

UNIVERSITE AIX-MARSEILLE I, UNIVERSITE AIX-MARSEILLE III
UNIVERSITE DE TOULON ET DU VAR, UNIVERSITE DE PERPIGNAN
INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE (NANCY)

ECOLE DOCTORALE
SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT d'AIX-MARSEILLE

DEA
GEOSCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

DETERMINATION ET EVOLUTION DE LA RESISTIVITE ELECTRIQUE
EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU
APPLIQUEES AUX PROFILS D'ALTERATION LATERITIQUES
DU MASSIF DE TIEBAGHI, NOUVELLE-CALEDONIE.

Par Sébastien BEZIS

Responsables de Stage :

Michel RITZ
Jean-Claude PARISOT
Bernard ROBINEAU
Cécile SAVIN

Année : 2002-2003

RESUME

La géologie de la Nouvelle-Calédonie se caractérise par la présence d'une nappe ophiolitique obductée sur la Ride de Norfolk à l'Eocène. Depuis lors les péridotites de cette nappe n'ont cessé d'être soumises à une altération supergène qui a conduit localement à la formation de gisements de nickel, exploitées maintenant depuis plus d'un siècle. Le Massif de Tiébaghi, situé dans le Nord de l'île, fait l'objet d'une de ces exploitations. Des explorations menées par la Société Le Nickel (SLN) ont montré l'existence de structures géologiques orientées préférentiellement SE-NO, caractérisées par une succession d'approfondissements du profil d'altération et de remontées du "bed-rock".

Cette structure en seuils et en sillons est très bien représentée par les pseudo-sections obtenues en tomographie électrique 2D. Des variations saisonnières de la résistivité sont enregistrées par une succession de profils réalisés sur un même site et sont attribuées, premièrement, à des fluctuations de la teneur en eau du sol, avec des circulations éventuelles entre les nappes présentes dans le sous-sol ; et d'autre part à des imprécisions de mesure induites par les fortes variations verticale et horizontale de résistivité rencontrées sur le terrain. Les différentes mesures de résistivité, effectuées en laboratoire sur différents échantillons du manteau d'altération en fonction de leur teneur respective en eau, font apparaître une relation évidente entre ces deux facteurs, et dont l'importance dépend de l'altération considérée. Une relation entre la roche saine et son degré d'altération n'a pu être par contre établie, du fait de l'impossibilité d'obtention de mesures stables. Ces variations de résistivité ne modifient pas significativement la géométrie des structures géoélectriques obtenue par la tomographie électrique 2D ; il apparaît cependant que la teneur en eau affecte légèrement la délimitation géoélectrique des remontées de la roche saine, comparée à celle des sillons. Une représentation 3D d'un site du massif, réalisé en utilisant les différents profils de résistivité effectués, n'a pu confirmer cette orientation SE-NO du fait d'un maillage trop large des données.

ABSTRACT

The New Caledonia geology is characterised by an Ophiolite obducted over the Norfolk Ridge during the Eocene. Since this exhumation, the peridotitic rocks have been strongly weathered that has led to the formation of nickel ores, which are exploited for more than one century. The Tiébaghi Massif located in Northern Island, is actually exploited by the Société Le Nickel (SLN). Previous studies have revealed the existence of geological structures that are preferentially oriented SE-NW. In fact, these structures are characterised by a succession of weathering furrows and unweathered bedrock ridges.

The pseudosections obtained by Electrical Resistivity Tomography (ERT) have clearly depicted such structures. The seasonal variations of the resistivity have been recorded by a serie of geoelectrical profiles at a same site. Although some inaccuracies of resistivity measurements can be induced by relatively quick vertical and horizontal variations of weathering facies, the resistivity variations can be attributed either to fluctuations of groundwater content or to shallow water circulations underneath the ferricrete layer. Laboratory resistivity measurements have been also obtained on various samples of weathering facies as a function of their water content. The results show a more or less negative relation between the resistivity and the water content, depending on the weathering facies. The relation between the rock and its weathering degree was not established owing to the unstability of measurements. The variations of resistivity, induced by water content fluctuations, do not significantly change the geometry of geoelectrical structures depicted in the ERT pseudosections. It however appears that the water content further affects the geoelectrical delimitation of the bedrock ridges than that of the weathering furrows. A block-model of a study site, realised by the differents pseudosections obtained in ERT, do not highlight this orientation SE-NO because of the coarse data resolution.

MOTS CLE : prospection, géophysique, résistivité, électrique, variations, relation, teneur en eau, laboratoire, influence, température, latéritique, Tiébaghi, Nouvelle-Calédonie.

INTRODUCTION

Une campagne de prospection géophysique par sondage électrique vertical a été réalisée sur le plateau de Tiébaghi au cours de l'année 1976 par la Société Le Nickel (SLN). Cette prospection avait pour but de tester la méthode électrique en vue de déterminer la morphologie du "bed-rock" sous sa couverture d'altération par l'utilisation des techniques du sondage électrique et du profil de résistivité (traîné électrique). Les résultats se sont montrés limités compte tenu de la topographie extrêmement perturbée du toit du "bed-rock" et des nombreux accidents qui l'affectent. Il semble ainsi nécessaire d'utiliser des méthodes de prospection permettant de sonder le sous-sol aussi bien dans la direction verticale que dans les directions horizontales.

Dans cette optique, une campagne de prospection géophysique par tomographie électrique 2D est lancée en mai 2002 avec la société INGEMINE en association avec l'UR037 de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) de Nouméa. Cette méthode a déjà prouvé son efficacité concernant l'étude des manteaux d'altérations au Sénégal Oriental (Beauvais *et al.*, 1999, 2003a-03b ; Ritz *et al.*, 1999).

Les contacts géologiques tels que les seuils, caractérisés par un amincissement des horizons supérieurs et une remontée du "bed-rock", et les sillons, caractérisés par un épaissement des horizons d'altération se sont montrés très bien représentés par la tomographie électrique 2D (Cf. Poster réalisé par l'IRD, représenté en *Annexe I*), avec des résultats les plus remarquables en saison humide (Savin, 2002-03 ; Savin *et al.*, 2002). Des gammes de résistivités ont ainsi été délimitées pour chaque niveau du manteau d'altération.

Dans le but d'optimiser l'interprétation des profils obtenus en délimitant les différents niveaux d'altération par leur gamme respective de résistivité, différentes approches sont envisagées.

Une comparaison entre différentes pseudo-sections obtenues sur un même profil à différents moments de l'année est effectuée afin de mettre en évidence d'éventuelles variations saisonnières de la résistivité, et d'en préciser les causes.

Puis deux approches expérimentales sont développées au laboratoire sur différents échantillons du manteau d'altération. La première vise à déterminer la relation entre la résistivité électrique et le degré d'altération de la roche saine, de type péridotite ; alors que la deuxième porte sur la détermination d'une relation entre la résistivité électrique et la teneur en eau des différents faciès d'altération sus-jacent.

Pour terminer, une représentation 3D d'un site d'étude est réalisée à partir de données issues des différents profils de résistivité effectués.

I - PRESENTATION DE LA NOUVELLE-CALEDONIE

1.1 CADRE GEOGRAPHIQUE DE LA NOUVELLE-CALEDONIE

Située au Nord du Tropique du Capricorne, la Nouvelle-Calédonie fait partie de l'ensemble mélanésien, sous-groupe qui, avec la Polynésie, la Micronésie et l'Australie, constitue le continent océanien. Située au Sud de la Mélanésie entre le 19^e et le 23^e degré de latitude Sud et le 159^e et 172^e degré de longitude Est, la Grande Terre (16 000 km²) s'allonge du Nord-Ouest au Sud-Est sur 400 km ; sa largeur varie entre 40 et 50 km.

Elle est traversée du Nord au Sud par une chaîne de massifs montagneux culminant au Nord au Mont Panié (1 628 m), et au Sud au Mont Humboldt (1 618 m). Cette chaîne centrale coupe l'île en deux régions distinctes :

- à l'Est, les massifs, entaillés par des vallées profondément encaissées, à la végétation luxuriante, descendent de manière abrupte vers une côte découpée ;
- à l'Ouest, les massifs descendent en pente douce ; leurs vallées alluviales forment une large plaine côtière vallonnée, propice aux cultures et à l'élevage.

L'île est ceinturée par un récif-barrière, le plus grand navigable au monde par la superficie (22 000 km²).

1.2 CADRE GEOLOGIQUE DE LA NOUVELLE-CALEDONIE

1.2.1 Résumé de l'histoire géologique

L'ensemble des travaux anciens synthétisés par Paris (Mem. BRGM, 1981) et récents (Cluzel *et al.*, 2001 ; Meffre *et al.*, 1996 ; Eissen *et al.*, 1998) ont montré que la Nouvelle-Calédonie, portée par la ride de Norfolk, est formée d'une mosaïque d'unités continentales et océaniques, assemblée au cours de deux cycles principaux :

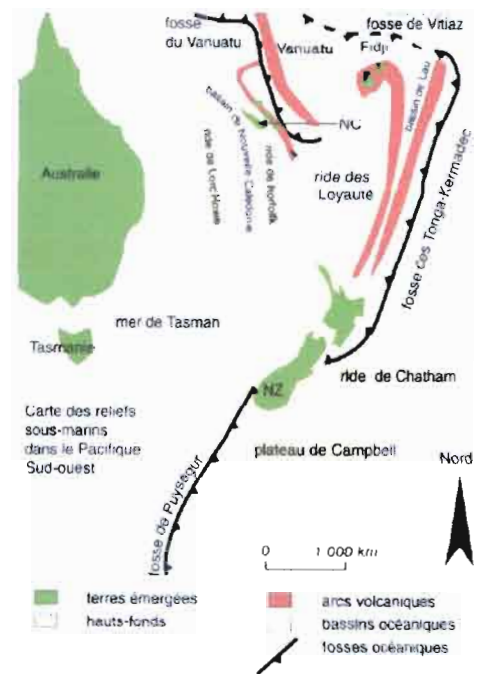
- un cycle Permo-Crétacé marqué par la formation d'unités volcano-plutoniques d'arc intra-océanique le long de la marge orientale du Gondwana, obductées et accrétées en bloc sur cette dernière ;
- un cycle Crétacé supérieur-Paléogène marqué par la fragmentation de cette marge et l'ouverture des bassins de Nouvelle-Calédonie et de la mer de Tasman, puis du bassin Est-Calédonien. Ce dernier est à l'origine de l'Unité de Poya et des massifs ophiolitiques à l'Est de la Ride de Norfolk en réponse au processus de subduction entre les plaques Indo-australienne et Pacifique, alors reportée à l'Est. L'entrée à l'Eocène moyen du bloc calédonien dans la subduction

des Loyautés est à l'origine du métamorphisme haute pression du Nord-Est calédonien ainsi que de l'obduction de la nappe des basaltes, puis de la nappe ophiolitique.

1.2.2 Cadre géodynamique actuel

La Nouvelle-Calédonie est située sur la plaque Indo-australienne qui affronte la plaque Pacifique en différentes zones de subduction (Cf. *Figure 1*). Elle juxtapose ainsi ce qui est communément appelée la ceinture de feu du Pacifique, s'étirant des îles Aléoutiennes au Nord, à la Nouvelle-Zélande au Sud.

La plupart des autres îles du Pacifique Sud-Ouest ont une histoire plus récente que la Nouvelle-Calédonie et encore très mouvementée. Elles sont de nature volcanique et portent des volcans actifs. C'est le cas de l'archipel du Vanuatu, de celui des Tonga-Kermadec, de Wallis-Futuna et des Fidji (Picard, 1999).



*Figure 1 : Cadre géodynamique actuel de la Nouvelle-Calédonie (Picard, 1999).
NC : Nouvelle-Calédonie ;
NZ : Nouvelle-Zélande.*

1.2.3 Les massifs ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie

De la nappe ophiolitique obductée à l'Eocène, il n'y a aujourd'hui que la partie inférieure de la lithosphère océanique, constituée de péridotites dont l'altération supergène a conduit à la formation des gisements de nickel (Trescases, 1975). Actuellement, les péridotites couvrent encore plus du tiers de la superficie de la Grande Terre (Cf. *Figure 2*). Elles représentent ainsi la majeure partie des massifs, dans le Sud et le long de la côte Ouest à partir de Bourail. Les plus communes sont des harzburgites (péridotites avec de l'orthopyroxène) et des dunites (péridotites à olivine seule) qui constituent la base de la lithosphère des plaques océaniques.

Des péridotites à clinopyroxène et plagioclase ont été identifiées dans les massifs de Poum et de Tiébaghi, dans le Nord de la Grande Terre (Cf. *Figure 2*), ainsi que d'abondants filons et complexes de gabbro dans le grand massif du Sud, à la Montagne des Sources par exemple (Pelletier, 1989).

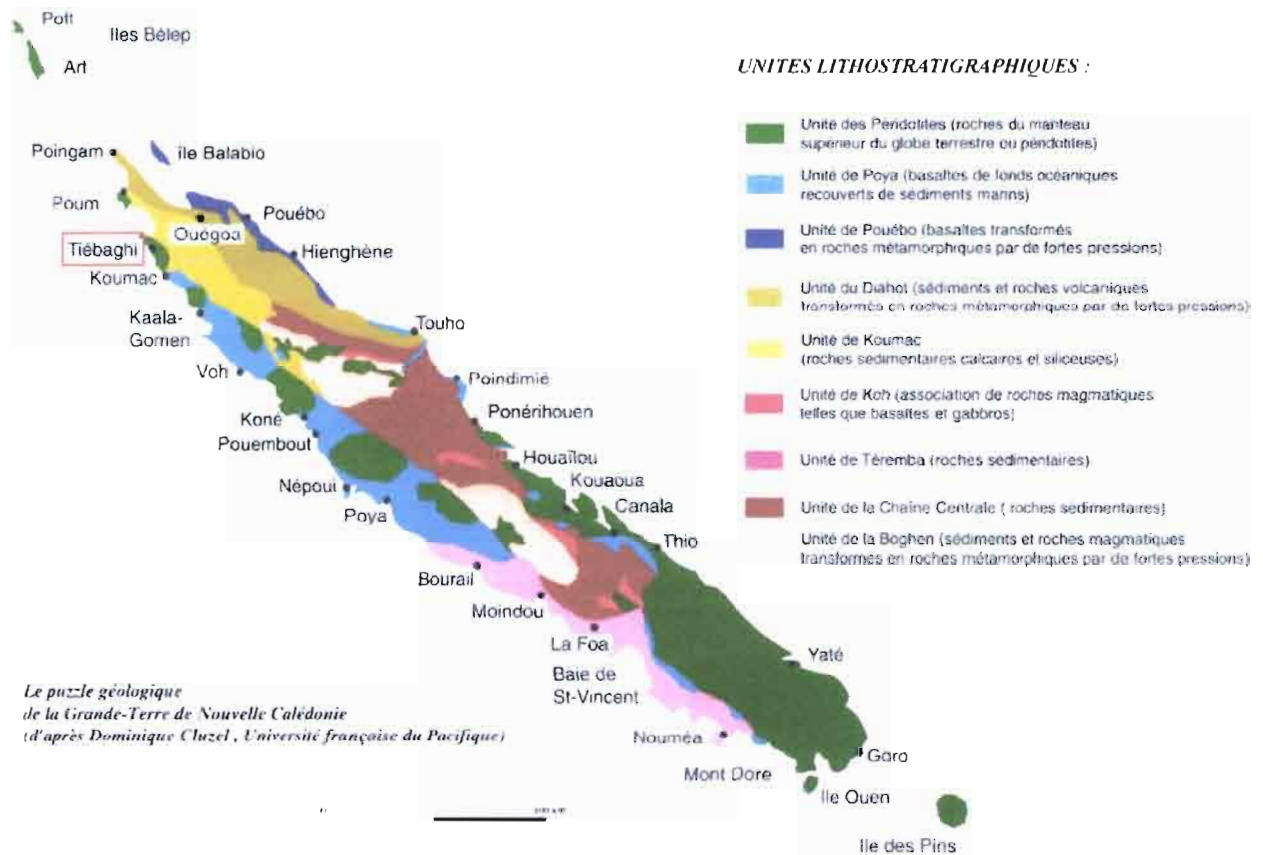


Figure 2 : Carte géologique simplifiée de la Nouvelle-Calédonie (Picard, 1999).

1.2.4 L'altération supergène des péridotites

Soumises à un climat tropical humide, les péridotites s'altèrent lentement pour finalement donner naissance à des oxy-hydroxydes ferriques résiduels à peine cristallisés : les limonites (FeO-OH), qui s'oxydent à l'air et cristallisent progressivement en goethite.

L'altération des péridotites conduit à la formation d'un profil type (Cf. **Figure 3**) constitué généralement (en "dénominations des mineurs") par :

- **la saprolite**, qui conserve la structure de la roche saine mais dont la dissolution partielle se traduit par une porosité importante. L'altération induit une diminution de la teneur en magnésium (et dans une moindre mesure, de la teneur en silice), une accumulation résiduelle du fer et éventuellement un enrichissement en nickel.

- **les latérites jaune et rouge**, produits d'une altération plus avancée. La structure de la roche est partiellement reconnaissable pour la première et complètement effacée pour la latérite rouge.

Elles sont presque entièrement dépourvues de magnésium et de silice et essentiellement constituées d'hydroxydes de fer partiellement cristallisés en goéthite. Leur capacité de rétention du nickel est beaucoup plus faible que celle de l'horizon saprolitique sous-jacent.

➤ **la grenaille et la cuirasse ferrugineuse** forment la partie supérieure du profil et sont constituées essentiellement de goéthite bien cristallisée. La grenaille se compose de nodules ferrugineux résultant du démantèlement d'anciennes cuirasses et/ou du concrétionnement des oxyhydroxydes de fer du niveau des latérites. La cuirasse est scoriacée et alvéolaire, avec des indurations noires à éclat métallique.

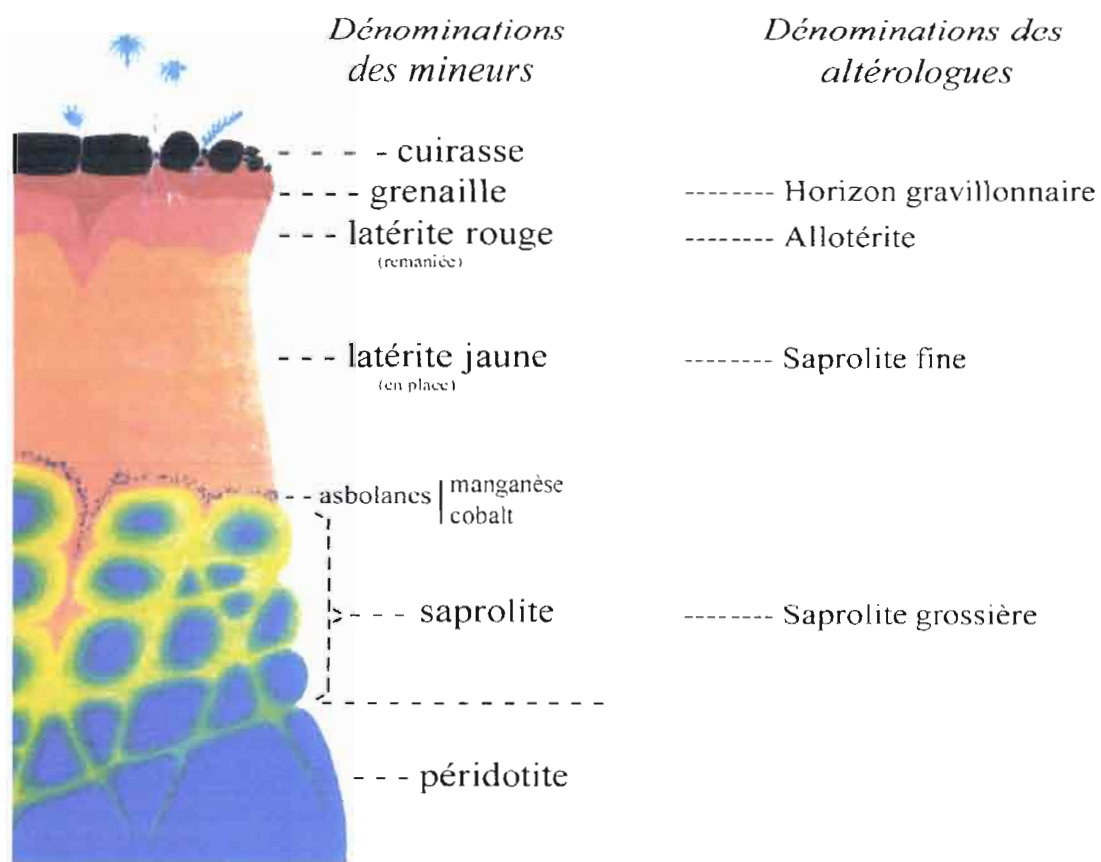


Figure 3 : Profil type d'altération des péridotites (Pelletier, 1989) avec les correspondances entre le vocabulaire des mineurs et celui des altérologues.

Les "dénominations des mineurs" sont celles utilisées par la suite dans ce rapport et le terme saprolite est subdivisé ici en saprolite fine et en saprolite grossière.

L'altération se caractérise par une augmentation de la quantité de Fe_2O_3 et une diminution de MgO et de SiO_2 (Cf. **Tableau 1**) ; le rapport Fe_2O_3/MgO s'avère un bon indice d'altération.

| Ensembles d'altération | Fe ₂ O ₃ | MgO | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ /MgO |
|------------------------|--------------------------------|---------|------------------|-------------------------------------|
| Cuirasse | 75-77 | 0.5-1.5 | 1-2 | 76 |
| Grenaille | 73-75 | 0.5-1.5 | 1-2 | 74 |
| Latérite rouge | 70-72 | 1-2 | 1-3 | 47 |
| Latérite jaune | 68-71 | 1-3 | 2-5 | 35 |
| Saprolite | 20-25 | 15-30 | 35-40 | 0.8 |

Tableau 1 : Composition chimique des altérites (Pelletier, 1989).

1.2.5 Causes de l'enrichissement en nickel

L'altération, par le départ de certains éléments, conduit à une accumulation résiduelle du nickel. Cependant, ce processus ne suffit pas pour conduire à la formation des minerais exploités, dont la teneur est comprise entre 2.5 et 3 % Ni (Pelletier, 1989) ; ce dernier provient également des horizons supérieurs où la cristallisation des limonites en goethite s'accompagne d'une libération de nickel, ce métal ne pouvant entrer dans le réseau cristallin de la goethite. Ce nickel, mis en solution, percole lentement dans les latérites jaunes qui sont rapidement saturées (saturation comprise entre 0.8 et 1.5 % Ni), pour finalement s'accumuler dans l'horizon saprolitique.

1.3 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE :

Le massif de Tiébaghi, connu par son ancienne mine de chrome, est actuellement exploité par la SLN pour sa richesse en nickel. Il se situe sur la côte Ouest de la Nouvelle-Calédonie, à 380 kilomètres au Nord-Ouest de Nouméa et à 10 kilomètres au Nord de Koumac, principale agglomération du Nord de l'île (Cf. **Figure 2**). Long de 20 km et large de 8, il est bordé à l'Ouest par le lagon et à l'Est par la vallée de la Néhoué. Contrairement aux autres massifs de la côte Ouest culminant à plus de 1000 m, le massif de Tiébaghi n'atteint que 600m d'altitude. Il appartient aux massifs péridotitiques et représente 1% de leur surface totale, avec un profil d'altération latéritique typique.

Les études suivantes concernent la zone Dôme localisée sur la côte Ouest du massif de Tiébaghi. Cette zone, encore non exploitée, a fait l'objet de plusieurs campagnes géophysiques (IRD-Ingémine) et de sondages (SLN) qui ont confirmé la présence d'une succession de seuils et de sillons orientés N140.

II - TOMOGRAPHIE ELECTRIQUE 2D APPLIQUEE AU SITE DOME

Des électrodes ont été implantées de façon permanente le long du profil A-mid sur le site Dôme afin de pouvoir effectuer un suivi régulier dans le temps de la distribution des résistivités selon la profondeur. La première mesure a été effectuée en avril 2002, et depuis l'implantation permanente réalisée en octobre 2002, une mesure de tomographie électrique 2D a été effectuée presque mensuellement le long de ce profil. Des pseudo-sections ont ainsi été obtenues pour les mois d'avril, octobre, novembre et décembre 2002, puis janvier et mars 2003.

Ces différentes mesures sont effectuées afin de mettre en évidence d'éventuelles variations saisonnières de la résistivité induites par des fluctuations de teneur en eau des différents horizons.

Methodologie

L'analyse s'appuie premièrement sur la représentation des pseudo-sections obtenues par inversion. Une étude comparative qualitative et quantitative est ensuite effectuée entre les différents profils, en se basant tout d'abord sur le climat, puis sur les données pluviométriques du Massif de Tiébaghi aux dates de réalisation des différents profils, et enfin sur les informations disponibles concernant le système hydrogéologique de ce massif.

La Nouvelle-Calédonie, bien que située dans la zone intertropicale, bénéficie toute l'année d'un climat sub-tropical, tempéré par les alizés et marqué par deux saisons principales, inversées par rapport à l'hémisphère Nord : la "saison des cyclones", de mi-novembre à mi-avril, chaude et humide, marquée par des épisodes pluvieux intenses (Koumac : ≈ 24 à 27°C , 80 à 180 mm/mois), et la saison fraîche, de mi-mai à mi-septembre, plus sèche (Koumac : ≈ 20 à 23°C , 40 à 70 mm/mois). Le système hydrogéologique du Massif de Tiébaghi a fait l'objet d'une étude préliminaire par l'Agence pour l'Eau et l'Environnement du Pacifique (A2EP) en 1995. Les données piézométriques et de pompages obtenues ont montré l'existence de deux nappes au sein du manteau d'altération :

- une nappe supérieure sous cuirasse, où la porosité est importante avec une circulation de type karstique ;
- une nappe inférieure, au-dessus du bed-rock imperméable, localisée dans la saprolite grossière et les fractures. Les écoulements y sont plus lents que dans la précédente du fait d'une porosité presque de moitié inférieure.

Des relations complexes lient ces deux nappes entre-elles, mais le manque de données actuelles ne permet ni d'en préciser la nature, ni de les quantifier.

Après comparaison de données pluviométriques, le profil de novembre a été choisi comme base comparative pour les autres profils, le total des précipitations les dix jours précédant sa réalisation étant nul (Cf. **Tableau 2**). Ce profil correspond de plus à la fin de la saison sèche.

Les comparaisons entre les différents profils sont effectuées en utilisant les données des différentes inversions obtenues avec le logiciel Res2dinv[®]. Une soustraction entre les valeurs de résistivité à une même profondeur donnée est alors réalisée dans un tableur entre le profil choisi et le profil de référence. Les résultats sont ensuite compilés sous Rockworks2002[®] pour la visualisation graphique.

| | |
|---------------|------|
| Avril 2002 | 42 |
| Octobre 2002 | 28.5 |
| Novembre 2002 | 0 |
| Décembre 2002 | 2 |
| Janvier 2003 | 0.5 |
| Mars 2003 | 35.5 |

Tableau 2: Total des précipitations (en mm) du Massif de Tiébaghi les dix jours précédents la réalisation de chaque profil A-mid.

Résultats

La visualisation des pseudo-sections révèle l'existence de variations saisonnières de la résistivité, essentiellement localisées, pour les plus importantes, sur les seuils. Les profils d'avril et novembre 2002, représentatifs de la fin de chacune des deux saisons, illustrent ces variations (Cf. **Figure 4**).

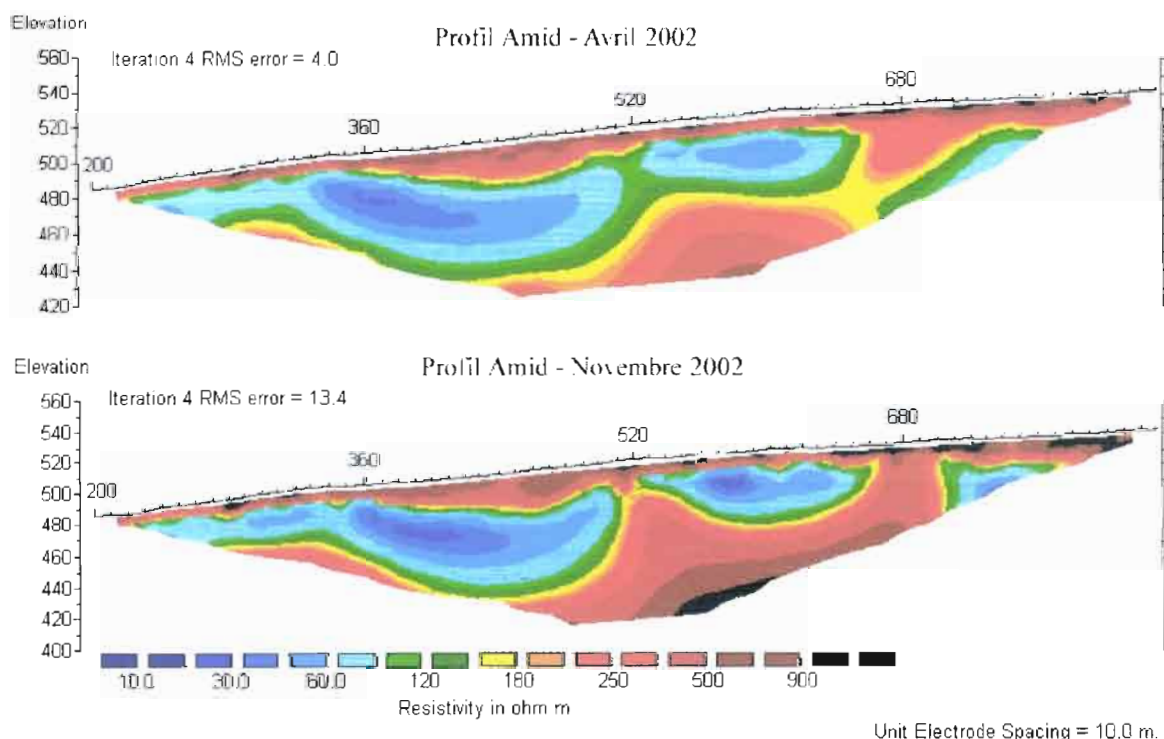


Figure 4 : Représentation des pseudo-sections du profil A-mid pour les mois d'avril et novembre 2002.

L'étude comparative présentée à la **Figure 5** apporte une représentation précise des différences de résistivité entre les différents profils. Elle permet ainsi d'en distinguer les évolutions mensuelles qui affichent deux tendances :

- de fortes variations de résistivité, essentiellement négatives,
- des variations très faibles, positives et négatives.

Un comparatif entre ces zones différenciées et les profils A-mid initiaux (Cf. **Figure 4**), laisse apparaître que les fortes variations correspondent à la cuirasse ferrugineuse et à la roche saine, et les plus faibles aux niveaux de latérite jaune et de saprolite. Cette distinction porte ainsi directement sur la structure même du sous-sol ; les plus fortes variations peuvent alors être attribuées aux seuils et les plus faibles aux sillons. La nature négative des variations résulte du choix du profil de comparaison, celui de novembre, qui correspond à la fin de la saison sèche.

➤ Dans le premier cas, les différences observées au niveau des seuils sont de l'ordre de -10 et -600 ohm.m environ, soit des variations de résistivités comprises entre 10 à 80%. Les plus importantes concernent le seuil central (Cf. **Figures 4 et 5**) pour les mois d'avril 2002 et mars 2003, où la pluviométrie a été la plus importante avant les mesures (Cf. **Tableau 2**).

➤ Dans le cas des sillons, les différences les plus importantes sont de l'ordre de +/-60 ohm.m, mais essentiellement comprises autour de +/-20-40 ohm.m. Cette échelle de variation est très différente de la précédente, mais ces valeurs sont à mettre en relation avec le caractère moins résistant des altérites, comparé à celui de la roche saine. Pour exemple, une différence de 20 ohm.m dans les altérites correspond à des variations de résistivité de 20 à 80%.

Ces variations au niveau des seuils et des sillons sont ainsi comparables en absolu.

Discussion

L'étude des profils des mois d'avril et novembre 2002 montre clairement l'existence de variations saisonnières de la résistivité liées aux différences de teneur en eau des ensembles du manteau d'altération ; ces dernières s'expliquant par le contraste pluviométrique avéré entre les deux saisons correspondantes.

Les variations de résistivités obtenues avec l'étude comparative détaillée affichent un résultat plus mitigé ; si une partie des évolutions mensuelles est attribuée également aux mêmes causes, les fortes variations observées au niveau des seuils ne peuvent pas en résulter uniquement. En effet, entre les profils de novembre et décembre, il n'est tombé que deux millimètres d'eau alors que les variations au niveau du seuil central atteignent 60% ; et de part la situation géographique du site, elles ne peuvent pas être attribuées à des apports d'eau extérieurs provenant d'un autre massif.

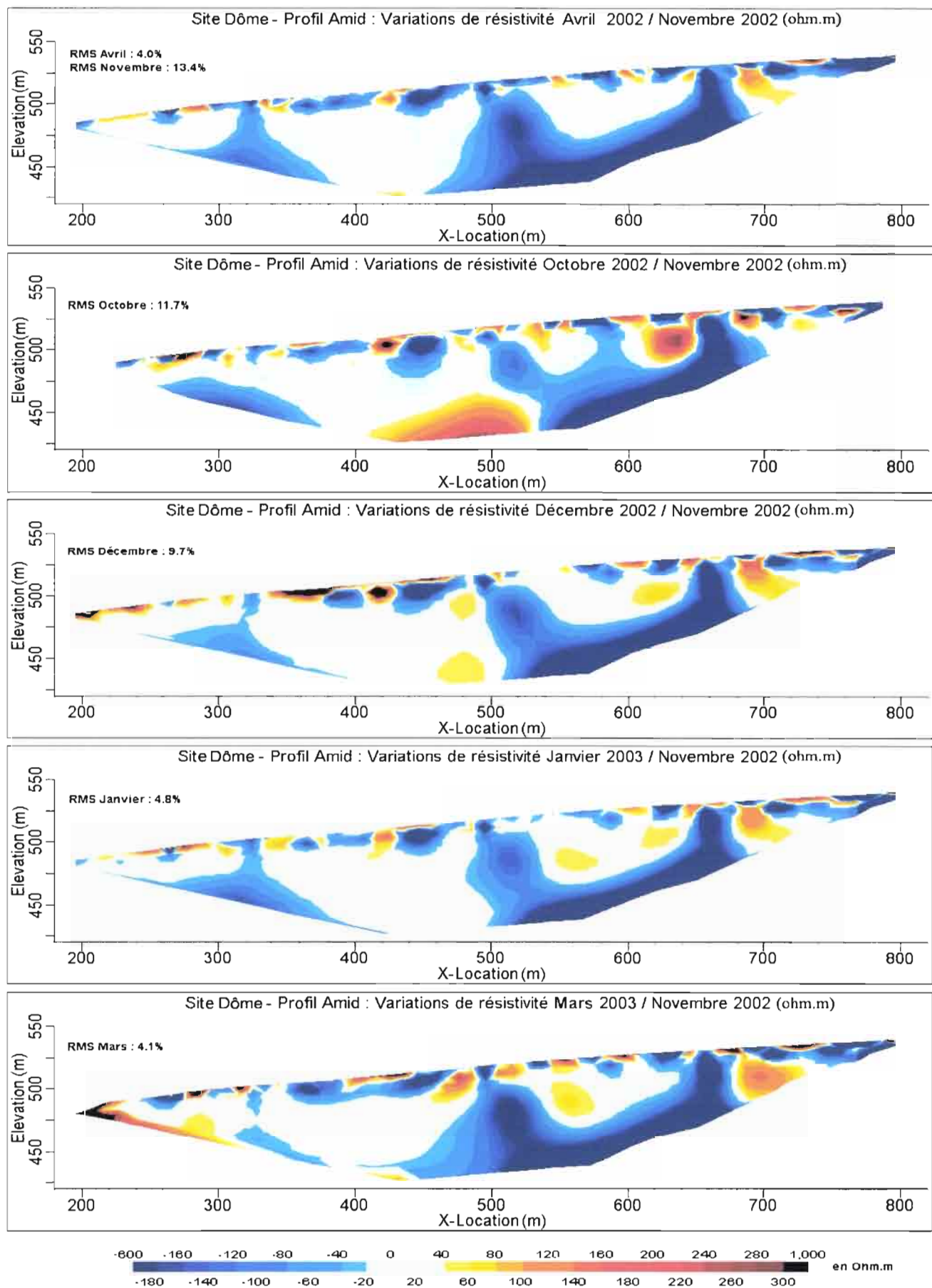


Figure 5 : Variations de résistivité entre les différents profils A-mid par rapport au profil de référence du mois de novembre 2002, en ohm.m.

Par contre, ces fortes variations de résistivité peuvent résulter de circulations entre les deux nappes. Une hypothèse proposée alors dans cet exemple est la décharge brutale de la nappe sous cuirasse, phénomène courant dans les circulations karstiques. Néanmoins, ces circulations ne peuvent pas expliquer toutes les variations affichées (qui sont dans l'absolu comparables) par les différents ensembles du manteau d'altération. Les fluctuations résultent vraisemblablement, pour une autre partie, d'imprécisions de mesure sur le terrain, liées aux forts contrastes de résistivité dans les directions verticale et horizontales observés sur le Massif de Tiébaghi, et à l'humidité du sol ; les RMS les plus importants correspondent aux profils réalisés pendant les saisons sèche et fraîche (Cf. **Figure 5**). Les valeurs des variations observées sur les profils sont à mettre en corrélation avec les gammes de résistivité des différents ensembles du manteau d'altération ; les variations les plus importantes concernant les matériaux les plus résistants.

Conclusion :

Les études comparatives entre les différents profils A-mid montrent l'existence de variations saisonnières et mensuelles de la résistivité. Si les premières peuvent être attribuées entièrement à des variations de teneur en eau, les secondes résultent d'autre part de la méthode d'inversion et également de la variabilité des mesures lors des acquisitions sur le terrain, dont les causes ont été précédemment énoncées. Dans le cas des variations mensuelles, les différences de résistivité observées peuvent être attribuées certainement, pour une autre partie, à des circulations entre nappes.

Compte tenu de ces différents éléments, il n'est pas possible de quantifier précisément les variations observées pour un niveau d'altération donné. Par contre, l'étude comparative détaillée s'avère être un outils efficace à la reconnaissance des seuils sur les profils ; les meilleurs résultats étant obtenus en comparant un mois pluvieux avec un mois sec (Cf. **Figure 5, comparatif avril/novembre**).

Des études complémentaires pourraient être envisagées ; premièrement, en tomographie électrique 2D afin de déterminer plus précisément les contributions des différents facteurs évoqués ci-dessus, en réalisant sur le terrain deux mesures successives et une mesure après une brève période de fortes précipitations (ce que ne présente aucun des profils réalisé à ce jour) ; et deuxièmement en hydrogéologie, afin de déterminer précisément, sur le Massif de Tiébaghi, les circulations des nappes présentes et leurs interactions mutuelles, ainsi que les formations géologiques affectées.

III - MESURE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE SUR CAROTTES EN LABORATOIRE

La propagation d'un courant électrique dans un matériau donné dépend de la nature chimique des phases liquides et solides ainsi que de leur proportion respective (Gupta et Hanks, 1972 ; Rhoades *et al.*, 1976 ; Nadler, 1982 ; Bottraud et Rhoades, 1985). L'interprétation du signal électrique reçu après injection du courant sera d'autant plus aisée que certains de ces paramètres seront considérés comme invariants.

La mesure de la résistivité de roches ou de minéraux en laboratoire nécessite des échantillons de forme régulière, avec comme principale difficulté l'obtention de contacts électriques suffisants, particulièrement pour les électrodes d'injection (Telford *et al.*, 1990).

Deux approches expérimentales sont développées ici suivant la nature du matériau à étudier. La première vise à déterminer la relation entre la résistivité électrique et le degré d'altération de la roche saine, de type péridotite ; alors que la deuxième porte sur la détermination d'une relation entre la résistivité électrique et la teneur en eau des différents faciès d'altération sus-jacent.

Les échantillons ont été prélevés par carottage sur la zone d'étude par la SLN à fin de prospection et se présentent sous la forme de cylindres d'un diamètre de 4.7 cm, et d'une longueur variable. Une distinction a été réalisée dans le choix du dispositif à appliquer, de part la nature différente de ces échantillons et des études envisagées.

3.1 METHODOLOGIE ET THEORIE ELECTRIQUE

Appareillage de mesure

La résistance est mesurée avec un Terrameter ABEM SAS 4000 à l'aide d'un seul quadripôle AMNB horizontal en configuration Wenner (Cf. *Figure 6*).

Le courant électrique d'intensité I est injecté à l'aide des deux électrodes externes (A, B) et la différence de potentiel (ΔV) est mesurée entre les deux électrodes internes (M, N), de telle manière que $AB=3MN$. Les quatre électrodes en acier inox ou en cuivre sont symétriques par rapport au centre du dispositif (O) et reliées directement au résistivimètre.

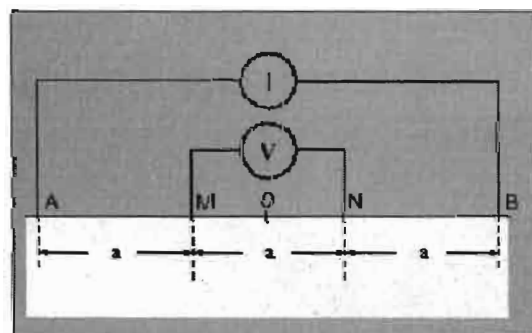


Figure 6 : Configuration quadripôle Wenner.

L'espacement inter-électrodes a correspond également à la profondeur de prospection (Rhoades, 1975).

Les échantillons sont considérés comme homogènes de part leur faible volume et la profondeur de pénétration des électrodes n'influe pas ou peu sur les mesures de résistivité (Giao *et al.*, 2002).

Coefficient géométrique du dispositif

La formule permettant de passer de la résistance à la résistivité (ρ) est exprimée par:

$$\rho = K.R \quad \text{avec} \quad R : \text{résistance en ohm}$$

$$K : \text{coefficient géométrique du dispositif en m}$$

Pour un dispositif Wenner conventionnel, ce coefficient géométrique est égal à $2\pi.a$, avec a l'espacement inter-électrodes. Mais cette valeur de K est valable dans un milieu considéré comme infini. Une constante K' , appelée *constante du dispositif*, est alors déterminée empiriquement au laboratoire, en mesurant la résistance de différentes solutions salines de conductivités électriques connues. Les résultats pour une cellule cylindrique de 10 cm de longueur et de 4.7 cm de diamètre sont présentés dans le **Tableau 3** ; la valeur de K' retenue est de 0.066 m.

| | Conductivité mesurée ($S.m^{-1}$) | Moyenne des résistances mesurées (ohm.m) | Constante du dispositif K' (m) |
|------------|-------------------------------------|--|----------------------------------|
| Solution 1 | 0.01668 | 891.5 | 0.067 |
| Solution 2 | 0.00771 | 2001.8 | 0.065 |
| Solution 3 | 0.00459 | 3246.3 | 0.067 |
| Solution 4 | 0.00217 | 6942.6 | 0.066 |

Tableau 3 : Détermination de la constante du dispositif K' à partir de solutions de KCl de conductivités électriques connues, pour une cellule cylindrique de 10 cm de longueur et de 4.7 cm de diamètre ; valeur moyenne de $K' = 0.066m$.

La formule précédente s'écrit alors : $\rho = 0.066.R$ (1)

Influence de la température :

Les conductivités de surface et de l'électrolyte sont dépendantes de la température. Cette relation peut être exprimée sous une forme linéaire, laquelle est très bien décrite par les mesures en laboratoire (Revil *et al.*, 1998).

Une relation du type :

$$\sigma(T) = \sigma(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)]$$

est alors déterminée où σ est la conductivité globale ($S.m^{-1}$) égale à $1/\rho$, T_0 la température de référence ($25^\circ C$), et α le coefficient de correction linéaire ($^\circ C^{-1}$).

Ce coefficient α est calculé empiriquement au laboratoire par des mesures de résistivité effectuées à différentes températures ($40, 50$ et $60^\circ C$) sur deux échantillons de chaque niveau d'altération : latérite jaune, saprolite fine et grossière. Les différentes valeurs de α sont obtenues par régression linéaire sur les mesures obtenues et présentées à la **Figure 7**. Elles varient de 0.031 à $0.037^\circ C^{-1}$ et ne sont pas identiques pour les deux échantillons de chaque altérité. Pour cette raison une valeur moyenne a été retenue pour l'ensemble des formations et fixée à $0.035^\circ C^{-1}$.

La formule s'écrit alors :
$$\sigma(T) = \sigma(T_0)[1 + 0.035(T - T_0)] \quad (2)$$

Ce résultat est en accord avec les limitations théoriques établies par $\alpha > \alpha_f$ et $\alpha < \alpha_s$, où α_f représente le coefficient de correction pour l'électrolyte et α_s le coefficient de correction linéaire pour la conductivité de surface. Ce dernier dépend de la nature du cation présent dans la solution et est égal à $\approx 0.040^\circ C^{-1}$ pour K^+ (Hardwick, 1987), la solution employée dans les expériences étant du KCl ; et α_f est un facteur indépendant qui vaut $\approx 0.023^\circ C^{-1}$ (Sen et Goode, 1992).

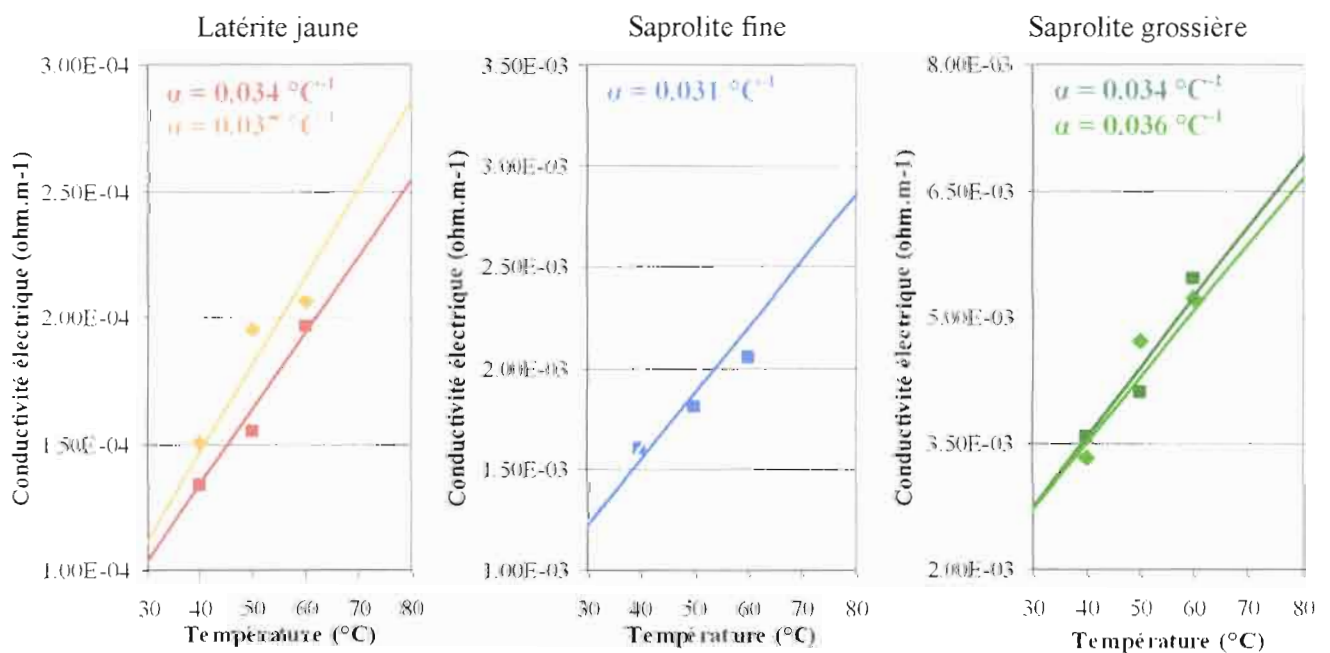


Figure 7 : Détermination empirique par régression linéaire du coefficient de correction de température α , sur deux échantillons de chaque niveau d'altération.

3.2 MESURE ET SIGNIFICATION DE LA RESISTIVITE ELECTRIQUE DE LA ROCHE SAINTE

Les électrodes sont en inox et a est égal à 2.5 cm (Cf. **Figure 8**). Différentes solutions sont testées afin d'assurer une circulation optimale du courant entre la roche saine et les électrodes. Les premiers tests sont réalisés en employant des solutions à base de bentonite, puis des solutions de chlorure de sodium et de sulfate de cuivre à différentes concentrations.

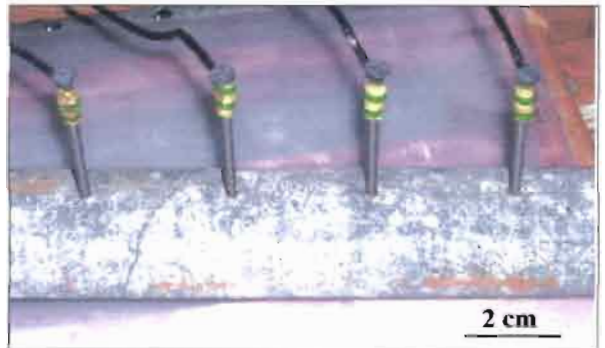


Figure 8 : Dispositif expérimental appliqué aux mesures de résistance sur la roche saine.

Résultats et discussion

Les résultats se sont montrés peu concluants et décevants pour l'ensemble des méthodes utilisées. Les solutions à base de bentonite ne permettent pas la circulation du courant et les autres solutions affichent des valeurs de résistivité qui diffèrent suivant leur nature et leur concentration, et qui varient au cours du temps.

L'instabilité des mesures observée semble ainsi résulter de phénomènes électrolytique et électrochimique entre les ions présents dans la solution et les électrodes et/ou les ions et la roche saine. Les péridotites ont une gamme de résistivités comprise entre $3 \cdot 10^3$ (humide) et $6.5 \cdot 10^3$ ohm.m (sec) (Telford *et al.*, 1990) et des porosités situées autour de 4 à 10% (Combiér, 2002). La première hypothèse de polarisation des électrodes apparaît ainsi la plus plausible. Trois possibilités de résolution peuvent être alors envisagées, dans le but d'en réduire ou d'en annuler les effets :

- l'utilisation d'électrodes non-polarisables ;
- une diminution de la fréquence d'injection de l'appareil de mesure afin qu'à chaque inversion du potentiel, la phase d'accélération des ions puisse être considérée comme négligeable par rapport à leur temps de circulation à vitesse stabilisée, i.e. l'élimination de l'effet de polarisation (fréquences de l'ordre de 1000 Hz) ;
- l'utilisation d'un ohmmètre appliquant une différence de potentiel alternative avec une fréquence d'injection réglable et dont les potentiels appliqués soient faibles (quelques volts) pour éviter les réactions électrochimiques aux électrodes (par ex. $2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$).

Aucune des trois solutions proposées n'a pu être envisagée dans ce stage, et ceci pour des raisons de fabrication ou d'utilisation : la conception d'électrodes non-polarisables apparaît très difficile à

réaliser pour un diamètre de 3mm ; le changement de fréquence est impossible sur le résistivimètre utilisé en mesure de résistance ; l'ohmmètre « particulier » n'était pas disponible lors de cette étude.

Conclusion

Ces expériences ont mis en évidence la difficulté d'injection du courant dans un matériel très résistant. Les différentes méthodes employées n'ont pu résoudre le problème de circulation électrique entre les électrodes et la roche saine : l'utilisation de solutions salines ne permet pas d'acquérir des mesures stables dans le temps et l'emploi d'étain ou de bentonite ne fournit pas un contact suffisant pour permettre le passage du courant d'injection.

Des perspectives de résolution du problème ont été envisagées et pourraient ainsi faire l'objet d'études complémentaires.

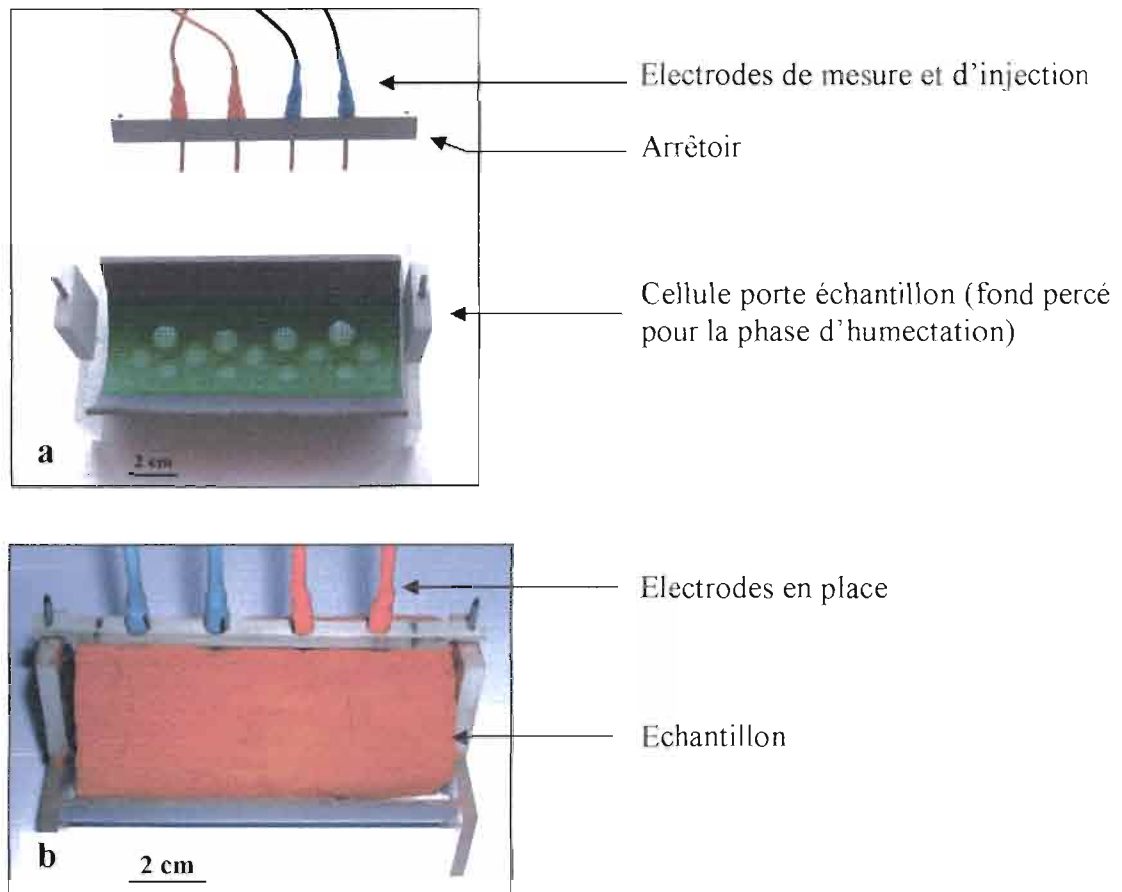
3.3 MESURE ET SIGNIFICATION DE LA RESISTIVITE ELECTRIQUE DES ALTERITES

Les différents faciès sélectionnés pour cette expérience sont la saprolite grossière, la saprolite fine et la latérite jaune. On a admis dans cette étude que le diamètre des échantillons est constant et invariant pendant les phases d'humectation et de dessiccation.

De part la nature fragile des altérites, un dispositif expérimental a été conçu pour limiter au minimum leurs manipulations durant les différentes étapes de l'expérience.

Les échantillons ont une longueur de 10 cm pour un diamètre de 4,7 cm. Chacun d'entre eux est placée dans une cellule de forme demi-cylindrique fermée à ces deux extrémités et fabriquée en PVC. Les électrodes en cuivre sont fixées sur un support et pénètrent les échantillons sur une longueur de 20mm (Cf. **Figures 9**) avec $a = 2$ cm. Ce dispositif permet d'assurer une pénétration identique des électrodes durant l'expérience et minimise leurs déplacements entre les phases de mesure.

L'échantillon est humecté dans sa cellule sous vide à -50 hPa pendant 24h. La solution utilisée est du KCl de concentration M/1000 et d'une conductivité de 146.10^{-6} s.cm⁻¹, soit une résistivité de 685.10^3 ohm.m. Cette valeur correspond à une moyenne des mesures de conductivité effectuées sur le terrain (Combiér, 2002). Le dispositif est ensuite placé dans une étuve à 56°C. Deux mesures de résistances successives et une mesure de la masse sont effectuées toutes les heures sur chaque échantillon, pendant une période de vingt quatre à trente six heures jusqu'à l'impossibilité de la mesure électrique.



Figures 9 : Dispositif expérimental utilisé pour les mesures de résistance pendant la phase de dessiccation des échantillons d'altérites ; **a** : dispositif seul ; **b** : dispositif avec échantillon.

L'équation permettant de passer de la résistance mesurée à la résistivité électrique normalisée à 25°C (T_0) s'obtient en combinant les équations (1) et (2) précédentes :

$$\rho = 0.066.R \quad (1)$$

$$\sigma(T) = \sigma(T_0)[1+0.035(T-T_0)] \quad (2) \quad \text{or } \sigma = 1/\rho$$

$$\text{d'où } \rho(T_0) = \rho(T)[1+0.035(T-T_0)] \quad (2')$$

$$\text{ie } \rho(T_0) = 0.066.R [1+0.035(56-25)] \quad (2') + (1)$$

$$\text{donc : } \rho(T_0) = 0.13761R$$

Résultats et discussion

Les courbes reliant la résistivité électrique à la teneur en eau des différents échantillons d'altérites sont présentées à la **Figure 10**, les données correspondantes dans le **Tableau 4**.

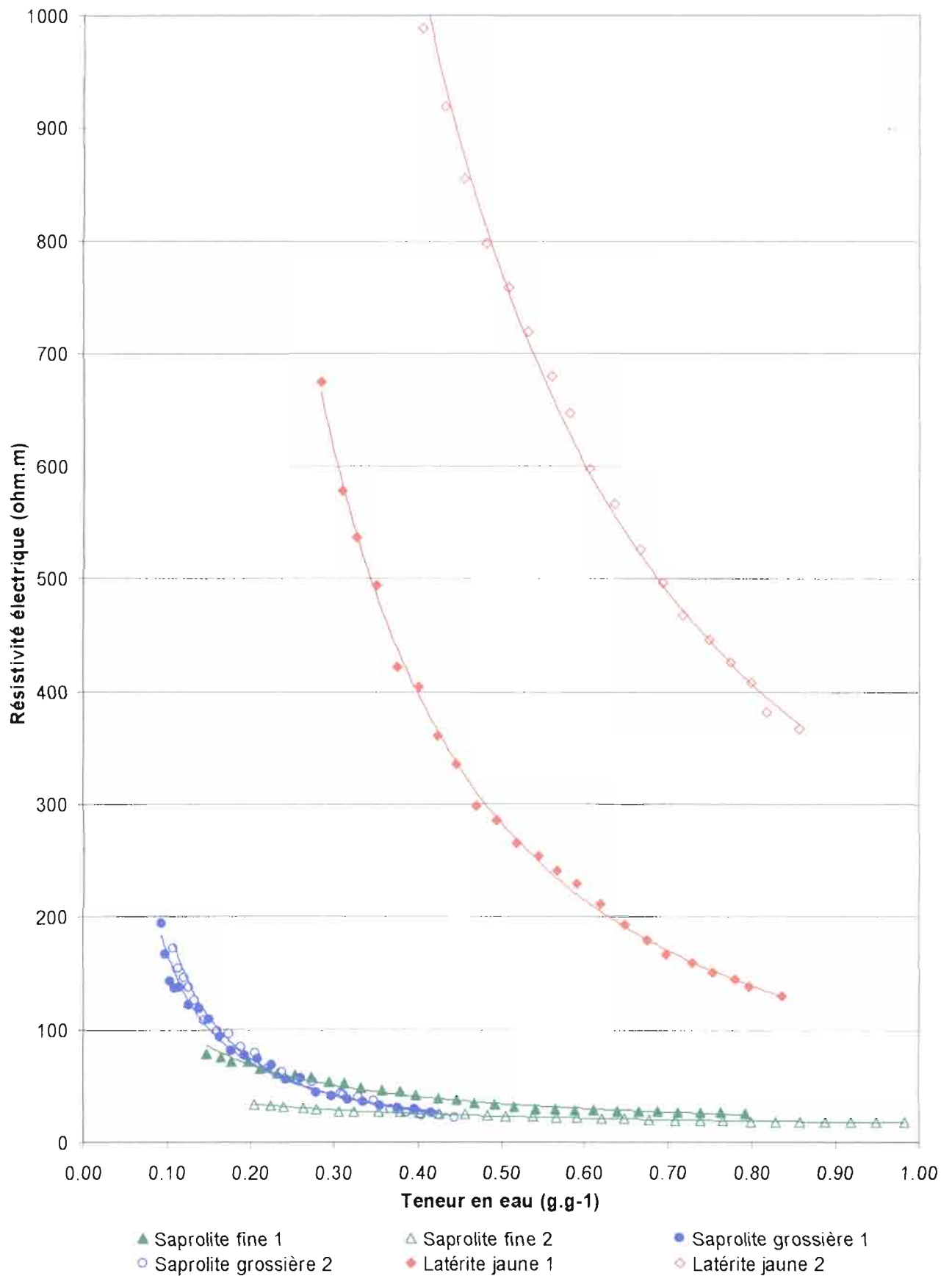


Figure 10 : Relations entre les résistivités électriques et les teneurs en eau pondérales des différents échantillons d'altérites, mesurées au laboratoire.

| Type d'altérites | Résistivités électriques (ohm.m) | Teneur en eau correspondante (g.g ⁻¹) | k | b | R ² |
|----------------------------|----------------------------------|---|-----|-----|----------------|
| LATERITE JAUNE | | | | | |
| Echantillon 1 | 130 → 675 | 0,84 → 0,28 | 101 | 1.5 | 0.99 |
| Echantillon 2 | 367 → 1154 | 0,86 → 0,38 | 300 | 1.4 | 0.99 |
| SAPROLITE FINE | | | | | |
| Echantillon 1 | 25 → 79 | 0,79 → 0,15 | 21 | 0.7 | 0.98 |
| Echantillon 2 | 18 → 34 | 0,98 → 0,20 | 14 | 0.6 | 0.97 |
| SAPROLITE GROSSIERE | | | | | |
| Echantillon 1 | 26 → 194 | 0,42 → 0,09 | 9 | 1.3 | 0.98 |
| Echantillon 2 | 22 → 172 | 0,44 → 0,11 | 7 | 1.4 | 0.99 |

Tableau 4 : Valeurs des résistivités électriques obtenues sur les différents faciès d'altérites avec la teneur en eau correspondante et les valeurs des coefficients a , b et R^2 des courbes de régression obtenues.

Il est à préciser que la teneur minimum en eau est un facteur ne pouvant entrer ici dans les critères d'analyse. En effet, elle correspond au seuil d'impossibilité des mesures électriques qui peut être mis en rapport avec les gammes de résistivité des différents faciès ; illustré parfaitement dans le cas de la latérite jaune (Cf. **Tableau 4**).

Une équation de type $\rho = k Hp^{-b}$ a été calculée par régression où ρ représente la résistivité électrique (ohm.m) et Hp la teneur en eau pondérale. Les valeurs des coefficients k et b des courbes $\rho = f(Hp)$ sont données dans le **Tableau 4**, ainsi que le coefficient de détermination R^2 .

Les échantillons d'altérites pourraient être regroupés selon la valeur de k qui semble être en adéquation avec le degré d'altération :

- pour $k > 100$: latérite jaune
- pour $10 < k < 30$: saprolite fine
- pour $k < 10$: saprolite grossière

Ils pourraient être classés également selon la valeur de b qui paraît être en relation avec le caractère plus ou résistant des altérites :

- pour $0.6 < b < 0.7$: conducteur
- pour $1.3 < b < 1.5$: résistant et intermédiaire

L'ensemble des altérites présente une diminution de la résistivité avec une augmentation de la teneur en eau. Cependant, les fluctuations observées sont mitigées et illustrées par le calcul du facteur de variation pour chacun des deux paramètres (Cf. **Figure 11**):

- la latérite jaune présente une variation de la résistivité d'un facteur 1 à 5 pour une variation de teneur en eau correspondante d'un facteur 1 à 3,

- la saprolite fine d'un facteur 1 à 3 pour 1 à 5,
- la saprolite grossière d'un facteur 1 à 8 pour 1 à 5.

Ces variations sont à mettre en relation avec les gammes de résistivités de chaque faciès, mais il est possible de dégager un classement suivant leur sensibilité respective à la teneur en eau : la saprolite grossière affiche dans ces expériences les plus fortes variations de résistivité pour les teneurs en eau les plus faibles alors que la saprolite fine se montre au contraire nettement moins sensible ; la latérite jaune présente un comportement intermédiaire, très proche néanmoins de celui de la saprolite grossière.

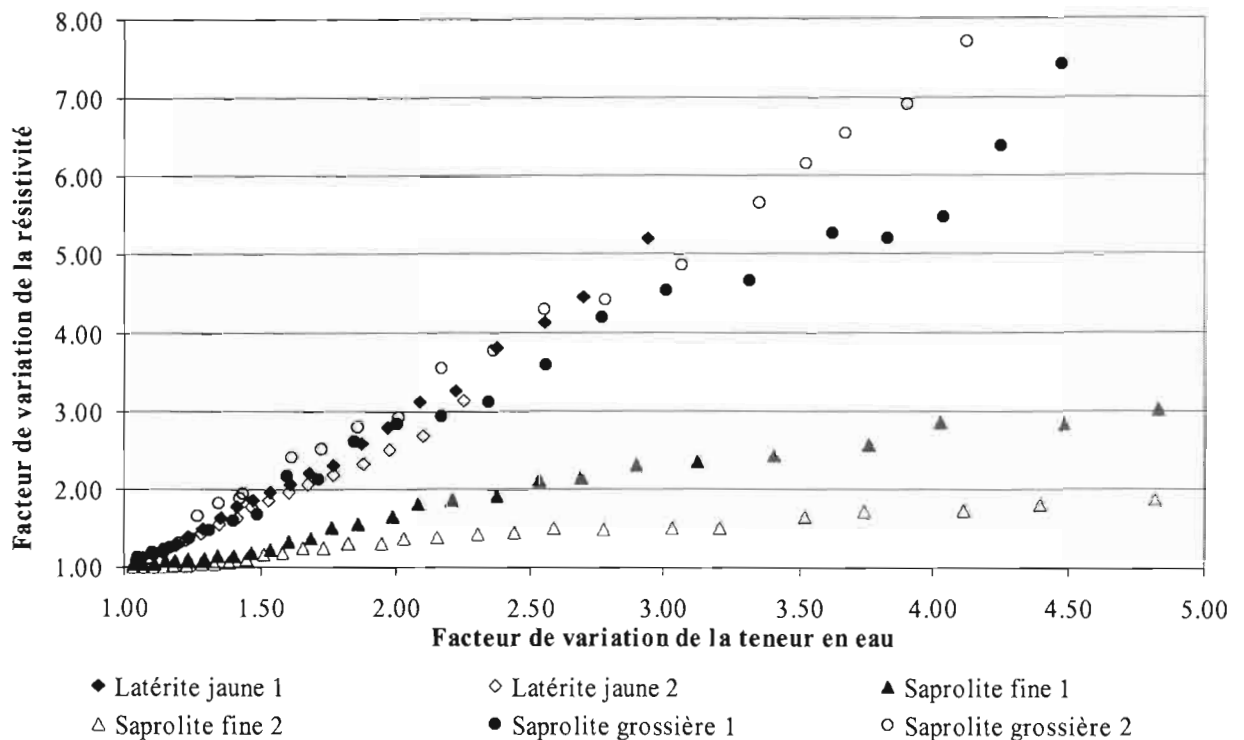


Figure 11 : Illustration des comportements des différents échantillons d'altérites par l'utilisation du facteur de variation de la résistivité ($\rho_1/\rho_2, \rho_1/\rho_3, \dots$) et du facteur de variation de la teneur en eau ($H_p2/H_p1, H_p3/H_p1, \dots$).

Cependant, les capacités d'absorption de chaque altérite se montrent différentes. En supposant que le volume d'eau maximum contenu dans chaque échantillon correspond au volume des pores, la latérite jaune et la saprolite fine présentent les plus fortes porosités avec 70 à 80%, alors que celles de la saprolite grossière atteignent 40 à 50%. Cette hypothèse semble acceptable avec les résultats de porosité obtenus par des travaux précédents (Combiér, 2002). Le facteur de porosité apparaît ainsi ne pas pouvoir être directement relié à la résistivité ; mais en rapport avec la nature de cette porosité (interconnexions des pores, ...).

Conclusion

Ces expériences ont mis en évidence les influences respectives de la teneur en eau et de la porosité sur les mesures de résistivités effectuées sur différents échantillons d'altérites.

La teneur en eau s'avère être un paramètre important sur les mesures avec une importance dépendant de l'altérite considérée. Une relation liant la résistivité électrique apparente et la teneur en eau du type $\rho = k Hp^{-b}$ a été proposée. Les coefficients k et b apparaissent dans cette étude être de bons indicateurs sur la nature des échantillons en affichant des valeurs différenciées pour chaque type d'altérite.

Des études complémentaires sur un plus grand nombre d'échantillons devront être envisagées pour permettre une validation complète de cette relation, et peut être même de définir précisément la gammes des valeurs des coefficients k et b pour chacun des faciès. Ceci pourrait permettre alors d'obtenir, à partir des mesures de résistivité effectuées sur le terrain, une idée de la teneur en eau du matériau étudié. Dans cette optique, une amélioration du protocole expérimental est à envisager afin de pouvoir effectuer les mesures automatiquement ; deux méthodes sont présentées en *Annexe 2*.

Une telle approche directe n'a pu être effectuée avec la porosité. Cependant il n'est pas exclu qu'elle intervienne sur les mesures et peut être en relation avec un autre facteur ; ceci n'a pu être établi dans cette étude par manque de données.

Des expériences supplémentaires ont été également testées en effectuant les mesures de résistivité uniquement par contact des électrodes sur les échantillons d'altérites. Certains résultats ont été obtenus par cette méthode, mais le manque de temps n'a pas permis son développement complet ; ils n'ont ainsi pas été représentés dans ce rapport. Cependant, des attentes prometteuses pourraient en être espérées.

Au vu de ces interprétations, d'autres paramètres doivent apporter leur contribution plus ou moins relative aux mesures de résistivité. Dans cette optique mais du fait du manque de temps, l'absence d'analyses chimiques effectuées sur les différents échantillons utilisés dans les expériences est à regretter. Celles-ci auraient pu permettre alors d'expliquer notamment le comportement différencié des deux échantillons de latérite jaune (Cf. *Figure 10*).

L'analyse complète de ces facteurs par géostatistique pourrait même permettre d'établir une relation entre ceux-ci et la résistivité pour chaque type d'altérite, voire les relier avec les coefficients k et b .

IV – REPRESENTATION EN 3D DU SITE "FUTURE CARRIERE DE LA ROCHE SAINE"

Dans le cadre de la campagne de prospection géophysique par tomographie électrique 2D lancée en mai 2002, plusieurs profils de résistivité ont été effectués sur le site de la "Future carrière de la Roche Saine", localisé dans le Massif de Tiébaghi. Six profils de 640 m de longueur sont ainsi obtenus (Cf. **Figure 12**). Chacun est réalisé par le regroupement des données de trois profils de 360 m avec un espacement inter-électrodes de 10 m (sauf pour le profil D, deux seulement). L'espacement entre les profils Est-Ouest est de 80 m.

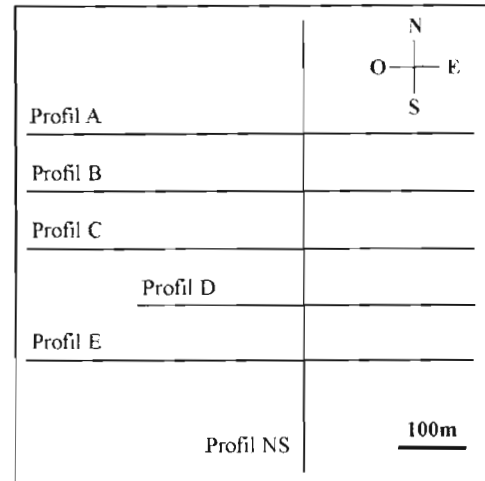


Figure 12 : Carte des profils réalisés sur le site de la "Future Carrière de la Roche Saine".

Dans le but d'obtenir une image globale des structures du site et d'en vérifier la possible continuité selon la direction structurale majeure du massif de N140, une représentation en trois dimensions est effectuée avec le logiciel Rockworks2002[©] pour la première fois (acquisition lors du stage). Ce logiciel a fait l'objet d'un rapport annexe dans le but d'une prise en main rapide pour un utilisateur non expérimenté.

Méthodologie

Les données nécessaires sont récupérées sous Res2Dinv[©] pour les différents profils en les exportant au format XYZR. Elles sont ensuite regroupées dans un même fichier Excel[©] en vue de l'importation des données sous Rockworks2002[©].

La fonction "Solid model" de ce logiciel permet de créer un modèle tridimensionnel constitué de blocs dont on définit la taille, ici 5 m pour X et Y, et 1 m pour Z (fixé par le format d'exportation de Res2Dinv[©]). La définition de l'algorithme utilisé pour la modélisation est ensuite primordiale ; l'espacement entre les profils et l'existence d'une direction structurale majeure du massif de N-140 ont conduit à choisir la méthode d'inversion "directionnelle", et dont l'importance a été fixée à moyenne. Les dimensions X et Y du modèle ont été déterminées par les coordonnées des profils A et E, auxquelles on a retranché, pour les X, les extrémités, afin d'éviter des erreurs induites par les effets de bords ; soit un "solid-model" de 440 m sur 320 m.

Dans le but de vérifier l'efficacité de l'algorithme utilisé, un autre modèle est réalisé avec une direction de N50 ; c'est-à-dire selon une direction perpendiculaire au premier

L'analyse est effectuée entre les deux modèles obtenus par la réalisation de plusieurs sections à différentes profondeurs (20 et 25 m).

Résultats

Les modèles 3D de la distribution de la résistivité obtenus sont présentés à la *Figure 13* et les différentes sections réalisées à la *Figure 14*.

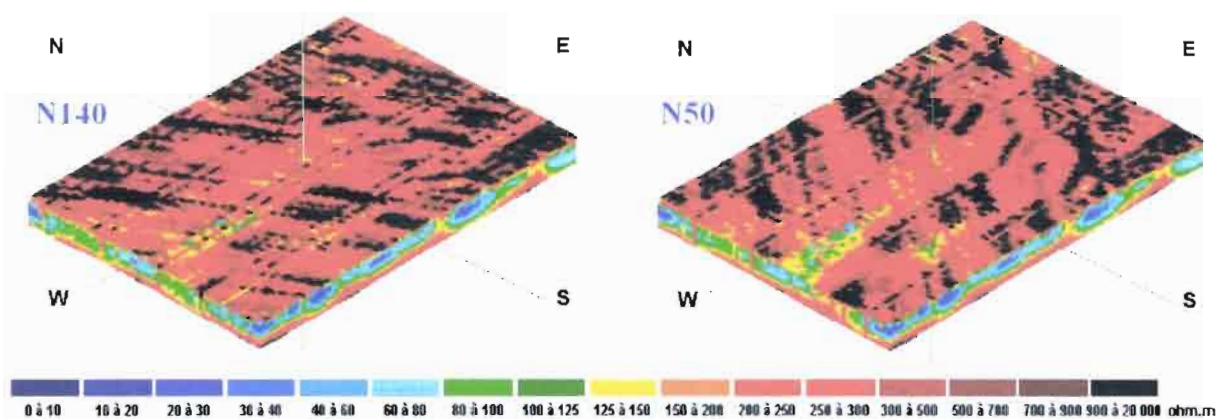


Figure 13 : Représentation des "solid-model" obtenus sous les directions N140 et N50 avec le logiciel Rockworks2002[®] et de l'échelle de résistivité correspondante.

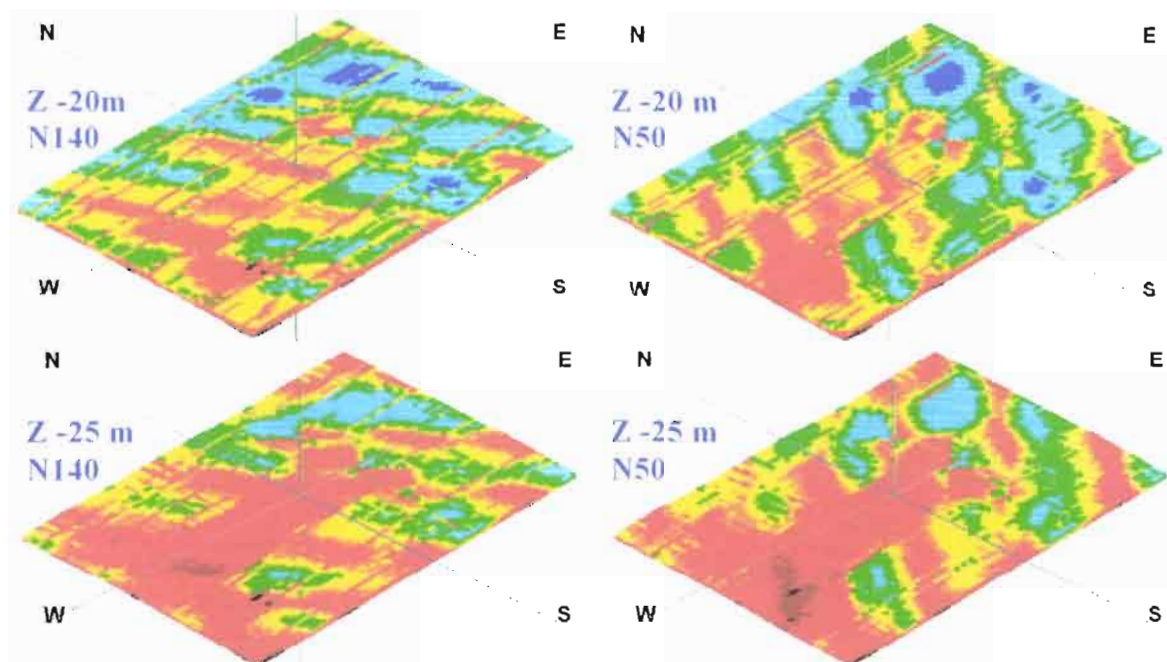


Figure 14 : Présentation des sections réalisées sur les "solid-model" à différentes profondeurs (se référer à l'échelle de résistivité de la figure précédente).

La réalisation de deux modèles, en utilisant deux directions différentes, et des sections correspondantes permet d'apprécier les limites de l'algorithme employé :

➤ les modèles obtenus font apparaître l'existence de nombreux artefacts en surface liés à la direction indiquée dans les paramètres de l'algorithme. Ce phénomène est très bien matérialisé sur le modèle N140 par l'orientation qu'affiche la cuirasse, figurée en noir (Cf. **Figure 13**) ; ce qui laisse suggérer l'existence du même phénomène pour l'ensemble des modèles.

➤ Dans le cas du modèle N140, l'algorithme utilisé ne réussit pas clairement à corréliser les profils entre eux. Ceci est bien représenté dans le cas de la section réalisée à z -20 m (Cf. **Figure 14**), où l'on peut nettement distinguer l'emplacement des profils par le contraste de résistivité affiché entre leurs valeurs (i.e. celles du fichier) et celles calculées par l'interpolation.

Conclusion :

La modélisation en trois dimensions ne permet pas de confirmer ou d'infirmer la direction N140 sur le site de la "Future carrière de la Roche Saine". L'utilisation d'une direction préférentielle dans l'algorithme est un paramètre qui affiche une trop forte influence sur les résultats et qui montre une mauvaise corrélation des profils, même en utilisant la direction N140.

Le fait de diminuer l'importance de cette direction n'a montré aucune amélioration des modèles.

Afin de pouvoir réellement confirmer cette orientation, qui apparaît existante sur ce site en comparant uniquement les différentes pseudo-sections obtenues, la réalisation de profils supplémentaires est indispensable afin d'obtenir un maillage plus fin des données.

CONCLUSION GENERALE

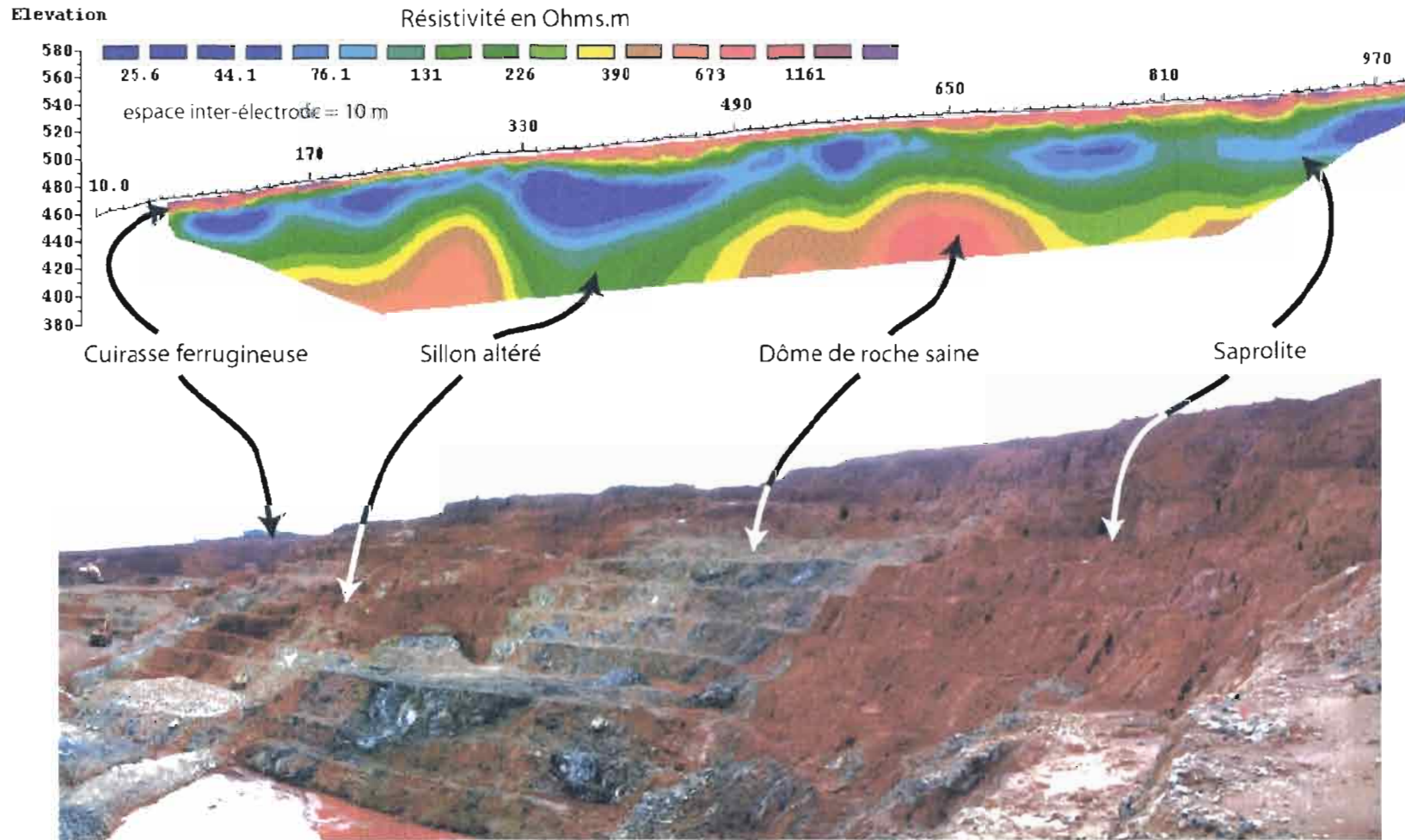
Les différentes études effectuées pendant ce stage permettent de préciser l'influence des variations de la teneur en eau et leurs origines diverses, sur les mesures de résistivité. Elles montrent également une importance différenciée de ce facteur sur ces mesures en fonction du faciès d'altération du profil latéritique considéré.

Les études comparatives réalisées entre différents profils de tomographie électrique 2D, effectués à différents moments de l'année sur un même site, précisent l'existence de variations saisonnières et mensuelles de la résistivité, dont les origines s'avèrent différentes. La teneur en eau des horizons du manteau d'altération apparaît ainsi ne pas être uniquement reliée aux volumes des précipitations mais certainement également à des circulations entre nappes. De plus, les variations de résistivité observées sont liées au moins pour une partie à la variabilité des mesures lors des acquisitions de terrain, induite par la structure et la nature des matériaux présents. L'analyse effectuée montre également le comportement différencié des variations de la résistivité suivant la structure géoélectrique du profil ; les plus importantes correspondant aux remontées de la roche saine, et les plus faibles aux approfondissements de l'ensemble d'altération sus-jacent. Il apparaît ainsi que ces différences de variations concernent la nature plus ou moins résistante des matériaux.

Ces dernières observations n'ont pu être cependant précisées que pour les altérites, par les mesures en laboratoire. Celles-ci ont permis d'établir une relation directe entre la résistivité et la teneur en eau pour les trois faciès étudiés (latérite jaune, saprolite fine et grossière), qui affichent un comportement très différencié. Cette relation a introduit deux nouveaux facteurs, qui par les résultats, sembleraient pour l'un être directement relié au degré d'altération, et pour l'autre à la nature plus ou moins résistante du matériau ; cette dernière hypothèse étant plus sujet à caution et ces résultats demanderaient un plus grand nombre de mesures pour être validés.

L'orientation générale du Massif de Tiébaghi de N140 n'a pu être vérifiée par la réalisation d'une représentation 3D du site de la "Future Carrière de la Roche Saine" ; le maillage des données étant insuffisant pour l'algorithme utilisé.

Profil de Résistivité électrique et coupe de mine sur roches Ultra-basiques en Nouvelle-Calédonie



Notes : le profil de tomographie électrique 2D a été effectué sur le site Dôme du Massif de Tiébaghi, et la photographie prise sur le site Alpha du même massif, actuellement en exploitation par la SLN.

Poster réalisé par l'UR037 de l'IRD de Nouméa, à l'occasion du Symposium sur la coopération franco-néo-zélandaise en Sciences de la Terre (2002).

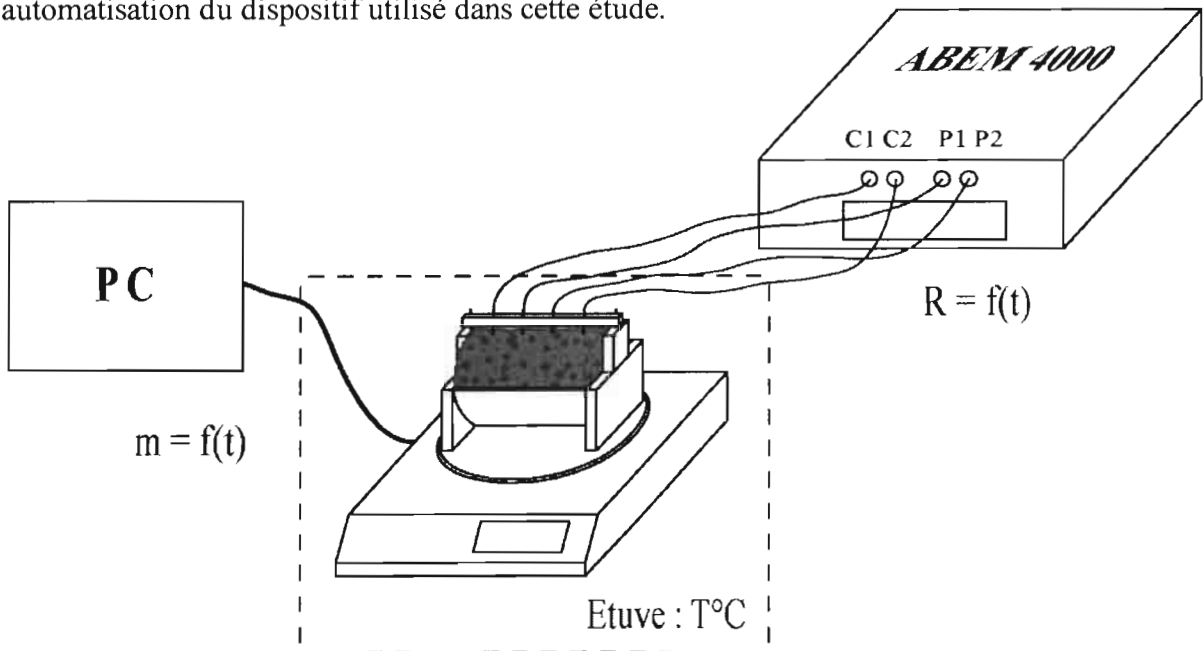
ANNEXE I

ANNEXE 2

Présentation des dispositifs expérimentaux de mesure "automatique"

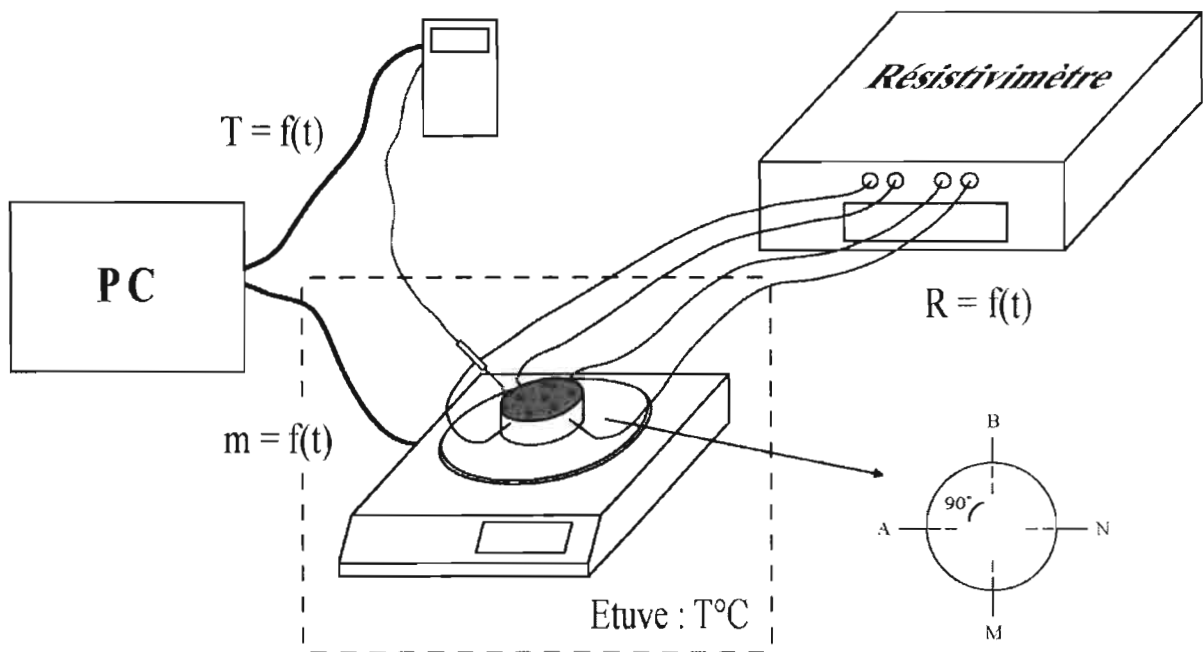
Dispositif 1 :

→ automatisation du dispositif utilisé dans cette étude.



Dispositif 2 :

→ amélioration du dispositif permettant d'effectuer des mesures de résistivité avec plus de précision et en plus grand nombre mais demandant un diamètre des échantillons plus importants, selon le modèle carré établi par Rhoades et al. (1977).



BIBLIOGRAPHIE

- A2EP, 1995. *Etude hydrogéologique préliminaire du site minier de Tiébaghi*. Rapport A2EP.
- Beauvais A., Ritz M., Parisot J.C., Dukhan M., Bantsimba C., 1999. *Analysis of poorly stratified lateritic terrains overlying a granitic bedrock in West Africa, using 2-D electrical resistivity tomography*. Earth and Planetary Science Letters, Vol. 173.
- Beauvais A., Ritz M., Parisot J.C., et Bantsimba C., 2003a. *Testing etching hypothesis in shaping granitic dome structures beneath lateritic weathering landsurfaces using ERT method*. Sous presse à Earth Surface Processes and Landforms.
- Beauvais A., Ritz M., Parisot J.C., Bantsimba C. et Dukhan M., 2003b. *Combinet ERT and GPR methods for investigating two stepped lateritic weathering systems*. Sous presse à Geoderma.
- Bottraud J.C., Rhoades J.D., 1985. *Referencing water content effects on soil electrical conductivity – salinity calibrations*. Soil Sci. Soc. Am. J., 49 : 1579-1581.
- Cluzel D., Aitchison J.C., Picard C., 2001. *Tectonic accretion and underplating of mafic terranes in the Late Eocene intraoceanic fore-arc of New Caledonia (Southwest Pacific): geodynamic implications*. Tectonophysics, 340 : 23-59.
- Combié V., 2002. *Application de la tomographie électrique à la connaissance des gisements de nickel saprolitiques du Massif de Tiébaghi, Nouvelle-Calédonie*. Rapport IRD-Ingémine.
- Eissen J.P., Crawford A.J., Cotten J., Meffre S., Bellon H., Delaune M., 1998. *Geochemistry and tectonic significance of basalts in the Poya Terrane, New Caledonia*. Tectonophysics 284, 203-219.
- Giao P.H., Chung S.G., Kim D.Y., Tanaka H., 2002. *Electrical imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits*. J. of Ap. Geoph., vol. 52 : 157-175.
- Gupta S.C., Hanks R.J., 1972. *Influence of water content on electrical conductivity of the soil*. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 36 : 855-857.
- Hardwick A., 1987. *The effects of brine composition on excess conductivity in shaly sands*. Paper presented at SPWLA 28th Annual Logging Symposium, Soc. of Prof. Well Log Anal., London, England, June 29-July 2, Paper VV.
- Meffre S., Aitchison J.C., Crawford A.J., 1996. *Geochemical stratigraphy of boninites and tholeiites from the Permo-Triassic Koh Ophiolite, New Caledonia*. Tectonics 15, 67-83.
- Paris J.P., 1981. *Géologie de la Nouvelle-Calédonie. Un essai de synthèse*. Mem. BRGM, 113, 278 pp.
- Pelletier B., 1989. *Les minerais de Nickel de Nouvelle-Calédonie*. Rapport SLN.
- Picard M., 1999. *L'archipel néo-calédonien*. Editions du Centre de Documentation Pédagogique de Nouvelle-Calédonie.

Revil A., Cathles III L.M., Losh S., Nunn J.A., 1998. *Electrical conductivity in shaly sands with geophysical applications*. J. of Geoph. Res., vol. 103, n°B10 : 23,925-23,936.

Rhoades J.D., 1975. *Measuring, mapping and monitoring field salinity and water table depths with soil resistance measurements*. FAO. Soil Bulletin 31 : 159-186.

Rhoades J.D., Raats P.A.C., Prather R.J., 1976. *Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity*. Soil Sci. Soc. Am. J., 40 : 651-655.

Rhoades J.D., Kaddah M.TM, Halvorson A.D., Prather R.J., 1977. *Establishing soil electrical conductivity calibrations using four-electrode cells containing undisturbed soil cores*. Soil Sci., 123, 3 : 137-141.

Ritz M., Parisot J.C., Diouf S., Beauvais A., Dione F., Niang M., 1999. *Electrical imaging of lateritic weathering mantles over granitic and metamorphic basement of eastern Senegal, West Africa*. J. of Ap. Geoph., Vol. 41.

Savin C., Robineau B., Monteil G., Beauvais A., Parisot J.C., Ritz M., 2002. *Electrical imaging of peridotite weathering mantles as a complementary tool for nickel ore exploration in New Caledonia*. ASEG 16th Geoph. Conf. and Exhibition.

Savin C., Combier V., Paugam A., 2002. *Tomographie Electrique 2D appliquée à la cartographie 3D de la zone "Dôme" du site de Tiébaghi*. Rapport trimestriel n°1, IRD-Ingémine.

Savin C., 2002-03. *Tomographie Electrique 2D appliquée à la cartographie 3D de la zone "Dôme" du site de Tiébaghi*. Rapports trimestriels n°2 et 3, IRD-Ingémine.

Sen P.N., Goode P.A., 1992. *Influence of temperature on electrical conductivity on shaly sands*. Geophysics, 57 : 89-96.

SLN, 1976. *Essais de prospection géophysique sur le Plateau de Tiebaghi (Nouvelle-Calédonie)*. Rapport SLN.

Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E., 1990. *Applied Geophysics, Second Edition* : 290.

Trescases J.J., 1975. *L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale. Formation des gisements nickélifères de Nouvelle-Calédonie*. Mémoire O.R.S.T.O.M. n° 78, Paris.

SOMMAIRE

| | Page |
|--|-----------|
| Résumé / Abstract..... | 01 |
| Introduction..... | 02 |
| I – PRESENTATION DE LA NOUVELLE-CALEDONIE..... | 03 |
| 1.1 CADRE GEOGRAPHIQUE DE LA NOUVELLE-CALEDONIE..... | 03 |
| 1.2 CADRE GEOLOGIQUE DE LA NOUVELLE-CALEDONIE..... | 03 |
| 1.2.1 Résumé de l’histoire géologique..... | 03 |
| 1.2.2 Cadre géodynamique actuel..... | 04 |
| 1.2.3 Les massifs ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie..... | 04 |
| 1.2.4 L’altération supergène des péridotites..... | 05 |
| 1.2.5 Causes de l’enrichissement en nickel..... | 07 |
| 1.3 PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE..... | 07 |
| II – TOMOGRAPHIE ELECTRIQUE 2D APPLIQUE AU SITE DOME..... | 08 |
| Méthodologie..... | 08 |
| Résultats..... | 09 |
| Discussion..... | 10 |
| Conclusion..... | 12 |
| III – MESURE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE SUR CAROTTES EN LABORATOIRE | 13 |
| 3.1 METHODOLOGIE ET THEORIE ELECTRIQUE..... | 13 |
| Appareillage de mesure | 13 |
| Influence de la température..... | 14 |
| Coefficient géométrique du dispositif..... | 14 |
| 3.2 MESURE ET SIGNIFICATION DE LA RESISTIVITE ELECTRIQUE DE LA ROCHE SAINNE..... | 16 |
| Résultats et discussion..... | 16 |
| Conclusion..... | 17 |
| 3.3 MESURE ET SIGNIFICATION DE LA RESISTIVITE ELECTRIQUE DES ALTERITES..... | 17 |
| Résultats et discussion..... | 18 |
| Conclusion..... | 22 |
| IV – REPRESENTATION 3D DE LA "FUTURE CARRIERE DE LA ROCHE SAINNE". | 23 |
| Méthodologie..... | 23 |
| Résultats..... | 24 |
| Conclusion..... | 25 |
| V – CONCLUSION GENERALE..... | 26 |

| | |
|---|----|
| ANNEXE 1 : " <i>Profil de Résistivité électrique et coupe de mine sur roches Ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie</i> ", Poster réalisé par l'UR037 de l'IRD de Nouméa, à l'occasion du Symposium sur la coopération franco-néo-zélandaise en Sciences de la Terre (2002)..... | 27 |
| ANNEXE 2 : Présentation des dispositifs expérimentaux de mesure "automatique"..... | 28 |
| BIBLIOGRAPHIE | 29 |

LISTE DES ILLUSTRATIONS

| | Page |
|---|------|
| Figure 1 : Cadre géodynamique actuel de la Nouvelle-Calédonie (Picard ; 1999). NC : Nouvelle-calédonie ; NZ : Nouvelle-Zélande..... | 04 |
| Figure 2 : Carte géologique simplifiée de la Nouvelle-Calédonie (Picard, 1999).... | 05 |
| Figure 3 : Profil type d'altération des péridotites (Pelletier, 1989) avec les correspondances entre le vocabulaire des mineurs et celui des altérologues..... | 06 |
| Figure 4 : Représentation des pseudo-sections du profil A-mid pour les mois d'avril et novembre 2002..... | 09 |
| Figure 5 : Variations de résistivité entre les différents profils A-mid par rapport au profil de référence du mois de novembre 2002, en ohm.m..... | 11 |
| Figure 6 : Configuration quadripôle Wenner..... | 13 |
| Figure 7 : Détermination empirique par régression linéaire du coefficient de correction de température α , sur deux échantillons de chaque niveau d'altération.. | 15 |
| Figure 8 : Dispositif expérimental appliqué aux mesures de résistance sur la roche saine..... | 16 |
| Figures 9 : Dispositif expérimental utilisé pour les mesures de résistance pendant la phase de dessiccation des échantillons d'altérites ; a : dispositif seul ; b : dispositif avec échantillon..... | 18 |
| Figure 10 : Relations entre les résistivités électriques et les teneurs en eau pondérales des différents échantillons d'altérites, mesurées au laboratoire..... | 19 |
| Figure 11 : Illustration des comportements des différents échantillons d'altérites par l'utilisation du facteur de variation de la résistivité (ρ_1/ρ_2 , ρ_1/ρ_3 , ...) et du facteur de variation de la teneur en eau (H_{p2}/H_{p1} , H_{p3}/H_{p1} , ...)..... | 21 |
| Figure 12 : Carte des profils réalisés sur le site de la "Future Carrière de la Roche Saine"..... | 23 |
| Figure 13 : Représentation des "solid-model" obtenus sous les directions N140 et N50 avec le logiciel Rockworks2002 [®] et de l'échelle de résistivité correspondante. | 24 |
| Figure 14 : Présentation des sections réalisées sur les "solid-model" à différentes profondeurs (se référer à l'échelle de résistivité de la figure précédente)..... | 24 |
| Tableau 1 : Composition chimique des altérites (Pelletier, 1989)..... | 07 |
| Tableau 2 : Total des précipitations (en mm) du Massif de Tiébaghi les dix jours précédents la réalisation de chaque profil A-mid..... | 09 |
| Tableau 3 : Détermination de la constante du dispositif K' à partir de solutions de KCl de conductivités électriques connues, pour une cellule cylindrique de 10 cm de longueur et de 4.7 cm de diamètre ; valeur moyenne de $K' = 0.066m$ | 14 |
| Tableau 4 : Valeurs des résistivités électriques obtenues sur les différents faciès d'altérites avec la teneur en eau correspondante et les valeurs des coefficients a, b et R^2 des courbes de régression obtenues..... | 20 |