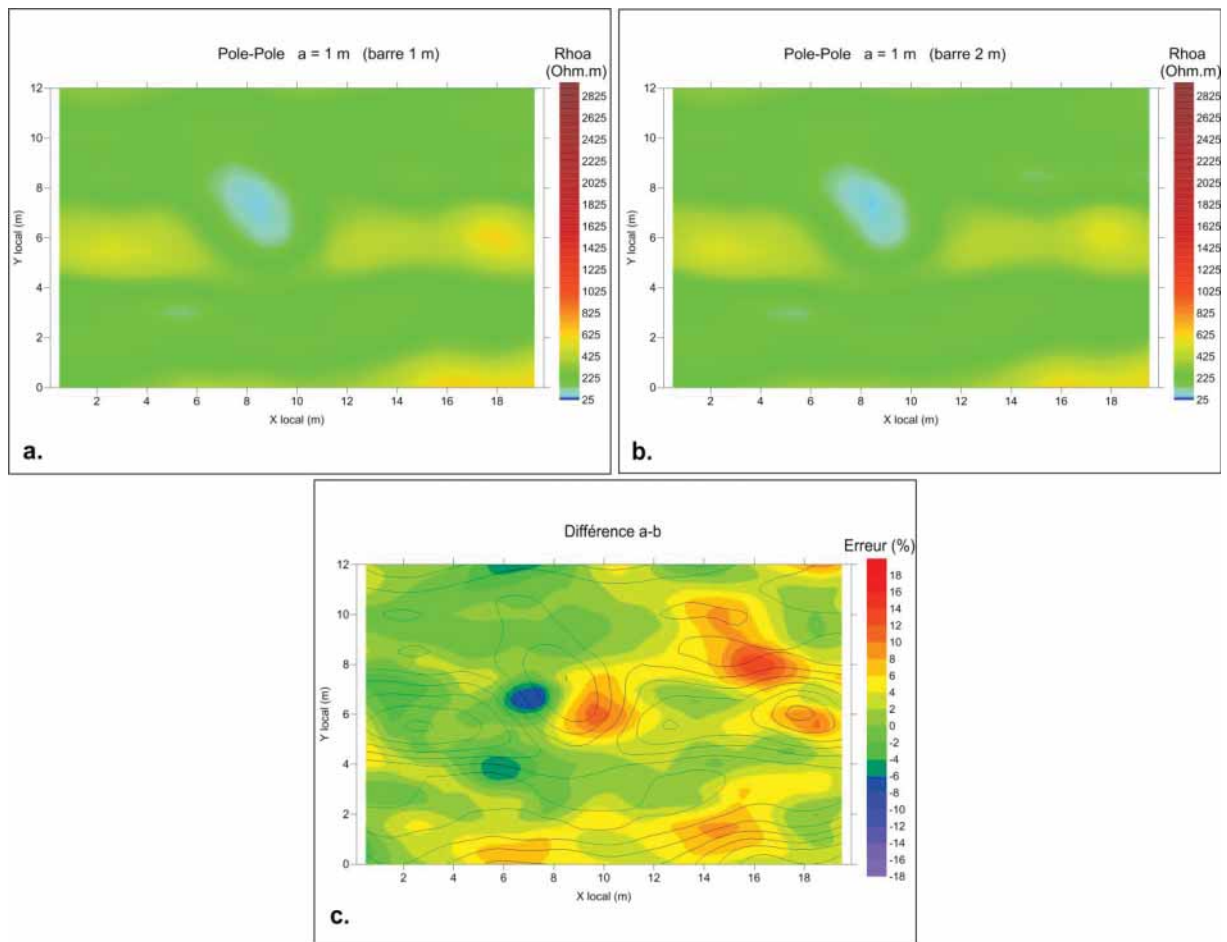


Figure 20 : Cartes de résistivité électrique apparente avec la configuration « pôle-pôle » pour un écartement inter-électrode de 1 m (a. carte réalisée avec la barre de 1 m, b. carte réalisée avec la barre de 2 m, c. isolignes de résistivité électrique apparente superposées avec les valeurs des incertitudes).

3.3 Etat de l'art : modélisation de l'effet topographique

La théorie de la réalisation des prospections électriques se base sur l'hypothèse d'un milieu tabulaire ou homogène à surface plane. Dans les conditions réelles, les structures topographiques peuvent avoir une influence sur les mesures de résistivités électriques apparentes.

Les calculs numériques des anomalies engendrées par des corps de différentes géométries ont commencé à la fin des années 60 en utilisant d'abord les équations intégrales [Dieter *et al.*, 1969], puis des méthodes d'éléments finis [Coggon, 1971] et de différences finies [Mufti, 1976] à deux dimensions. Des calculs 3D par différences finies ont également été réalisés [Dey and Morrison, 1979] mais cette approche, nécessitant une grille orthogonale, n'est pas adaptée à la modélisation de structures complexes. Les premiers travaux scientifiques avaient pour but de trouver des solutions analytiques permettant de tenir compte de l'influence de la topographie sur les mesures de ρ_a .

Dans l'un des premiers articles, les auteurs ont représenté la topographie sous forme d'un dièdre dans un milieu homogène ou à couches séparées par des plans inclinés par rapport à la surface du sol [Cecchini and Rocroi, 1980]. Ils présentent les résultats de calculs, réalisés pour des sondages électriques avec un dispositif Schlumberger, sous différents azimuts par rapport à l'axe des structures topographiques dans un milieu homogène (100 Ohm.m). Les auteurs montrent qu'une structure topographique (partie horizontale suivie d'une partie inclinée de 20° vers le bas ou vers le haut) peut

modifier considérablement les diagrammes de sondage. Une interprétation hâtive de ces courbes peut suggérer la présence de 2 ou 3 couches selon l'inclinaison de la pente et l'orientation du dispositif.

Pour un milieu à deux couches (50 et 200 Ohm.m) formant un biseau au pied d'une colline, les courbes de sondages peuvent être interprétées comme la réponse d'un milieu à 3 ou 4 couches dépendant de la direction du dispositif.

Plusieurs trainés Schlumberger ont également été modélisés pour des profils perpendiculaires à l'axe de la structure topographique (colline et vallée). Pour un milieu homogène, les valeurs de résistivité observées sur ces profils diminuent de 20 à 40 % pour un positionnement du dispositif au sommet de la colline et augmentent de 20 à 50 % pour les positions du dispositif correspondant au creux de la vallée.

Dans un autre article, les auteurs présentent les résultats d'une étude des anomalies générées par des structures topographiques lors de la tomographie de résistivité électrique avec un dispositif Dipôle-Dipôle [Fox *et al.*, 1980]. Ils ont pour cela utilisé un code d'éléments finis 2D pour modéliser 3 structures topographiques simples (colline, vallée et pente). Dans des calculs par la méthode des éléments finis, le milieu est représenté par un maillage d'éléments triangulaires. Dans chaque élément, le potentiel inconnu peut être exprimé par une fonction linéaire simple. Cette fonction est définie par les potentiels inconnus aux 3 coins de l'élément, par les coordonnées de ces coins et par les propriétés électriques de l'élément. La surface topographique est définie en attribuant une valeur de résistivité très élevée (10^5 Ohm.m) à la portion du modèle correspondant à l'air. Les électrodes sont placées à l'interface air-sol avec un écartement équidistant que l'on définit soit horizontalement soit le long de la pente. Cette approche a été validée par une comparaison concluante des résultats numériques avec les valeurs mesurées sur un modèle physique présenté dans [Hallos, 1970].

Fox *et al.* ont réalisé leurs calculs sur un modèle homogène en variant les différents paramètres (longueur et angle de pente, différentes positions d'électrodes) des structures topographiques étudiées. Ils ont montré que lors de l'utilisation d'un dispositif dipôle-dipôle, une vallée engendre une anomalie conductrice au centre, et deux faibles anomalies résistantes sur les bords. Dans les mêmes conditions, une colline génère un effet inverse - anomalie résistante centrée au sommet et anomalies faiblement conductrices sur les bords. Dans les deux cas, l'effet topographique croît au départ ($n = 3 \div 4$) puis diminue ($n > 5$) avec l'augmentation de l'écartement entre les deux dipôles. Pour une structure représentant deux surfaces horizontales d'altitudes différentes reliées par une pente, on obtient une anomalie conductrice lorsque le dipôle d'injection se trouve sur la pente et le dipôle de mesure sur la partie basse horizontale. Ils ont observé une anomalie résistante lorsque le dipôle de mesure se trouve sur la partie haute horizontale. Ils ont également montré que les anomalies de résistivité électrique générées par effet topographique sont considérables pour des pentes de plus de 10° dont les longueurs dépassent plusieurs fois l'écartement du dipôle.

Pour compléter les travaux de Fox *et al.*, une étude de l'effet topographique en 2D a été effectuée sur plusieurs structures topographiques (paroi verticale, colline, vallée et pente) avec différents dispositifs de mesure (pôle-pôle, dipôle-dipôle, Wenner- α , pôle-dipôle) [Tsourlos *et al.*, 1999]. Les dispositifs pôle-pôle et dipôle-dipôle produisent des anomalies semblables pour une colline (résistant au sommet, conducteur aux bords avec un contraste plus accentué pour le dipôle-dipôle). Une vallée produit un effet inverse à celui observé pour une colline. Pendant l'utilisation d'un dispositif Wenner-

α , les mêmes structures topographiques génèrent des anomalies de formes opposées et moins contrastées qu'avec le dipôle-dipôle.

Dans les articles scientifiques récents, on peut trouver plus de résultats concernant le développement de techniques de calculs numériques tridimensionnels performantes. L'utilisation d'un maillage tétraédrique non-structuré permet de raffiner le maillage à proximité des électrodes, ce qui permet de réduire les erreurs de calcul au maximum. En effet, il est nécessaire d'utiliser un maillage aussi fin que possible dans la zone autour des électrodes où les gradients de potentiel sont les plus élevés [Rücker *et al.*, 2006]. Ce type de maillage présente également l'avantage de pouvoir modéliser tout type de structures topographiques et géologiques, contrairement aux maillages hexaédriques utilisés par de nombreux auteurs [Holcombe and Jiraseck, 1984; Sasaki, 1994; Yi *et al.*, 2001].

Cette nouvelle approche 3D par éléments finis utilisant un maillage tétraédrique non-structuré a également permis de développer de nouveaux codes d'inversion 3D [Günther *et al.*, 2006] qui intègrent la topographie dans les modèles.

L'analyse de ces travaux concernant la modélisation et l'évaluation de l'effet topographique révèle les avantages de la méthode de modélisation décrite par Rücker *et al.* (2006). Cette méthode nous apparaît la plus appropriée pour la simulation de l'effet topographique. L'étude bibliographique nous a permis d'avoir une estimation quantitative de l'effet topographique sur les mesures de la résistivité électrique apparente. Cependant, il est difficile d'appliquer à nos résultats les approches et méthodes proposées pour la correction de cet effet en raison d'une distribution très complexe des résistivités électriques et des irrégularités topographiques. Il est donc important d'effectuer des calculs numériques dans le but d'élaborer une approche spécifique permettant de corriger les résultats obtenus sur le site de Ban Non Tun.

3.4 Modélisation de l'effet topographique

Les calculs numériques ont été réalisés avec le logiciel *COMSOL Multiphysics*, dont l'une des particularités est la possibilité d'injecter du courant électrique à partir d'une source ponctuelle. Cela simplifie ainsi considérablement les modèles permettant de calculer les valeurs de résistivités en configuration « pôle-pôle ». Il n'est ainsi pas nécessaire d'installer d'électrode à l'infini pour l'injection. De la même façon, le potentiel à l'infini est considéré nul, le potentiel calculé pour les électrodes de mesures correspond donc au ΔV . *COMSOL* utilise la méthode des éléments finis (1D à 3D) avec un maillage tétraédrique non-structuré qui permet de modéliser des structures topographiques relativement complexes [Rücker *et al.*, 2006].

Les calculs ont été effectués sur plusieurs modèles présentant une structure topographique en forme de colline avec des paramètres différents afin d'estimer les amplitudes de l'effet topographique en fonction des paramètres de la structure (largeur, hauteur, pente). Les paramètres ont été sélectionnés dans une gamme de valeurs proches de celles observées sur le site expérimental de Ban Non Tun. Nous avons également modifié les propriétés électriques du milieu (nombre de couches et valeurs de résistivité électrique chaque couche) afin de se rapprocher des valeurs de résistivités apparentes observées sur le terrain.

Le modèle de base utilisé pour les calculs est un parallélépipède de dimensions 100 x 100 x 50 m traversé par une structure topographique symétrique dans la direction x. Pour la modélisation, nous

avons utilisé des modèles 3D présentant une structure topographique étendue le long de l'axe x (considérée infinie), suffisamment longue pour permettre d'étudier le cas 2D avec des profils réalisés au centre de la structure perpendiculairement à son axe. L'axe de cette structure se situe au centre de la direction y du modèle. Les modèles utilisés sont composés de 1, 2 ou 3 couches auxquelles ont été attribuées différentes valeurs de résistivité électrique.

La continuité du courant électrique ($\mathbf{n} \cdot [\mathbf{J}_1 - \mathbf{J}_2] = 0$) est assurée pour les conditions limites entre ces différentes couches, alors que l'interface air-sol est caractérisée par une condition d'isolation électrique $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0$. Les bordures extérieures profondes du modèle sont de type « Terre » avec un potentiel nul $V = 0$. Les électrodes sont positionnées en surface au centre du modèle pour pouvoir considérer ces bordures à l'infini (en général choisi plus de 20 fois l'écartement inter-électrode maximum, soit une distance supérieure à 40 m).

La zone proche des électrodes est caractérisée par de forts gradients de potentiel. Nous avons donc utilisé un maillage suffisamment fin autour de celles-ci pour définir précisément les valeurs de potentiel. Un sous-domaine aux dimensions réduites a été créé autour des électrodes pour raffiner le maillage uniquement dans cette zone. Il est ainsi possible de générer des mailles d'une taille inférieure à 1/5 de la distance inter-électrode. Pour optimiser les temps de calcul, un maillage plus grossier est utilisé dans le reste du modèle, où les gradients de potentiels restent faibles.

L'utilisation d'une interface avec le logiciel *Matlab* permet de calculer et stocker les valeurs des potentiels correspondant aux positions des électrodes de mesures pour chaque position de l'électrode d'injection. La résistivité électrique apparente est ensuite définie en utilisant les valeurs calculées de potentiel V , l'intensité du courant injecté ($I = 100 \text{ mA}$) et les coefficients géométriques des dispositifs ($K = 2\pi a$).

Les calculs sont effectués pour 25 positions d'un dispositif à 5 électrodes, espacées de 0.5 m et disposées parallèle (orientation 00°), puis perpendiculaire (orientation 90°) à l'axe de la structure topographique. Le dispositif est déplacé le long d'un profil perpendiculaire à la structure avec un pas de 0.5 m entre deux positions. Ceci permet de simuler les mesures de résistivité électrique apparente correspondant au profil central réalisé sur le terrain par le résistivimètre RM15 en configuration d'électrodes « pôle-pôle » pour des écartements inter-électrode : $a = 0.5 \text{ m}$, $a = 1 \text{ m}$ et $a = 2 \text{ m}$. Lors de la réalisation des calculs numériques, la configuration « pôle-pôle » a été privilégiée car la cartographie de résistivité électrique sur le site de Ban Non Tun a été réalisée par cette configuration.

Les résultats obtenus sur le terrain avec un profil RM15 perpendiculaire à l'axe de la structure topographique montrent des anomalies résistantes importantes correspondant au rang d'arbre pour les écartements inter-électrode $a = 0.5 \text{ m}$ et $a = 1 \text{ m}$ (Figure 21). Les résistivités électriques apparentes mesurées au-dessus des rangs d'arbres sont de l'ordre de 1400 Ohm.m pour $a = 0.5 \text{ m}$ et 500 Ohm.m pour $a = 1 \text{ m}$ (avec les deux orientations de dispositifs). Pour $a = 2 \text{ m}$, on ne distingue plus les rangs et inter-rangs ($\rho_a \approx 40 \text{ Ohm.m}$). Dans les zones inter-rangs, on observe des résistivités électriques apparentes $\rho_a \approx 400 \text{ Ohm.m}$ avec $a = 0.5 \text{ m}$ et $\rho_a \approx 200 \text{ Ohm.m}$ avec $a = 1 \text{ m}$. Les valeurs élevées de résistivité aux extrémités des courbes obtenues avec $a = 0.5 \text{ m}$ sont dues aux deux rangs d'arbres adjacents à la zone d'étude. En prenant comme référence la résistivité électrique apparente mesurée sur les inter-rangs, les amplitudes d'anomalie résistante sont de 250 % pour $a = 0.5 \text{ m}$ et 150 % pour $a = 1 \text{ m}$.

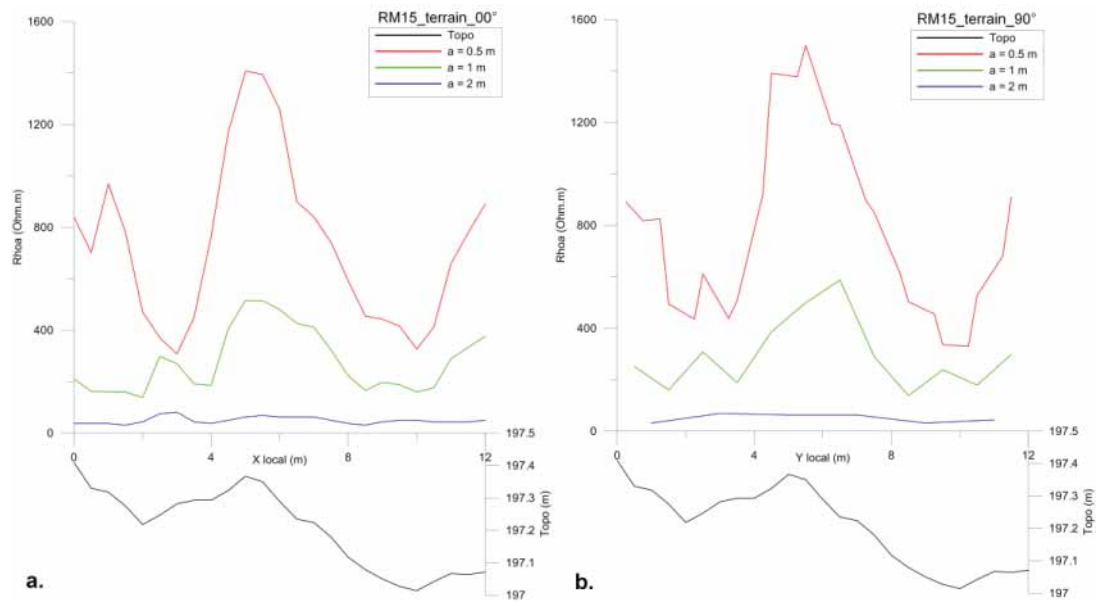


Figure 21 : Résistivités électriques apparentes mesurées sur le site de Ban Non Tun par RM15 sur un profil perpendiculaire à la structure topographique (a. orientation 00°, b. orientation 90°).

Les calculs ont d'abord été réalisés pour un milieu homogène de résistivité électrique $\rho_1 = 1000$ Ohm.m (Figure 22) pour différentes dimensions de la structure topographique, proches de celles observées sur le terrain (hauteur : $h = 0.15$ m, 0.25 m, 0.35 m et 0.5 m ; largeur : $L = 3$ m, 4 m et 6 m).

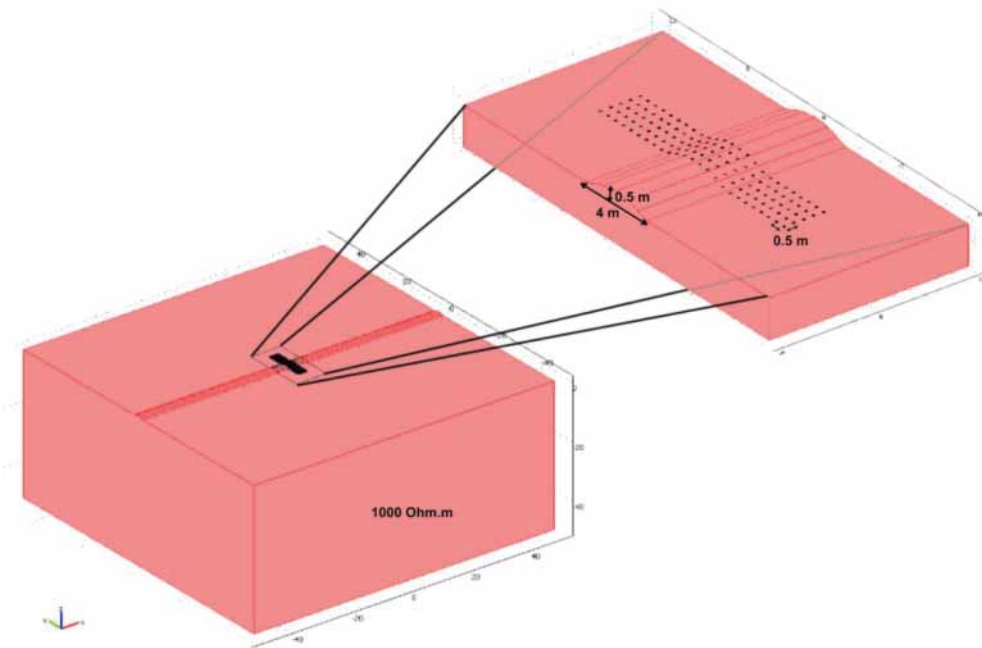


Figure 22 : Modèle homogène de résistivité électrique 1000 Ohm.m utilisé pour les simulations d'effet topographique. La structure topographique a une largeur de 4 m et une hauteur de 0.5 m.

Les résultats obtenus pour les deux orientations du dispositif des électrodes sur un modèle présentant une structure topographique de dimensions $h = 0.5$ m et $L = 4$ m montrent une anomalie résistante assez nette, dont la valeur maximum correspond au sommet de la structure topographique (Figure 23). Des anomalies symétriques présentant un minimum de résistivité électrique apparente sont présentes de parts et d'autres de la structure topographique (appelées par

la suite « anomalies latérales »). Les valeurs de résistivité électrique apparente calculées pour la partie plane du modèle correspondent à la résistivité électrique du modèle (1000 Ohm.m) avec une erreur inférieure à 5 % pour les trois écartements inter-électrode (990 Ohm.m pour $a = 0.5$ m, 980 Ohm.m pour $a = 1$ m et 960 Ohm.m pour $a = 2$ m).

Les amplitudes des anomalies calculées avec l'orientation 00° (Figure 23.a.) sont très proches pour les résistivités électriques apparentes calculées avec les trois écartements inter-électrode (environ 10 % par rapport à la résistivité calculée sur la partie plane pour l'anomalie résistante centrale et 5 % pour les deux anomalies latérales). Les amplitudes des anomalies résistives sont plus élevées avec l'orientation 90° du dispositif (Figure 23.b.). Elles augmentent avec l'écartement inter-électrode (12 % pour $a = 0.5$ m, 18 % pour $a = 1$ m et 22 % pour $a = 2$ m). Inversement, l'amplitude des anomalies latérales diminue légèrement avec l'écartement inter-électrode (14 % pour $a = 0.5$ m, 13 % pour $a = 1$ m et 11 % pour $a = 2$ m).

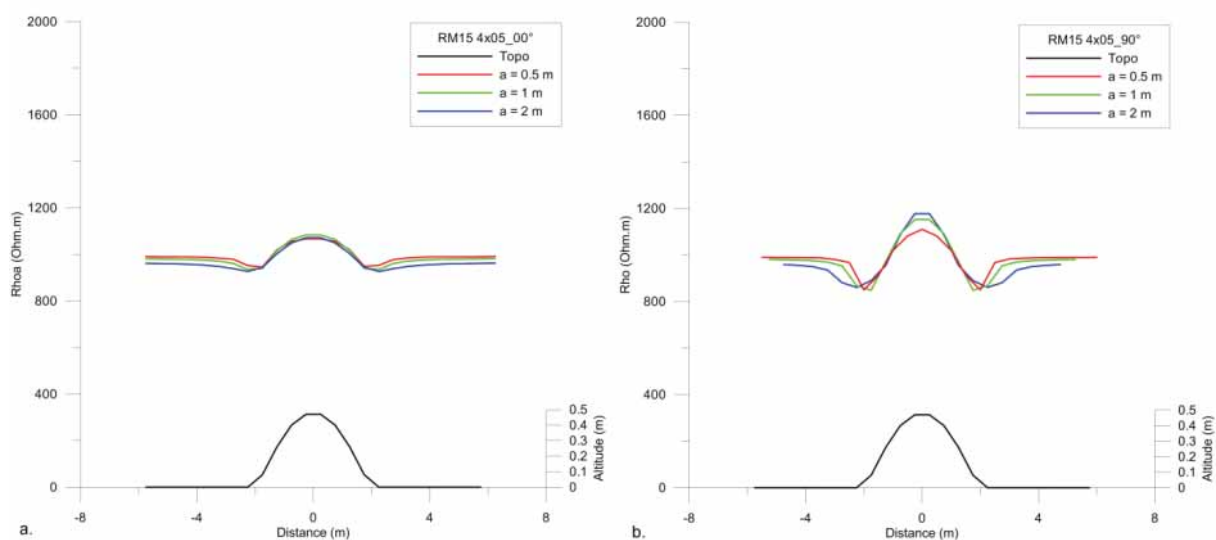


Figure 23 : Valeurs de résistivité électrique apparente calculées pour un modèle homogène ($\rho = 1000$ Ohm.m, $L = 4$ m et $h = 0.5$ m) avec 3 écartements d'électrodes (a. orientation 00° , b. orientation 90°).

Pour un milieu homogène, les calculs ont été réalisés avec 8 différentes dimensions de la structure topographique. En variant la hauteur et la largeur de la structure topographique, nous avons étudié les relations entre les amplitudes des anomalies de résistivité électrique apparente et la pente de la structure. L'anomalie résistante centrale et les deux anomalies latérales sont présentes sur tous les modèles. Leurs amplitudes augmentent avec la pente de la structure topographique (Figure 24).

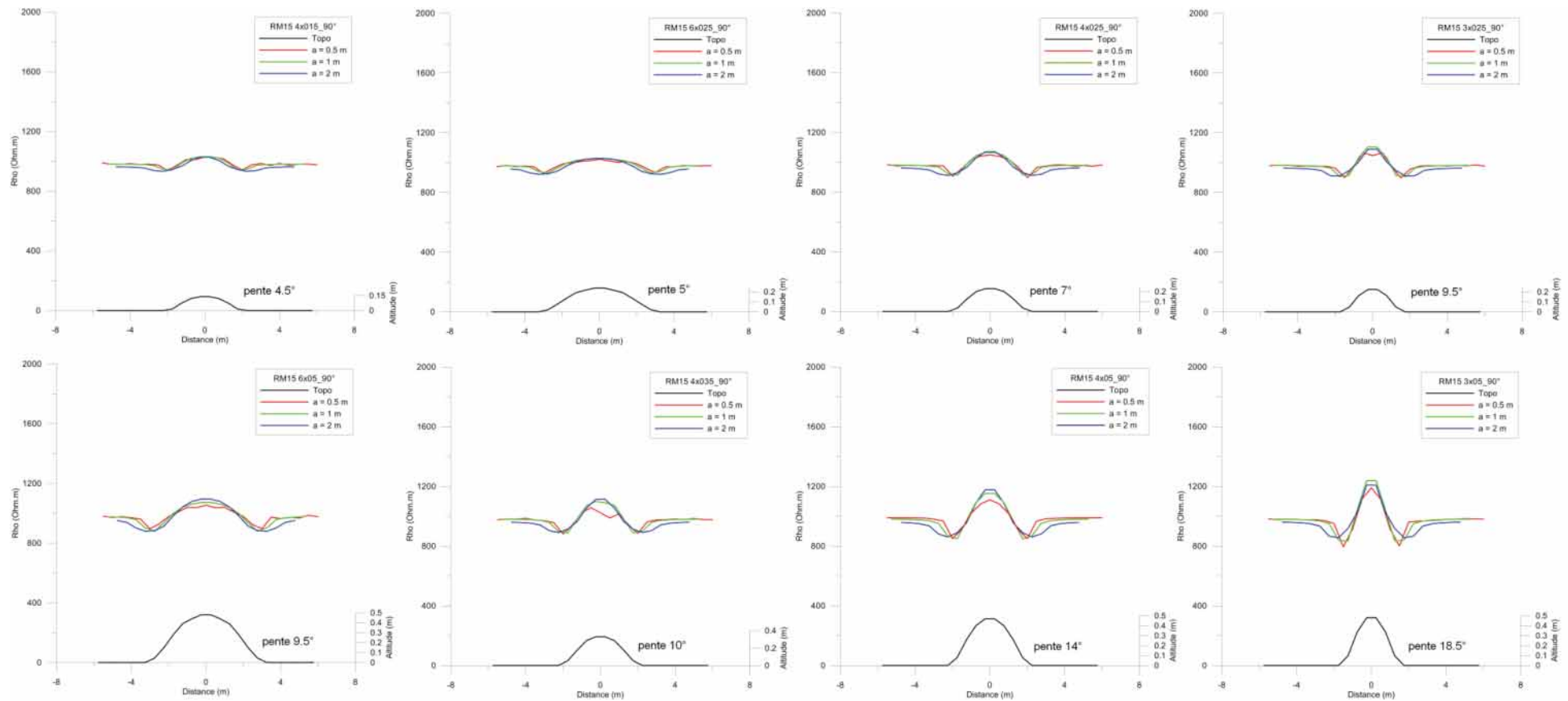


Figure 24 : Résistivités électriques apparentes calculées avec l'orientation 90° pour différentes pentes de structure topographique en milieu homogène.

Les valeurs d'amplitude maximales (anomalie résistante centrale Figure 25.a.) et minimales (anomalies latérales, Figure 25.b.), calculées pour différents paramètres de la structure topographique, ont été comparées avec la pente de la structure (exprimée en degrés). Pour tous les écartements inter-électrodes, et avec les deux orientations de dispositif, l'amplitude des anomalies croît linéairement en fonction de la pente de la structure.

Pour l'orientation 00° (rond et trait pointillé), l'amplitude des anomalies varie de façon similaire avec la pente pour les trois écartements inter-électrode. Lorsque l'angle de la pente croît de 10°, l'amplitude de l'anomalie résistante centrale augmente d'environ 7 % (Figure 25.a.), alors que l'amplitude des deux anomalies latérales augmente d'environ 3 % (Figure 25.b.).

Pour l'orientation 90° (croix et trait plein), l'amplitude de l'anomalie résistante centrale (Figure 25.a.) augmente avec l'écartement inter-électrode. Pour une augmentation de 10° de la pente, l'amplitude augmente de 10 % pour $a = 0.5$ m, 13 % pour $a = 1$ m et 14.5 % pour $a = 2$ m. A l'inverse, l'amplitude des anomalies latérales (Figure 25.b.) diminue avec l'écartement inter-électrode. Pour une augmentation de 10°, l'amplitude augmente de 10 % pour $a = 0.5$ m, 9 % pour $a = 1$ m et 7 % pour $a = 2$ m.

Ces premiers résultats mettent en évidence un effet topographique sur les mesures de la résistivité électrique apparente pour un peu marqué (pente inférieure à 20°). Pour un milieu homogène, cet effet est proportionnel à l'angle de la pente, et est plus important lorsque les électrodes sont alignées dans la direction perpendiculaire à l'axe de la structure topographique.

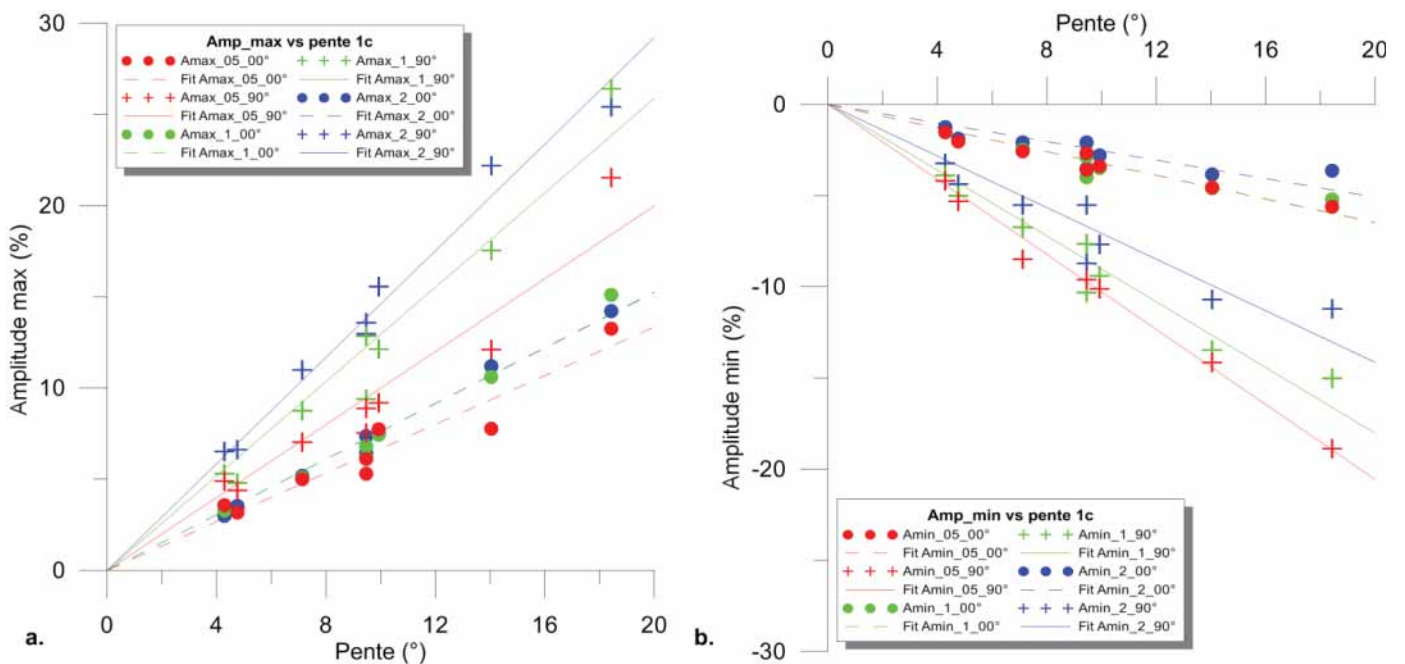


Figure 25 : Amplitude des anomalies calculées pour un modèle homogène en fonction de la pente de la structure topographique pour différents écartements inter-électrode et alignement d'électrodes (a. amplitude de l'anomalie résistante centrale, b. amplitude des anomalies conductrices latérales).

Les valeurs de résistivité électrique apparente calculées pour un milieu homogène avec différentes pentes de relief ont montré une influence non-négligeable de la topographie sur les valeurs de résistivité électrique apparente. Cette influence dépend à la fois de l'écartement inter-électrode et de l'orientation du dispositif. Cependant, les valeurs calculées ne sont pas cohérentes avec les résultats observés sur le terrain (Figure 21).

Les images d'ERT (voir §2.4, Figure 5) ont montré la présence d'une couche résistante (2000 à 3000 Ohm.m) d'environ 1 m d'épaisseur au-dessus d'un substratum conducteur (20 à 200 Ohm.m). Ces résultats ont servi de base pour construire un autre modèle à deux couches ($\rho_1 = 1000$ Ohm.m et $\rho_2 = 100$ Ohm.m) en utilisant les mêmes paramètres de la structure topographique (Figure 26).

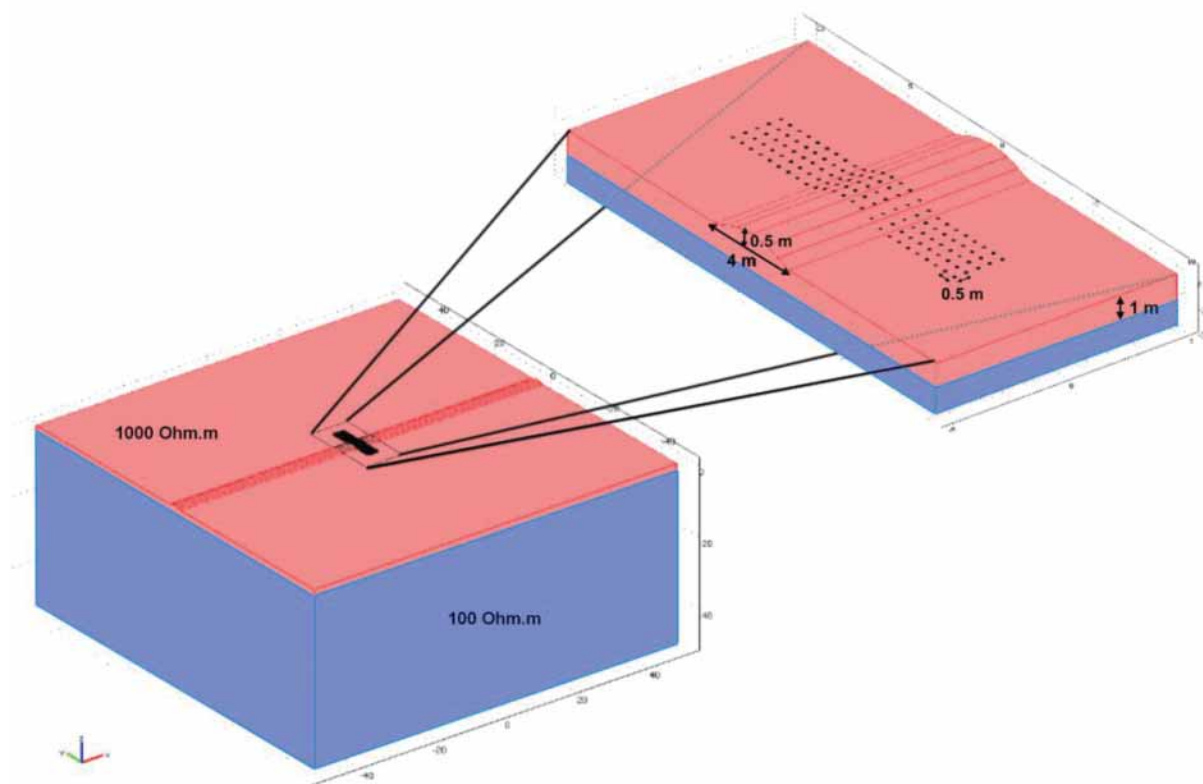


Figure 26 : Modèle à deux couches ($\rho_1 = 1000$ Ohm.m et $\rho_2 = 100$ Ohm.m) utilisé pour les simulations d'effet topographique. La structure topographique a une largeur de 4 m et une hauteur de 0.5 m.

En présence d'une couche conductrice à 1 m de profondeur, les valeurs de résistivité électrique calculées avec les différents écartements inter-électrode se différencient (Figure 27). L'influence de la couche conductrice profonde croît avec l'augmentation de l'écartement inter-électrode, diminuant ainsi les valeurs de résistivité électrique apparente calculées. L'anomalie résistante centrale et les deux anomalies latérales sont toujours visibles, et plus marquées sur les courbes calculées avec l'orientation 90°.

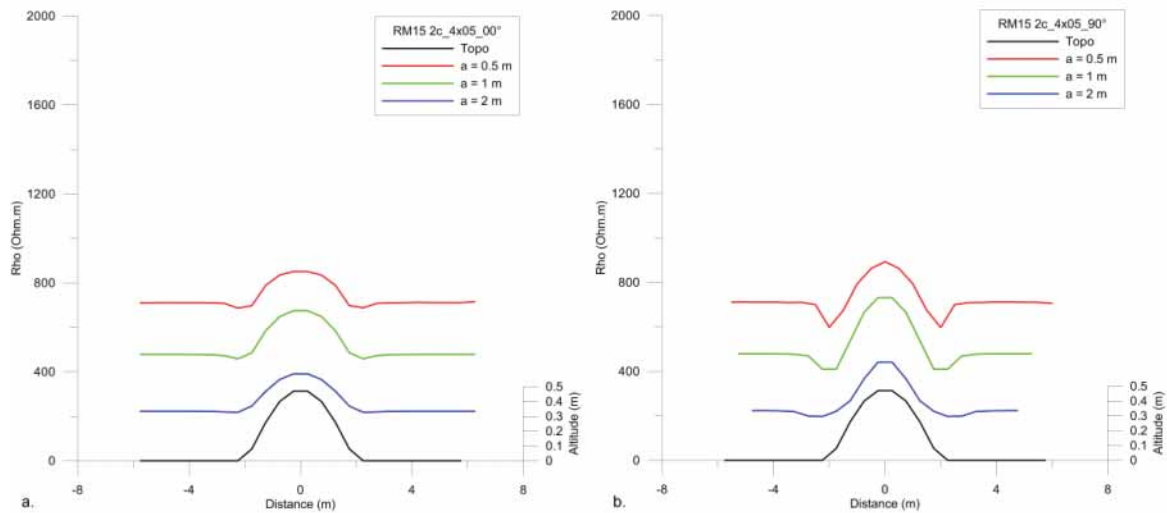


Figure 27 : Résistivités apparentes calculées pour un modèle à 2 couches ($\rho_1 = 1000 \text{ Ohm.m}$, $\rho_2 = 100 \text{ Ohm.m}$, $L = 4 \text{ m}$ et $h = 0.5 \text{ m}$) avec 3 écartements d'électrodes (a. orientation 00° , b. orientation 90°).

Les valeurs de résistivité électrique apparente calculées sur la partie plane avec les écartements inter-électrode $a = 0.5 \text{ m}$, $a = 1 \text{ m}$ et $a = 2 \text{ m}$ sont respectivement de 710 Ohm.m , 480 Ohm.m et 220 Ohm.m pour ce modèle, et sont identiques pour les deux orientations du dispositif.

L'amplitude de l'anomalie résistante centrale augmente avec l'écartement inter-électrode pour les deux orientations du dispositif de mesure. Pour l'orientation 00° , l'amplitude maximum (calculée par rapport à la résistivité de la partie plane avec le même écartement) est de 20% pour $a = 0.5 \text{ m}$, de 40% pour $a = 1 \text{ m}$ et de 75% pour $a = 2 \text{ m}$ (Figure 27.a.). Les amplitudes des anomalies résistantes calculées pour l'orientation 90° sont plus élevées que pour l'orientation 00° avec un même écartement inter-électrode et présentent des valeurs de 25% pour $a = 0.5 \text{ m}$, 55% pour $a = 1 \text{ m}$ et 100% pour $a = 2 \text{ m}$ (Figure 27.b.).

Les anomalies latérales présentent à peu près les mêmes amplitudes pour les trois écartements inter-électrode (environ 3% de moins par rapport aux valeurs correspondant à la partie plane) avec l'orientation 00° du dispositif (Figure 27.a.). Pour l'orientation 90° (Figure 27.b.), l'amplitude diminue faiblement quand l'écartement inter-électrode augmente (16% pour $a = 0.5 \text{ m}$, 14% pour $a = 1 \text{ m}$ et 12% pour $a = 2 \text{ m}$).

Les amplitudes des anomalies résistantes calculées à l'aplomb de la structure topographique (Figure 28.a.) augmentent linéairement avec la pente de la structure pour les écartements inter-électrode 0.5 m et 1 m . Quand la pente croît de 10° , l'amplitude de l'anomalie calculée avec l'orientation 00° du dispositif augmente de 15% pour $a = 0.5 \text{ m}$ et de 29% pour $a = 1 \text{ m}$. Pour une augmentation de pente identique, l'amplitude de l'anomalie calculée avec l'orientation 90° augmente de 20% pour $a = 0.5 \text{ m}$ et de 38% pour $a = 1 \text{ m}$. Pour l'écartement $a = 2 \text{ m}$, la tendance linéaire n'est plus évidente mais les amplitudes des anomalies augmentent avec les écartements inter-électrode plus élevés.

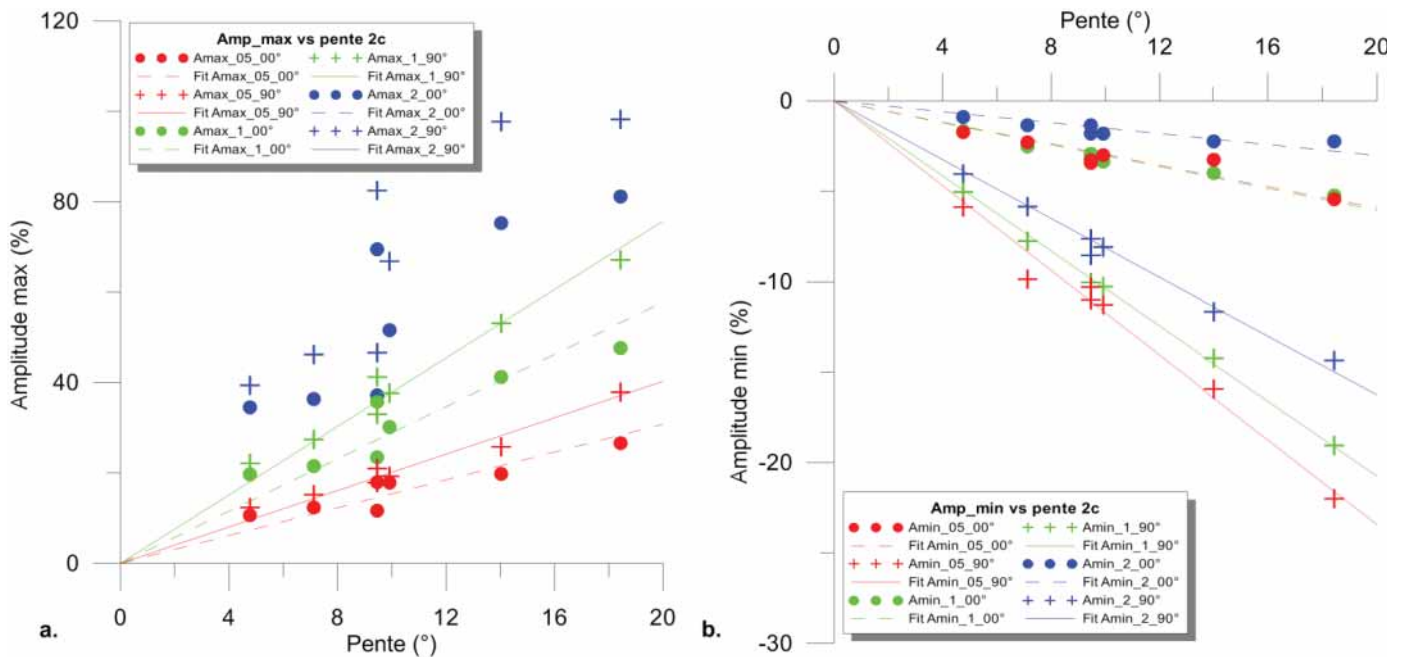


Figure 28 : Amplitude des anomalies calculées pour un modèle à deux couches en fonction de la pente de la structure topographique pour différents écartements inter-électrode et alignement d'électrodes (a. amplitude de l'anomalie résistante centrale, b. amplitude des anomalies latérales).

Pour les anomalies latérales (Figure 28.b.), l'amplitude augmente également de façon linéaire avec la pente, mais diminue avec l'écartement inter-électrode. Pour l'orientation 00°, les amplitudes calculées augmentent faiblement lorsque la pente croît de 10° (de 1.5 % pour $a = 2$ m et de 3 % pour $a = 1$ m et $a = 0.5$ m). Avec l'orientation 90°, les amplitudes croissent légèrement plus pour les mêmes pentes (jusqu'à 8 % pour $a = 2$ m, 10 % pour $a = 1$ m et 12 % pour $a = 0.5$ m).

Les amplitudes des deux types d'anomalies sont toujours plus élevées avec l'orientation 90° du dispositif pour les mêmes écartements.

Il n'est pas évident de relier les variations d'amplitude maximum calculées pour un milieu à 2 couches avec les variations de la pente de la structure topographique. On peut par contre observer une relation linéaire bien nette à largeur constante entre l'amplitude des anomalies résistantes et la hauteur de la structure topographique (Figure 29.a.). La relation à hauteur constante entre l'amplitude de l'anomalie et la largeur de la structure topographique n'est pas linéaire (Figure 29.b.). Pour les calculs effectués avec l'orientation 00°, l'amplitude est quasi-constante en fonction de la largeur.

Une analyse de ces résultats montre que l'amplitude de l'anomalie résistante est plus influencée par l'épaisseur de la couche résistante (plus élevée au niveau de la structure topographique) que par l'effet topographique. Pour les anomalies latérales, le comportement est le même que pour le cas d'un milieu homogène, où l'effet topographique est la seule source d'anomalie.

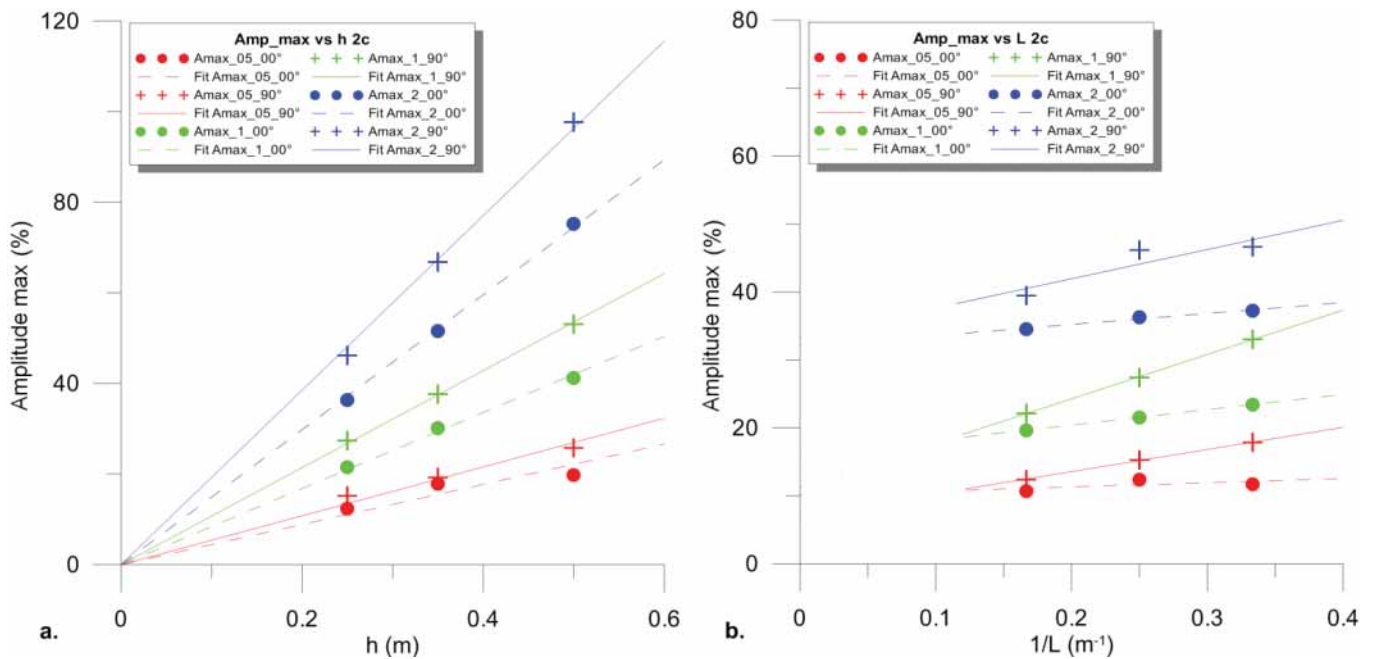


Figure 29 : Amplitudes maximum calculées pour différents écartements avec deux orientations de dispositifs pour un modèle à 2 couches (a. amplitude en fonction de la hauteur de la structure topographique, b. amplitude en fonction de la largeur de la structure).

La comparaison des résultats calculés avec les valeurs observées sur le terrain pour un écartement de 0.5 m (1400 Ohm.m, voir Figure 21) montre que les maxima de résistivité électrique calculés à l'aplomb de la structure topographique (environ 900 Ohm.m) sont toujours beaucoup plus faibles. Les résultats de la cartographie de résistivité électrique obtenus sur le terrain laissent penser que les rangs d'arbres sont constitués d'une couche superficielle résistante créée lors de la mise en place des structures topographiques. En se basant sur ces résultats, nous avons réalisés d'autres calculs pour un modèle à trois couches où la structure topographique a une résistivité électrique de 3000 Ohm.m (Figure 30).

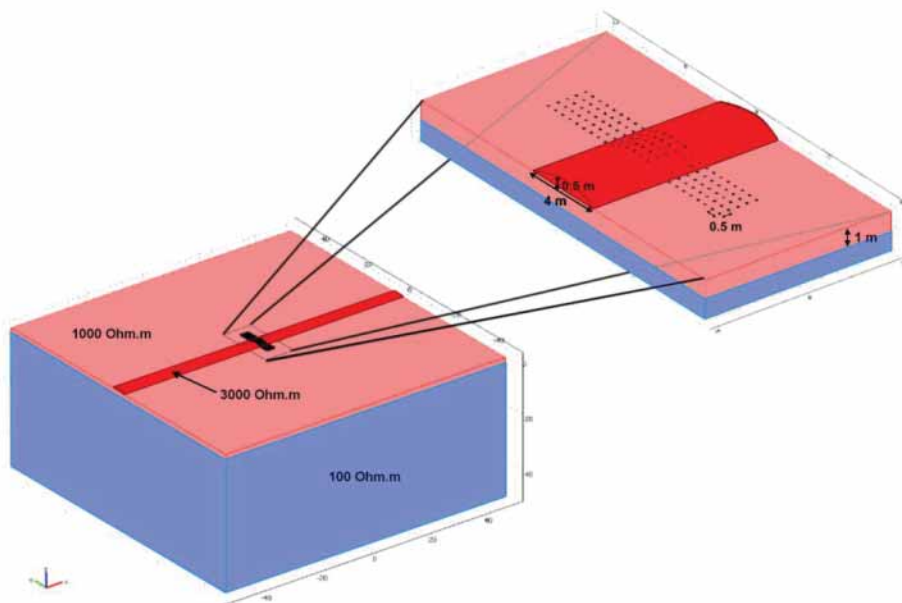


Figure 30 : Modèle à trois couches ($\rho_1 = 3000$ Ohm.m, $\rho_2 = 1000$ Ohm.m et $\rho_3 = 100$ Ohm.m) utilisé pour les simulations d'effet topographique. La structure topographique a une largeur de 4 m et une hauteur de 0.5 m.

Les résultats obtenus pour ce modèle à 3 couches avec une structure topographique de hauteur $h = 0.5$ m et de largeur $L = 4$ m montrent des anomalies résistantes très marquées à l'aplomb de la structure pour les 3 écartements inter-électrode et les deux orientations de dispositif (Figure 31). Les anomalies latérales, présentes sur les modèles à 1 et 2 couches, ne sont visibles que sur les courbes obtenues avec un dispositif orienté perpendiculairement à l'axe de la structure topographique (Figure 31.b.). Les résistivités électriques apparentes calculées sur la partie horizontale du modèle sont les mêmes que celles calculées avec un modèle à 2 couches, les modèles étant identiques sur cette partie.

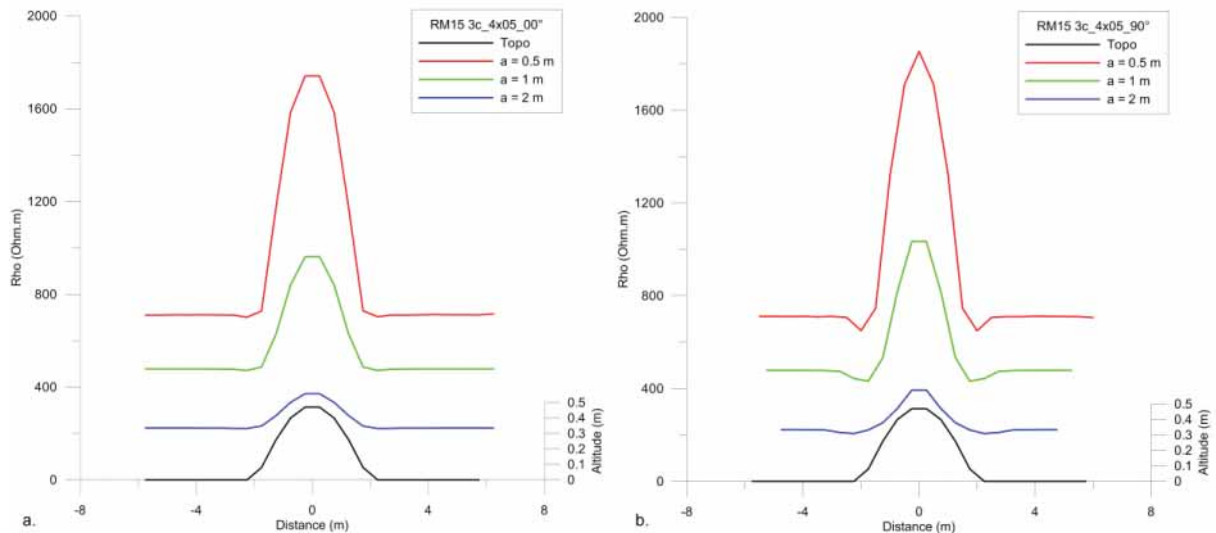


Figure 31 : Résistivités apparentes calculées pour un modèle à trois couches ($\rho_1 = 3000$ Ohm.m, $\rho_2 = 1000$ Ohm.m, $\rho_3 = 100$ Ohm.m, $L=4$ m et $h = 0.5$ m) avec 3 écartements d'électrodes (a. orientation 00° , b. orientation 90°).

Avec l'orientation 00° , l'amplitude de l'anomalie résistante diminue avec l'écartement inter-électrode (145 % pour $a = 0.5$ m, 100 % pour $a = 1$ m et 65 % pour $a = 2$ m), contrairement aux résultats obtenus avec les modèles à 1 et 2 couches. L'amplitude de l'anomalie résistante est plus élevée avec l'orientation 90° , mais diminue également avec l'écartement inter-électrode (160 % pour $a = 0.5$ m, 120 % pour $a = 1$ m et 75 % pour $a = 2$ m). Les anomalies latérales observées avec l'orientation 90° ont des amplitudes très proches pour les trois écartements inter-électrode (8-10 %).

La représentation des amplitudes maximales à l'aplomb de la structure topographique en fonction de la pente ne montre pas de relation linéaire. Il est malgré tout important de noter que l'amplitude de l'anomalie diminue systématiquement avec l'écartement inter-électrode. Les amplitudes calculées avec les deux orientations de dispositif sont très proches, avec des valeurs légèrement plus élevées pour l'orientation 90° .

Les anomalies latérales sont absentes pour tous les modèles à trois couches avec l'orientation 00° du dispositif. Avec l'orientation 90° , l'amplitude des anomalies augmente linéairement avec l'angle de la pente comme observé avec les modèles à une et deux couches. Les amplitudes calculées avec les écartements $a = 0.5$ m et $a = 1$ m sont très proches (augmentation de 6.5 % lorsque la pente augmente de 10°) et sont plus élevées que l'amplitude calculée pour un écartement inter-électrode de 2 m (augmentation de 4.5 % quand la pente croît de 10°).

L'évolution de l'amplitude des anomalies résistantes en fonction de la hauteur de la structure topographique (et donc de l'épaisseur de la couche de résistivité $\rho_1 = 3000 \text{ Ohm.m}$) est linéaire, même si cette tendance semble moins évidente pour l'écartement $a = 1 \text{ m}$ (Figure 32.a.). Les amplitudes calculées pour les deux orientations de dispositifs sont très proches, avec globalement des valeurs plus élevées pour l'orientation 90° . Pour une augmentation de 10° de la pente, l'amplitude de l'anomalie croît de 28 à 30 % pour $a = 0.5 \text{ m}$, de 18 à 20 % pour $a = 1 \text{ m}$ et de 11.5 à 13.5 % pour $a = 2 \text{ m}$.

Les valeurs d'amplitude maximale calculées restent constantes en fonction de la largeur de la structure topographique. L'amplitude des anomalies n'est donc plus liée à la topographie, mais uniquement à l'épaisseur des couches résistantes.

La présence d'une couche superficielle, déjà mise en évidence par la cartographie de résistivité électrique, est confirmée par ces résultats. En effet, les formes des courbes obtenues par le calcul sont proches de celles observées sur le terrain, et les valeurs maximales d'anomalie résistante sont proches de 1400 Ohm.m avec l'écartement $a = 0.5 \text{ m}$. Les paramètres du modèle correspondent donc bien aux caractéristiques du site expérimental. Il reste cependant à ajuster les grandeurs de ces paramètres (résistivité électrique, épaisseur des couches, hauteur et largeur de la structure topographique) pour se rapprocher des valeurs réelles.

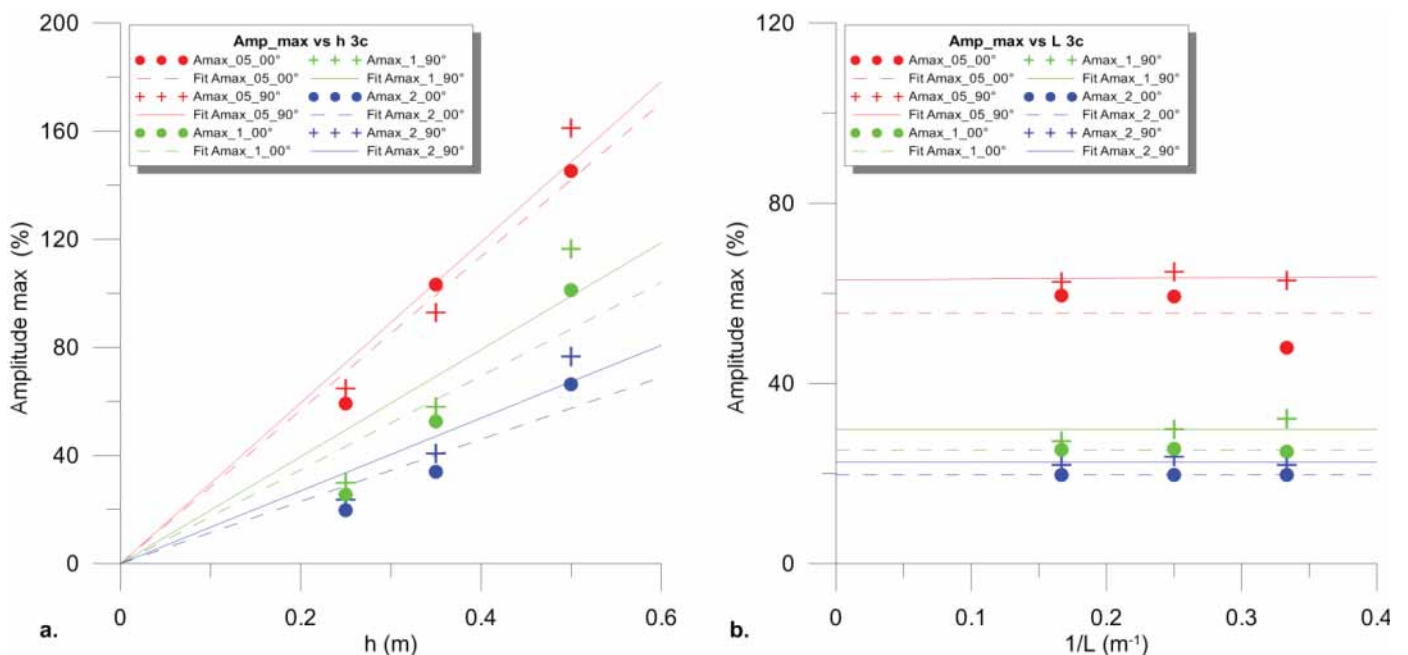


Figure 32 : Amplitudes maximum calculées pour différents écartements avec deux orientations de dispositifs pour un modèle à 3 couches (a. amplitude en fonction de la hauteur de la structure topographique, b. amplitude en fonction de la largeur de la structure).

Les résultats de modélisation montrent qu'un effet topographique seul ne permet pas d'expliquer les résistivités électriques apparentes observées sur le terrain lors de la cartographie de résistivité électrique. L'ensemble des résultats nous permettent de justifier notre interprétation concernant la présence d'une couche résistante superficielle au niveau des structures topographiques constituant les rangs d'arbres.

4 Conclusion et perspectives

Les résultats obtenus pendant mon stage permettent de faire les conclusions suivantes :

- Les résultats de cartographie géophysique montrent que les anomalies des différents paramètres géophysiques reflètent la variabilité spatiale des sols ;
- la comparaison des cartes de résistivité électrique et topographique a révélé une cohérence importante entre les structures topographiques correspondant aux rangs des arbres et les anomalies résistantes étendues ;
- les résultats de modélisation numérique montrent que les valeurs de la résistivité électrique peuvent être influencées par une structure topographique, mais avec des amplitudes inférieures à celles observées sur le site de Ban Non Tun ;
- une cartographie détaillée de la résistivité électrique réalisée avec plusieurs configurations d'électrode nous a permis de montrer l'existence d'une couche résistante très superficielle sur les rangs des arbres, certainement d'origine anthropique.

L'analyse des résultats obtenus dans le cadre du projet NRCT « Use of Electrical Resistivity and Self Potential Mapping for Sustainable Agriculture : Application to Rubber Tree Plantations in North-East Thailand » et de ceux de mon stage montre l'efficacité des paramètres géophysiques pour caractériser la variabilité des sols et leur évolution.

Ainsi, l'utilisation des méthodes de géophysique appliquée est recommandée dans les différentes phases des études des sols, depuis la caractérisation du site pour fixer les limites de l'expérimentation, jusqu'au suivi de l'évolution spatio-temporelle des sols au cours de l'étude.

5 Bibliographie

- Cecchini, A., and J. P. Rocroi (1980), Effet topographique en prospection électrique, *Geophysical Prospecting*, 28(6), 977-993.
- Coggon, J. H. (1971), Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method, *Geophysics*, 36(1), 132-155.
- Dey, A., and H. F. Morrison (1979), Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures, *Geophysics*, 44(4), 753.
- Dieter, K., Paterson, N.R., and Grant, F.S. (1969), IP and resistivity type curves for three-dimensional structures, *Geophysics*, 34, 615-632.
- Fox, R. C., G. W. Hohman, T. J. Killpack, and L. Rijo (1980), Topographic effects in resistivity and induced-polarization surveys, *Geophysics*, 45(1), 75.
- Gonçalves, P. de S., A. K. Fujihara, A. A. Ortolani, O. C. Bataglia, N. Bortoletto, and I. Segnini Junior (1999), Phenotypic stability and genetic gains in six-year girth growth of Hevea clones, *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 34, 1223 - 1232.
- Günther, T., C. Rücker, and K. Spitzer (2006), Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography – II. Inversion, *Geophysical Journal International*, 166(2), 506-517.
- Hallof, P. G. (1970), Theoretical induced polarization and resistivity studies, scale model cases, phase III, *McPhar Geophysics Ltd.*
- Holcombe, H. T., and G. R. Jiraseck (1984), Three-dimensional terrain corrections in resistivity surveys, *Geophysics*, 49(4), 439.
- Hovhannissian, G. M., J.-P. Pozzi, P. Bernard, and A. Tabbagh (2002), Transient electric phenomena observed during fluid circulation in unsaturated porous media, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 4 PP.
- Moeys, J., B. Nicoullaud, A. Dorigny, Y. Coquet, and I. Cousin (2006), Cartographie des sols à grande échelle : integration explicite d'une mesure de résistivité apparente spatialisée à l'expertise pédologique, *Etude et gestion des sols*, 13(4), 269-286.
- Mufti, I. R. (1976), Finite-difference resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures., *Geophysics*, 41(1), 62.
- Pinettes, P., P. Bernard, F. Cornet, G. Hovhannissian, L. Jouniaux, J.-P. Pozzi, and V. Barth (2002), On the Difficulty of Detecting Streaming Potentials Generated at Depth, *Pure and Applied Geophysics*, 159(11-12), 2629-2657.
- Rao, P. S., C. K. Saraswathyamma, and M. R. Sethuraj (1998), Studies on the relationship between yield and meteorological parameters of para rubber tree (*Hevea brasiliensis*), *Agricultural and Forest Meteorology*, 90(3), 235-245.
- Rücker, C., T. Günther, and K. Spitzer (2006), Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography – I. Modelling, *Geophysical Journal International*, 166(2), 495-505.
- Samouëlian, A., I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand, and G. Richard (2005), Electrical resistivity survey in soil science: a review, *Soil and Tillage Research*, 83(2), 173-193.
- Sasaki, Y. (1994), 3-D resistivity inversion using the finite-element method, *Geophysics*, 59(12), 1839.
- Tabbagh, A., M. Dabas, A. Hesse, and C. Panissod (2000), Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horization, *Geoderma*, 97(3-4), 393-404.
- Telford, W. M., L. P. Geldart, and R. E. Sheriff (1990), *Applied Geophysics*, 2nd ed., Cambridge University Press.
- Tsourlos, P. I., J. E. Szymanski, and G. N. Tsokas (1999), The effect of terrain topography on commonly used resistivity arrays, *Geophysics*, 64(5), 1357.
- Watanabe, K., T. Yamamoto, T. Yamada, T. Sakuratani, E. Nawata, C. Noichana, A. Sributta, and H. Higuchi (2004), Changes in seasonal evapotranspiration, soil water content, and crop coefficients in sugarcane, cassava, and maize fields in Northeast Thailand, *Agricultural Water Management*, 67(2), 133-143.
- Williamson D.R., Peck A.J., Turner J.V., and Arunin S. (1989), Groundwater hydrology and salinity in a valley in Northeast Thailand, *Groundwater contamination. IAHS Publ.*, 185: 147-154.
- Yi, M., J. Kim, Y. Song, S. Cho, S. Chung, and J. Suh (2001), Three-dimensional imaging of subsurface structures using resistivity data, *Geophysical Prospecting*, 49(4), 483-497.