

**ulp**

U.F.R. DES SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE  
INSTITUT DE GEOLOGIE  
STRASBOURG

**THESE**

présentée à  
L'UNIVERSITE LOUIS PASTEUR

pour obtenir le titre de  
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE LOUIS PASTEUR DE STRASBOURG  
mention : géologie/géophysique

par

Eric Delaître

"ETUDE DES LATERITES DU SUD-MALI  
PAR LA METHODE DU SONDRAGE ELECTRIQUE"

Soutenue publiquement le 14 octobre 1993 devant la commission d'examen :

MM.	Jacques DUBOIS, Jacques LUCAS,	rapporteur externe rapporteur interne et président du jury
	Van Ngoc PHAM, Claude ROQUIN, Yves TARDY, Jean-Jacques TRESCASES,	directeur de thèse membre invité directeur de thèse rapporteur externe

## REMERCIEMENTS

Durant ces quelques dernières années, chaque étape de ma recherche fut aidée et guidée par un certain nombre de personnes que je voudrais ici remercier. Si par mégarde, j'avais oublié quelques noms, j'espère qu'il m'en sera fait excuse.

Je remercie tout d'abord Monsieur Yves Tardy, Professeur à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, qui a été l'initiateur de ce travail en me proposant un sujet d'étude sur les latérites et le sondage électrique, et qui m'a donc permis de découvrir une partie de l'Afrique au cours de cinq mois de terrain inoubliables. C'est grâce à la confiance qu'il m'a toujours accordée que j'ai pu mener à bien ce travail.

Je remercie également Monsieur Van Ngoc Pham, Directeur de Recherche au C.N.R.S. à l'Institut de Physique du Globe de Paris, non seulement pour m'avoir initié au sondage électrique, mais aussi pour m'avoir accueilli pendant plus de deux ans dans son laboratoire à l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie à Vandoeuvre. De lui j'ai appris toute la minutie qu'il convenait d'avoir sur le terrain pour obtenir les meilleures mesures possibles. Il a été un co-directeur de thèse plein de compétence et toujours disponible pour la moindre petite question. J'espère que dans un proche avenir nous aurons de nouvelles missions communes.

Je remercie bien-sûr Messieurs Jacques Lucas, Professeur à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, Jacques Dubois, Physicien du Globe à l'Institut de Physique du Globe de Paris, et Jean-Jacques Trescases, Professeur à l'Université de Poitiers, d'avoir porté de l'intérêt à mon travail en le jugeant et en participant à mon jury. Ce fut un honneur et un plaisir d'avoir Monsieur Jacques Lucas comme président du Jury.

Merci à Claude Roquin qui a aussi bien voulu faire partie du jury. C'est grâce à lui que ce mémoire a pu voir le jour, car c'est sans aucun ménagement qu'il s'est plongé dans l'"électrique" lors des derniers mois de rédaction au Centre de Géochimie de la Surface à Strasbourg. J'ai pu apprécier sa compétence à travers ses critiques sobres mais justes, ainsi que son ouverture d'esprit lors de nos nombreuses conversations scientifiques.

Concernant le temps passé sur le terrain, je n'oublierais pas :

- Jean-Claude Pion de l'ORSTOM, qui m'a accompagné durant le premier mois de mesures à Banankoro en janvier 1988. Sa bonne humeur et son enthousiasme ont été communicatifs et c'est sans doute grâce à lui que j'ai aussi bien supporté la poussière, les coups de soleil et les mout-mout.

- André Novikoff de l'ORSTOM, que j'ai côtoyé presque quotidiennement lors de la seconde mission en 1989. Sans son aide matérielle conséquente en fin de campagne, je n'aurais pas pu finir la prise des données. J'ai eu beaucoup de plaisir à partager mon bureau avec lui lors de son retour à Strasbourg, avant "ses grandes vacances". Merci à France, sa femme, pour son accueil chaleureux et familial, lors mes passages à Bamako.

- Philippe Freyssinet du BRGM, dont j'ai suivi les traces sur le plateau de Banankoro et dans la vallée du Kokoyon. Grâce à lui, toute l'équipe a pu bénéficier d'un camp de base "trois étoiles". Sa disponibilité et son écoute à mon égard lui valent toute ma gratitude.

- Emmanuel Théra de la Direction Nationale de la Géologie et des Mines du Mali, qui a été mon compagnon de terrain durant de nombreuses semaines et qui, bien que malien, a partagé le même exil. Il a été un allié précieux qui ne s'est pas ménagé aussi bien lors de la prise des mesures que lors des nombreuses crevaisons.

- Toute l'équipe "des rois de l'électrique" de Banankoro, avec qui j'ai eu le plaisir de travailler à chaque mission, et en particulier Sériba Kamissoukro, Youssouf, Issa Fané, Fakanda Magassouba et Laciné Kéïta. Leur bonne humeur quotidienne a été un véritable réconfort. Grâce à eux j'ai goûté certains mystères de l'Afrique.

- Alain Bourdeau de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs du Mali, qui m'a entraîné sur son terrain et fait découvrir le formidable paysage bauxitique des Monts Mandingues. Merci à lui et à Angelina, sa femme, pour leur accueil à Bamako.

Lors de mon long séjour à l'E.N.S.G. à Vandoeuvre, j'ai trouvé une ambiance de travail cosmopolite et très amicale : Hocine Aoudjit, Jamal Asfahani, Danièle Boyer et Samuel Ngakégni y ont sans aucun doute été pour beaucoup.

Je tiens également à remercier Monsieur Yves Albouy de l'ORSTOM pour l'intérêt qu'il a toujours porté à mon travail. Les quelques séances de travail que nous avons eues ensemble à Bondy m'ont toujours été des plus profitables et des plus encourageantes.

Etant un ancien de Strasbourg, je dois dire maintenant à de très nombreuses personnes de l'Institut de Géologie et du Centre de Géochimie de la Surface combien, grâce à elles, j'ai aimé le temps passé au numéro 1 de la rue Blessig :

- Hélène Paquet et Jean Luc Probst, en m'accueillant dans leur groupe de recherches après mon séjour à l'E.N.S.G. de Vandoeuvre, ont mis à ma disposition tous les moyens nécessaires à la rédaction de ce travail. Je les en remercie. Tout le monde connaît la gentillesse légendaire d'Hélène, et je voudrais juste témoigner de son soutien efficace dans les moments les moins faciles.

- Bertrand Fritz, Alain Clément, Betty Kieffer, Hannelore Sutter, Marie-Thérèse Stehlé, M.-T. Buntz, Nathalie Kayser, Jean-Louis Hazemann et Nathalie, Valérie Daux, Mireille Del Nero et Dan, Catherine Bertrand, Pierre Anschutz, Jean-Christophe Muller, Philippe Amiotte-Suchet et Catherine, Mohamed Ben Baccar, Anne Probst, Joëlle Duplay, Hervé Yésou, Benoit Madé et Marguerite, Pascale Déjardin, Danièle Zill, Boubi et Mireille, Hubert Whitechurch, Anne-Marie Karpoff, Frédéric Vitali, Philippe Blanc, Frédéric Pflanz, Jean-Michel Nafziger, René Boutin, Régis Bros, Lucia Maria Mafra Valença, Antônio Fernando de Souza Queiroz, Benoit Momboisse et Mickaële, Renard-Roger N'Kounkou, Didier Orange, Abderrahmene El Gh'mari, Khadija Semhi, Theophilos Toulkeridis, Naoko Kozaka, Horst Zwingmann, Sylvie Furlan, Isabelle Bourasseau, Marie-Camille Adloff, Fadila Gueddari, Christine Mosser, Jane Salomon, Marie-Jo Soncini, Jean-Luc Schneider, Laurent Eisenlohr, Carlos Alberto Simoes Alves, Thierry Advocat, Christian Fischer, Christopher Swezey, Ould Ahmed Benan C., Jean-Loup Boeglin, Max Deynoux forment la cohorte des amis-collègues-collaborateurs qu'ils soient de passage ou permanents, anciens ou nouveaux. Il a toujours été agréable et enrichissant de partager avec eux un moment, que ce soit au cours d'une pause café, sur un problème de logiciel informatique, aux pots de thèse, pour des renseignements administratifs ou bibliographiques, sur le chemin de la cantine, ..., et bien-sûr lors de conversations scientifiques.

- Laurent Richard, Claude Hammecker, Jean-Pierre Sizun, Pascal Podwojewski, Wolfgang Ludwig ont été en plus des compagnons noctambules épatants, toujours prêts à me rendre le moindre petit ou grand service, en particulier dans les derniers instants qui précèdent la sortie de l'exemplaire final. Merci beaucoup à eux cinq.

Roberto et Nicole Rosiello, Marcelle et Jacques Bena, Lydie et Pierrot Gaillard, Etienne Dubus, Alain Suzi et Marie Behr, qui gravitent hors de la sphère universitaire, ont su être des proches, même s'ils se posent certainement encore aujourd'hui des questions sur "le thésard : cet être énigmatique".

Pour finir je tiens encore à remercier ma famille :

- Sylvain et Catherine, Claude et Nicole, Jean-Marc et Martine, Yves et Nathalie, Philippe, Soizig, Gaby et Germaine, et Claude pour les nombreuses marques d'affections qu'ils m'ont témoignées.

- Mes parents, à qui je dois tout, pour leur soutien inflexible. Ils ont fait ce que je suis. Qu'ils sachent tout l'amour que je leur porte.

- Maroline, ma femme, pour les sacrifices que je lui ai imposés et qu'elle a bien voulu accepter. Ces pages sont aussi les siennes. Elle est mon soleil d'Afrique. Merci encore à elle pour Robin et Anouk, qui sont ses deux plus beaux rayons, et qui me provoquent chaque jour les brûlures les plus douces.

## INTRODUCTION

Les latérites sont des formations superficielles qui se développent à l'interface lithosphère-atmosphère-hydrosphère-biosphère, et qui sont caractéristiques des zones intertropicales, où elles prennent une importance considérable tant par leur épaisseur, que par leur étendue. Dans un processus d'enfoncement général du paysage par altération, les latérites résultent de l'enrichissement relatif des éléments les moins solubles tels que le fer et l'aluminium, qui se concentrent progressivement jusqu'au sommet du profil d'altération pour finalement former des horizons indurés comme les cuirasses ferrugineuses ou les bauxites. Malgré une certaine homogénéité dans leurs compositions chimiques et minéralogiques, elles présentent des textures et des faciès très variés qui sont les témoins non seulement du substratum dont elles dérivent mais surtout de leur degré d'évolution et de leur âge car elles sont le produit des processus d'altération, de pédogenèse et d'érosion qui ont corrodé et décapé les vieux continents. Si elles portent l'empreinte des climats actuels, elles gardent aussi la trace des paléoclimats qui se sont succédés depuis plus de 100 millions d'années.

Les latérites ont été l'objet de nombreux travaux de la part des géologues, des pédologues, des géographes et des géomorphologues. Le but de ce travail est d'étudier, par la méthode géophysique du sondage électrique, l'organisation et les variations d'épaisseur des différents horizons du profil d'altération à l'échelle du paysage, en relation avec la morphologie de la surface et la nature du substratum. Dans un secteur où la couverture latéritique est épaisse (> 50m), cette méthode permet de décomposer le profil d'altération en une superposition de couches horizontales, caractérisée chacune par une épaisseur et une résistivité. Cette étude fait suite à des travaux de caractérisations minéralogiques et géochimiques de surface, à grande et à petite échelle, et le long d'une toposéquence (MAZALTARIM, 1989 ; FREYSSINET, 1990). Elle a été réalisée en complément des résultats obtenus par des sondages magnéto-telluriques (PHAM *et al.*, 1988 et 1989), sur lesquels elle s'appuie, car elle permet une analyse plus détaillée des horizons d'altération du profil latéritique.

Le premier chapitre présente le secteur d'étude situé dans la région de Kangaba au Mali, en bordure de la plaine du Niger et aux pieds des Monts Mandingues. L'étude est centrée sur le plateau de Banankoro et ses vallées adjacentes. On y distingue deux types de substratum : granitique à l'Ouest et schisteux à l'Est. Ce chapitre donne aussi un bref rappel sur les latérites.

Le deuxième chapitre décrit la méthode du sondage électrique, et son application au milieu latéritique, en précisant le mode opératoire utilisé sur le terrain avec une revue bibliographique sur les travaux antérieurs de géophysique déjà effectués sur des profils latéritiques.

Le troisième chapitre présente les courbes "brutes" de résistivité apparente. Elles reflètent les propriétés géoélectriques du profil d'altération, correspondant à différentes situations morphologiques dans le paysage, depuis l'axe des vallées jusqu'aux sommets du plateau. Elles sont aussi comparées à celles obtenues dans d'autres régions en Afrique.

Le quatrième chapitre traite des résultats de l'interprétation des courbes par modèle tabulaire. Huit niveaux géoélectriques sont identifiés, et leurs variations d'épaisseur sont analysées en fonction de la nature de la roche-mère et surtout de la morphologie du paysage, ce qui permet de mieux comprendre la dynamique des processus d'altération et d'érosion qui ont façonné le paysage sur ce secteur d'étude.



# CHAPITRE I

## CADRE NATUREL

Le secteur du plateau de Banankoro est situé en Afrique de l'Ouest, au bord de la plaine du Niger (rive gauche), plus précisément dans la partie sud-ouest du Mali, juste à proximité de la frontière guinéenne (Figure 1). Il fait partie de la région administrative du cercle de Kangaba. Il s'étend sur 50 km<sup>2</sup> environ, entre les latitudes 11° 40' N et 11° 43' N et les longitudes 8° 42' W et 8° 49' W.

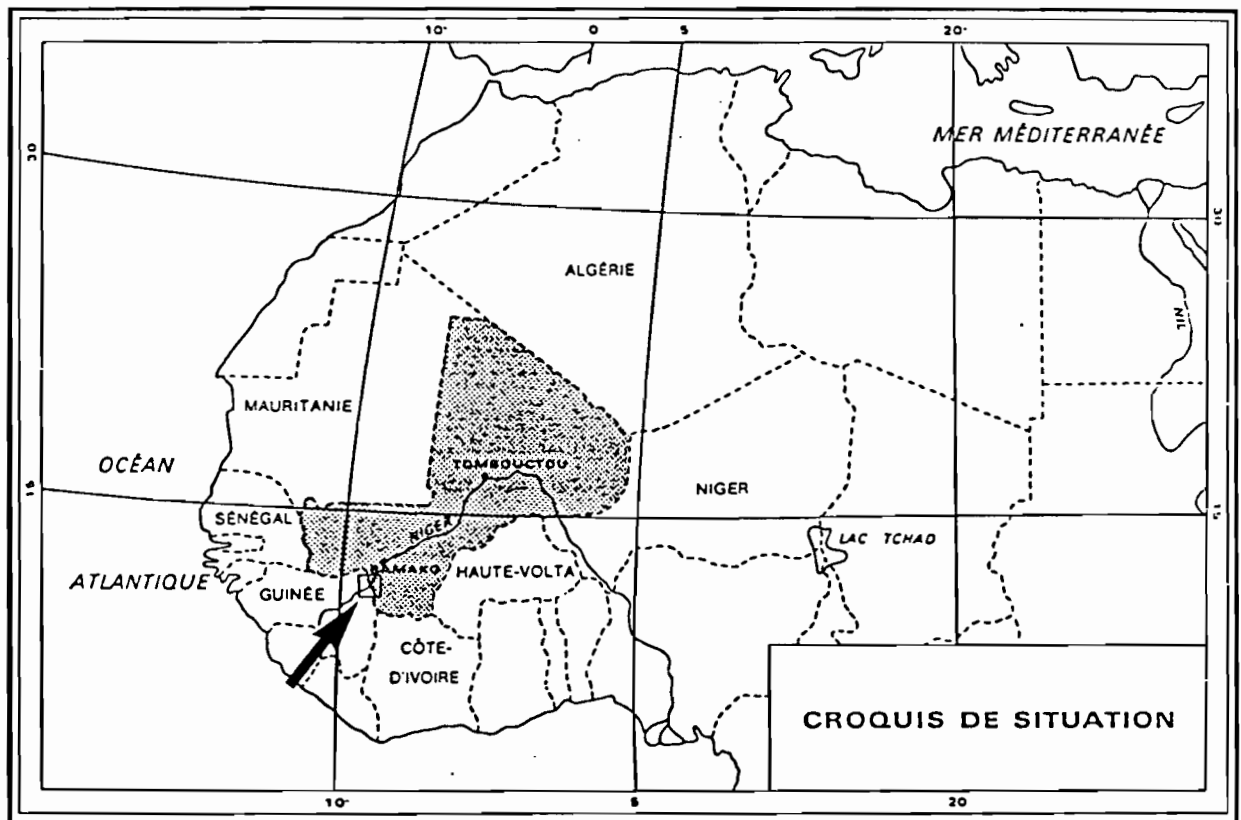


Figure 1 : Plan de situation du secteur d'étude.

### I. CADRE CLIMATIQUE

Les données sur le cadre climatique proviennent de l'atlas "Jeune Afrique. Mali" (KAMATE, 1980), de la monographie hydrologique sur le Niger supérieur (BRUNET-MORET *et al.*, 1986) et de la thèse de D. ORANGE (1990).

Le climat actuel de l'Afrique occidentale est soumis aux mouvements des masses d'air tropical et équatorial : le déplacement de la zone du front intertropical (FIT) règle la répartition des pluies sous la forme d'une alternance entre une saison sèche et une saison humide. De décembre à février, sous la poussée de l'anticyclone continental boréal sur le Sahara, le FIT occupe sa position la plus méridionale, en-dessous de 8° de latitude nord (Figure 2), et de juillet à septembre, poussé par l'anticyclone équatorial de Sainte Hélène, sa position la plus septentrionale, proche de 21° de latitude nord. Le régime pluviométrique est donc lié à deux grands types de circulation aérienne : la première, qui est appelée Harmattan, est un alizé continental, chaud et sec, qui souffle en hiver du N-E vers le S-W ; la seconde, qui peut être appelée Mousson, est un alizé maritime, chaud et humide, qui souffle en été du S-W vers le N-E.

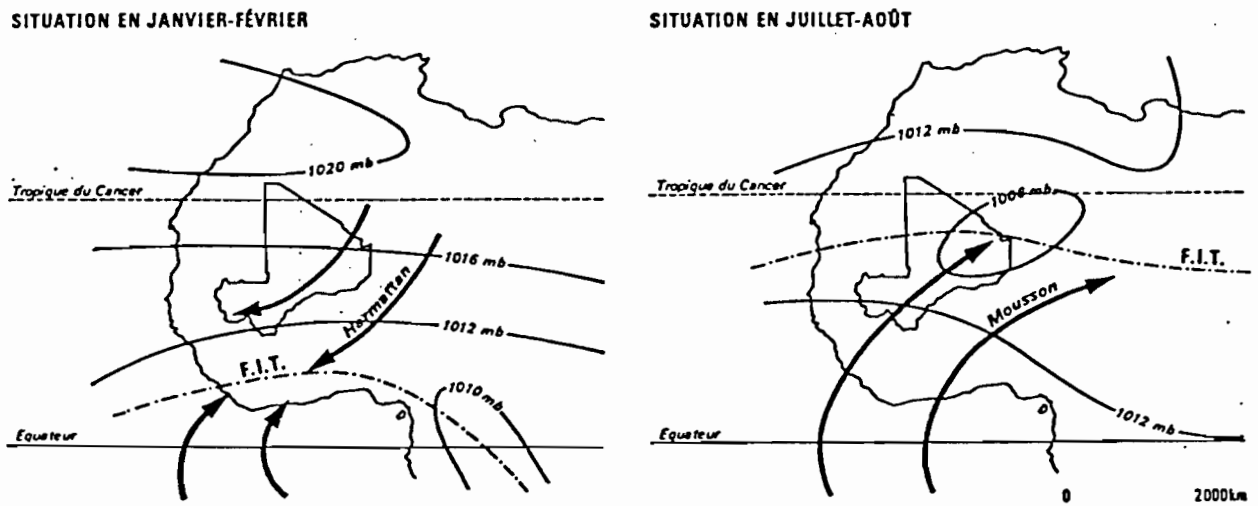


Figure 2 : Mouvements du front intertropical (FIT), d'après KAMATE 1980.

### A. Pluviométrie et température

Dans la région de Banankoro, les précipitations se distribuent de la manière suivante (Figure 3):

- En hiver, pendant la saison sèche qui dure de décembre à mars, les seules éventuelles précipitations, qui sont communément appelées "pluies des mangues", ont une origine extratropicale.
- L'arrivée du FIT a lieu en avril, mais les précipitations restent rares et éparées. Le degré hygrométrique du sol devient élevé et il se produit des tornades sèches mais très peu d'averses.
- De mai à août, l'épaisseur du coin d'air de la Mousson augmente, provoquant d'abord une première série de grains, les premières tornades. Quand l'épaisseur du coin atteint 2000m, il se produit des séries de tornades courtes, violentes et localisées. Lorsque l'épaisseur est maximale, la masse d'air donne lieu à des pluies continues, moins intenses et sur plusieurs heures, que l'on peut qualifier de "pluies de Mousson". La saison des pluies est aussi appelée "hivernage".
- De septembre à octobre, quand le FIT regagne des latitudes plus faibles, les précipitations se raréfient.
- D'octobre à avril, la saison sèche d'hiver revient avec l'Harmattan qui souffle en permanence du N-E, et ses brumes sèches dues aux poussières arrachées aux régions sahariennes.

Le climat local correspond à une zone de transition entre le domaine sud-soudanien et le domaine nord-soudanien (LEROUX, 1980). Le premier est caractérisé par des précipitations comprises entre 1500 et 1000mm/an, une température supérieure à 27°C, une humidité relative supérieure à 50% et une saison des pluies qui dure de six à huit mois ; le second par des précipitations comprises entre 1000 et 500mm/an, une température supérieure à 27°C, une humidité relative inférieure à 50% et une saison des pluies qui dure de quatre à six mois.

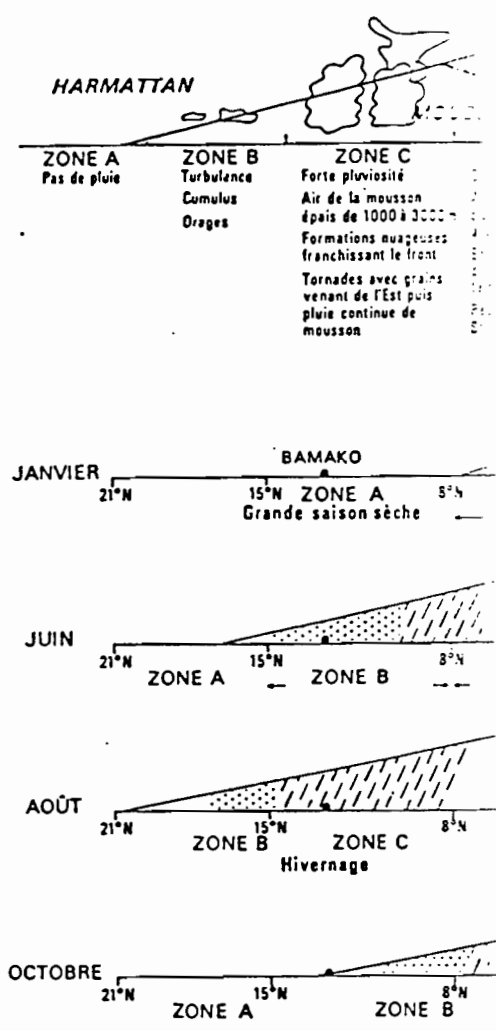


Figure 3 : Zones de type de temps associées au FIT et leur balance : l'année, d'après KAMATE (1980).

La pluviosité moyenne annuelle qui est de 1000mm à Bamako, augmente pour atteindre 1500mm à Kankan en Guinée : elle est de 1125mm à Kankan. Les pluies tend également à s'étaler vers le Sud : elle passe de cinq mois à sept mois à Kankan.

Les variations des températures mensuelles s'étalent entre 22°C en décembre-janvier et en août, et deux maxima en début et en fin de saison des pluies (Figure 4). Le minimum de décembre-janvier (22°C) correspond à l'effet d'hiver de l'air du nord.

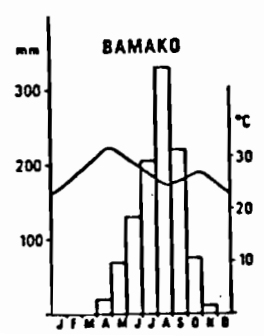


Figure 4 : Précipitations et températures moyennes mensuelles pour la station de Bamako, d'après KAMATE (1980).

ivement vers le Sud créée de la saison des pluies sept mois à Kankan.

ec deux minima en pluies (Figure 4). Le nord.

moyenne mensuelle, KAMATE (1980).



L'écart diurne est considérable : 33°C le jour, 17,5°C la nuit. Les températures croissent ensuite jusqu'en avril pour atteindre 32°C. En mai, l'humidité dans l'air et les premières pluies provoquent un léger abaissement de la température. La saison des pluies s'installe, les températures continuent de baisser et passent par un minimum proche de 24°C en août, de même que l'amplitude diurne. En octobre et novembre, les pluies ont cessé, la température augmente et passe par un maximum secondaire voisin de 28°C, avant de s'abaisser vers le minimum de décembre-janvier.

### B. Hygrométrie

L'humidité relative est faible en janvier pendant la saison sèche, elle varie entre 20 et 30%. L'amélioration hygrométrique précède la saison des pluies, annonçant la remontée vers le Nord des masses d'air équatorial maritime. Le maximum d'humidité relative se situe pendant le mois le plus humide, en août, avec une teneur supérieure à 80%.

L'évapotranspiration moyenne annuelle est de 1700mm à Bamako. Elle est maximum en fin de saison sèche, en mars, avec 7mm/j en moyenne sur le mois. Elle est minimum au milieu de la saison des pluies, en août, avec 2,5mm/j.

Le déficit hydrique est relativement bien marqué sur l'année : précipitations inférieures à 1300mm et évapotranspiration de l'ordre de 1700mm.

### C. Conclusion

La pluviosité, les températures et l'évapotranspiration, qui sont élevées, varient peu d'une année sur l'autre, exception faite de l'accident climatique du début des années soixantaine-dix pour la première. C'est l'irrégularité de la répartition annuelle et mensuelle des précipitations, et l'hétérogénéité de leur distribution spatiale qui constituent les paramètres essentiels du climat. Le contraste entre la saison des pluies et la saison sèche se marque sur l'ensemble des traits du paysage.

## II. CADRE GEOLOGIQUE

Les roches qui composent le substratum du secteur de Banankoro font partie du socle du craton Ouest Africain (Figure 5), et sont d'âge Précambrien C (2300-1900Ma), encore appelé Protérozoïque inférieur ou Birrimien.

### A. Le Birrimien en Afrique de l'Ouest

Les données sur le Birrimien présentées ici proviennent de la notice de la carte géologique à 1/1 500 000 de la république du Mali (BASSOT *et al.*, 1981). La synthèse proposée par ces auteurs fait référence aux travaux de CHUDEAU (1910), PEREBASKINE (1932), LEGOUX (1939), ROQUES (1948 et 1951), FURON (1960), BASSOT (1966) et CARRERE (1975). Il convient d'ajouter les travaux de BONHOMME (1962), BLACK (1967) et BESSOLES (1977).

Le Birrimien a été défini dans la vallée de la rivière Birrim au Ghana, vers les années 1920. C'est dans le domaine Baoulé-Mossi de la dorsale de Léo que se situe l'essentiel de ces formations, où elles sont les plus complètes et les plus variées. Elles affleurent souvent sous forme de sillons étroits, de quelques dizaines de kilomètres de large sur parfois plusieurs centaines de kilomètres de long ; mais elles peuvent aussi se présenter en bassins étendus. Elles sont séparées par des zones granitisées ou migmatitisées, qui peuvent correspondre soit à un socle anté-birrimien, soit à des manifestations granitiques appartenant à l'orogénie birrimienne. Les séries se déposent après l'orogénie shamvienne (2500-2800Ma), et sont formées de roches volcaniques et sédimentaires.

Le Birrimien semble se rapprocher de ce que l'on observe dans les massifs du domaine hercynien ou

des Svécofennides, les termes extrêmes étant soit des fosses profondes où le volcanisme est bien exprimé, soit des bassins peu profonds où le volcanisme est rare ou absent.

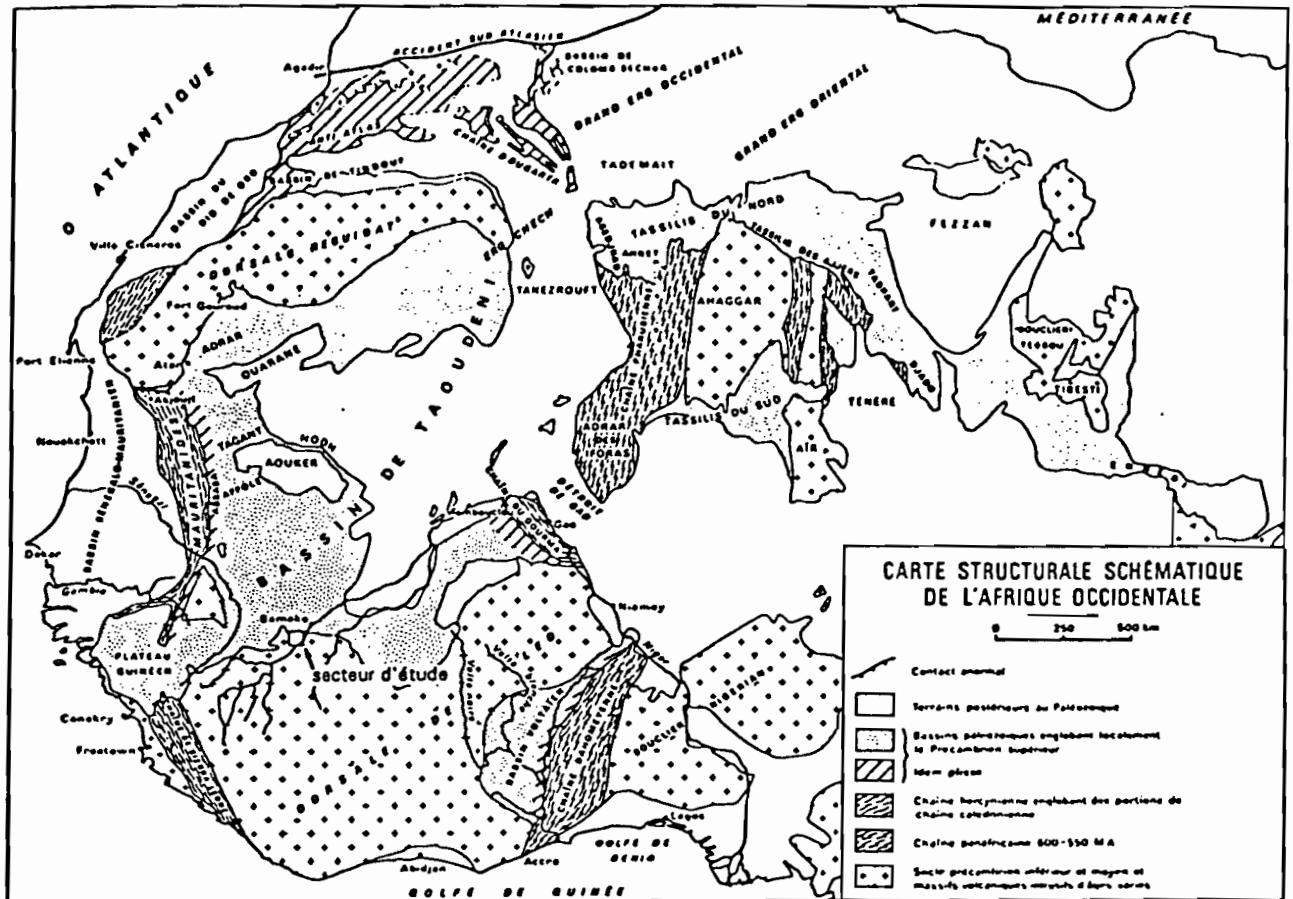


Figure 5 : Localisation du secteur d'étude sur la carte schématique des grandes unités structurales de l'Afrique de l'Ouest, d'après TROMPETTE (1973).

De plus, le Birrimien a été l'objet de granitisations importantes sous des formes différentes :

- des granites et des granitoïdes orientés, provenant de la palingénèse d'un vieux socle anté-birrimien ;
- des granites orientés en massifs subconcordants, à muscovite ou à deux micas, mis en place durant l'orogénie birrimienne ;
- des granites et des granitoïdes en massifs discordants, post-tectoniques.

En Côte-d'Ivoire, les formations birrimiennes et les granitoïdes qui les ont injectées, ont fait l'objet de nombreuses datations, la géochronologie qui en résulte est la suivante :

- 2300Ma : début de la mise en place du volcanisme basal des unités birrimiennes ;
- 2100-1950Ma : phase tectono-métamorphique majeure de l'orogénie birrimienne (appelée souvent éburnéen), avec mise en place des grands massifs syntectoniques granodioritiques ou granitiques ;
- 1900-1650Ma : mise en place des roches magmatiques post-tectoniques à tendance alcaline.

Mais l'organisation générale des séries est modifiée par des synthèses récentes (MILESI *et al.*, 1989), qui définissent deux ensembles superposés bien distincts :

- un ensemble inférieur à dominante volcano-sédimentaire, affecté par deux déformations synmétamorphiques, avec une schistosité nettement déversée, et constitué par des méta-argilites, des grès et des sédiments clastiques ;
- un ensemble supérieur qui n'a subi que la seconde phase de déformation, et qui est discordant sur l'ensemble inférieur. Il est caractérisé par l'importance et la diversité du volcanisme sous-marin, et la présence de complexes détritiques de type cône deltaïque continental, intercalés dans les séries volcaniques.

## B. Les formations birrimiennes de la région de Banankoro

Le substratum de la région de Banankoro est rattaché à la vaste unité birrimienne du bassin de Siguiri-Kankan (environ 40000km<sup>2</sup>), qui s'étend vers le S-W en Guinée (Figure 6). Mais il existe aussi, juste à proximité mais vers l'Est, dans la région de Bougouni, d'autres unités birrimiennes différentes.

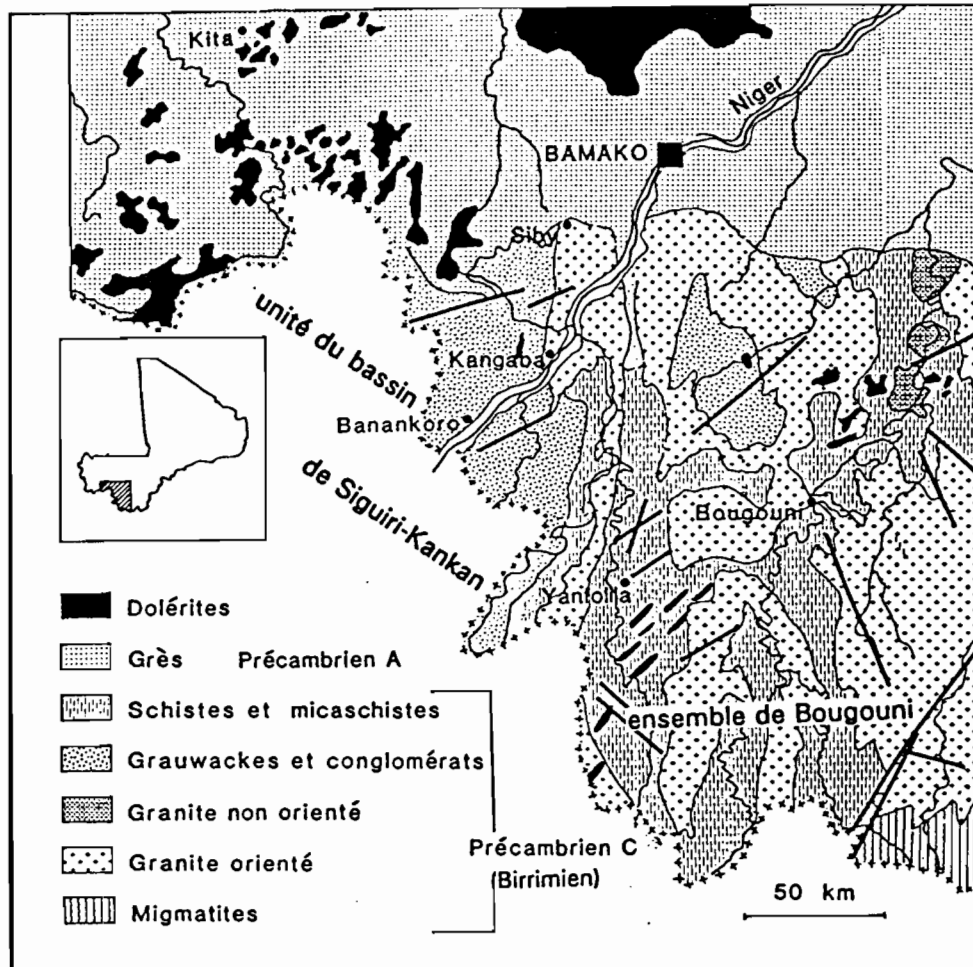


Figure 6 : Carte géologique schématique du sud-Ouest du Mali, d'après BASSOT et al. (1981).

### 1. L'unité birrimienne de Siguiri-Kankan

Les travaux de référence qui concernent l'unité de Siguiri-Kankan sont ceux de GOLOUBINOW (1936, 1938 et 1950b) et de GOLOUBINOW et NICKLES (1946). Le bassin est un ensemble volcanique et volcano-sédimentaire, plissé, diversement métamorphisé et granité. GOLOUBINOW a distingué des faciès peu métamorphiques et des roches métamorphiques :

- les premiers comprennent des roches vertes (gabbros, dolérites, andésites) souvent profondément saussuritisées et ouralitisées, des schistes divers, des schistes arkosiques, des arkoses, des schistes et des quartzites charbonneux, et des tourmalinites ;
- les secondes sont représentées par des micaschistes abondants (à biotites, à grenats, arkosiques, à biotite et muscovite), des paragneiss à biotite, des cornéennes, des para-amphibolites, des quartzites et des cipolins.

De plus, il existe un réseau filonien de quartz important, qui a souvent un aspect carrié caractéristique, et qui est parfois aurifère.

GOLOUBINOW a constaté que certains granites sont intrusifs dans les formations métamorphiques décrites ci-dessus : elles montrent alors en général des traces de schistosité et d'écrasement, et se présentent en lambeaux ou donnent au contact du granite des formes injectées, ce qui est le cas en particulier des micaschistes.

Bien qu'aucune discordance n'ait été observée, les formations birrimiennes se sont certainement déposées sur un substratum formé de roches diverses plus anciennes, en partie granitisées mais qui peuvent subsister sous forme de lambeaux. Les roches du bassin ont été affectées par un métamorphisme régional d'intensité variable, le plus souvent épizonal, pouvant parfois localement atteindre la mésozone. Les terrains sont plissés et généralement redressés à la verticale. Les directions tectoniques sont sensiblement N-S dans la partie ouest et nord de l'unité, elles s'infléchissent vers l'E-SE dans le sud du bassin.

Sur la carte géologique à 1/500 000 de Bougouni Ouest (GOLOUBINOW, 1947), le secteur du plateau de Banankoro se situe surtout sur des micaschistes et en partie vers le N-W sur des schistes divers.

## 2. L'ensemble birrimien de Bougouni

La région de Bougouni forme une ride granitisée plus ou moins tectonique, qui limite l'extension de l'unité de Siguiri-Kankan vers l'Est. Les principaux travaux de référence sont ceux de GOLOUBINOW (1947 et 1950a), SPINDLER (1952 et 1962), COUTURE (1968), BUCHSTEIN *et al.* (1973) et BUCHSTEIN *et al.* (1974).

L'ensemble birrimien de la région de Bougouni est composé de trois unités d'allongement N-S, qui se prolongent en Guinée ou en Côte-d'Ivoire, et qui sont séparées par des rides granitisées plus ou moins étroites : celle de la Bagoë à l'Est, celle de Bougouni-Keikoro au centre et celle de Yanfolila à l'Ouest. Les faciès volcano-sédimentaires sont bien caractérisés, et sont quelquefois en liaison avec des jaspes. Les séries sont formées par des schistes et des grauwackes, qui peuvent passer latéralement à des tufs et même des roches effusives. Par endroit le faciès grauwacke tendrait à passer à des arkoses. On peut observer très localement des gabbros et péridopyroxénites plus ou moins serpentinisés. L'unité de la Bagoë formerait un vaste synclinorium, d'après son prolongement en Côte-d'Ivoire.

La région de Banankoro aurait beaucoup d'affinité, au point de vue lithologique, avec la partie nord de l'unité de Yanfolila, par leur faciès de flysch dominant.

Dans ce secteur, de nombreux types de granites sont liés au Birrimien :

- les grosses masses granitiques séparant les différentes unités sont hétérogènes (diorites à amphiboles, diorites quartziques, granites riches en biotite). Leur origine pourrait être anatectique, ils représenteraient la paléogénèse d'anciens granitoïdes anté-birrimiens.
  - à l'intérieur de ces masses granitiques ou en masses allongées dans les formations birrimiennes, peuvent s'individualiser des granites orientés plus homogènes (à deux micas ou à muscovite).
  - il existe des granitoïdes en massifs discordants, de taille réduite, à texture équante, mais assez hétérogènes (monzonites, diorites, granites calco-alcalins, ...).
- Chacun de ces divers granites est accompagné d'un cortège filonien complexe de microgranites, aplites, kersantites. Il peut apparaître dans ces granitoïdes des zones de dislocation importantes de direction N-S et NNE-SSW.

D'après les synthèses récentes (MILESI *et al.*, 1989), le secteur de Banankoro est localisé dans un ensemble sédimentaire du Birrimien inférieur caractérisé par deux déformations. Il est essentiellement composé de méta-argilites et grauwackes schisteux. Les pierres volantes, récoltées en surface dans la région, sont des granites, des schistes, des tufs et des grauwackes (FREYSSINET, 1990).

Il convient de rappeler que dans cette région la couverture latéritique est très épaisse, et ne permet que peu d'observations. Il en résulte beaucoup d'incertitude, rendant difficile toute interprétation.

### 3. La limite nord du Birrimien

Vers le Nord, les formations birrimiennes sont recouvertes par les séries sédimentaires du Précambrien A de la bordure sud du bassin de Taoudenit. Les séries de base sont essentiellement gréseuses, typiquement épicontinentales, à sédimentation irrégulière, stratification oblique et ripple marks. Cette sédimentation détritique a plusieurs centaines de mètres de puissance, ce qui tend à prouver par rapport aux autres régions du bassin qu'elle a été alimentée en permanence par un continent émergé au Sud, qui a été érodé activement sur une longue période.

Au Mali occidental, les séries du Précambrien A ont été traversées par des dolérites sous forme soit de filons peu puissants (1 à 20m), soit de sills de puissance variable (0,5 à 200m) et concordants avec les strates. Ce sont des dolérites tholéitiques continentales typiques, témoins de la marge orientale de l'Atlantique central qui naissait au Jurassique. Il y aurait une période privilégiée de mise en place entre le Permien et le Jurassique.

## III. LA MORPHOLOGIE DU PAYSAGE

Les modelés du Mali se caractérisent par leur platitude et leur monotonie. Les reliefs sont surtout tabulaires et se terminent parfois par de grandes falaises (MICHEL, 1980). La région de Banankoro est un bas pays de collines et de plaines, situé au pied des hauts plateaux des monts Mandingues. Le réseau hydrographique fait partie du bassin versant du Niger supérieur.

### A. Le bas pays

Le bas pays est formé par des buttes ou des collines tabulaires, dont les altitudes sont comprises entre 350 et 500m, des plaines aux sommets des reliefs. Ce modelé tabulaire est caractéristique des régions de socle précambrien couvertes par les cuirasses ferrugineuses. GOLOUBINOW (1936) donne la description suivante de cette région : "le pays est une vaste pénélaine à peine ondulée..., avec le modelé tabulaire particulier aux pays latéritiques (bowé, buttes-témoins, vallées larges à fonds plats, limitées par les versants abrupts des bowé)". OBERMULLER (1941) dit de la partie guinéenne qu'elle est formée par "de vastes étendues latéritiques à peine ondulées, (et qui) ne sont interrompues qu'accidentellement par de petits inselbergs de granite caractéristiques".

Vers le N-E, en descendant le Niger, ces ondulations s'aplanissent au fur et à mesure que l'on quitte le socle et que l'on traverse les grès friables du Précambrien vers Bamako, puis les grès argileux du Continental Terminal vers Ségou.

### B. Les hauts plateaux

Les hauts plateaux des monts Mandingues (600 à 800m d'altitude) sont formés par les épaisses couches de grès durs du Précambrien A, et ils sont souvent coiffés par des formations bauxitiques. Leur relief est très morcelé. L'altitude diminue assez régulièrement vers le N-E, vers le bassin de Taoudenit. Par contre vers le Sud, ces hauts plateaux se dressent au-dessus du bassin du Niger par une grande cuesta (Figure 7), d'une hauteur de 300m environ, identique à celle de la Tambaoura qui domine la plaine de la Falémé, plus à l'Ouest. Cette falaise s'est formée par érosion différentielle entre les grès durs du Précambrien et leurs sills doléritiques armés de cuirasses bauxitiques d'une part, et les roches tendres du socle et les grès friables du Précambrien d'autre part (MICHEL, 1980).

### C. Le bassin du Niger

Le réseau hydrographique qui draine le rebord sud des monts Mandingues et le bas pays de la région de Banankoro, fait partie du bassin du Niger supérieur ; seul un secteur situé juste au pied du plateau de Famansa rejoint le Sénégal (Figure 8).

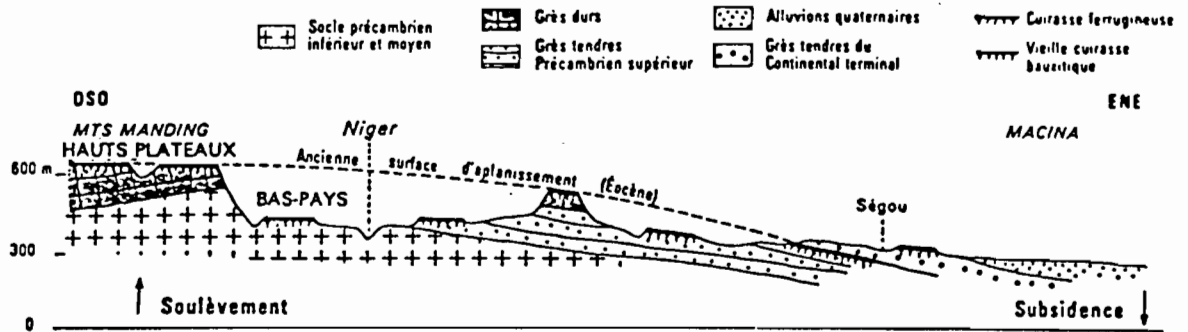


Figure 7 : Le modelé du Mali occidental, d'après MICHEL (1980).

Le Niger est le grand fleuve de l'Afrique de l'Ouest, avec ses 4200km de long dont 1700 au Mali. Il draine un bassin de 1 500 000km<sup>2</sup>, depuis sa source sur le revers nord du Fouta Djallon en Guinée, à 800m d'altitude, jusqu'à son delta au Nigéria au bord du golfe de Guinée, en prenant l'aspect d'une véritable mer intérieure entre Ségou et Tombouctou (le delta intérieur).

Ce n'est que depuis le Quaternaire, que le fleuve suit son cours aval actuel (REICHEL, 1960, 1962a et b ; TRICART, 1965). Avant il ne passait pas le seuil de Tossaye, en amont de Bourem : il allait se jeter dans les zones déprimées du bassin de Taoudénit (Hodh et Azaouad) par des diffluentés situés plus à l'Ouest que le delta actuel, en formant déjà une vaste cuvette. La surface d'évaporation créée par une telle cuvette suffisait largement pour absorber les débits provenant des massifs de Guinée (BRUNET-MORET *et al.*, 1986). C'est à la suite de mouvements d'ensablement par le Nord, et d'une montée du niveau des eaux dans la cuvette, que le Niger a commencé à se déverser par le seuil de Tossaye, en rejoignant la vallée du Tilemsi. Le delta intérieur a alors migré lentement vers l'Est, en s'éloignant de son ancienne position.

#### D. La région de Banankoro

Le secteur de Banankoro fait partie des premiers reliefs qui bordent la plaine du Niger, en rive gauche. A Banankoro, les berges du fleuve sont cotées à 340m. A cet endroit, la plaine n'est large que de quelques kilomètres, en prenant comme limite d'extension la courbe de niveau 360m. Sur la rive droite, le lit du fleuve n'est distant des premières collines que de quelques centaines de mètres, alors que de l'autre côté, une zone inondable favorable à la culture du riz s'étend sur trois à quatre kilomètres.

L'extension du bassin du Niger est très réduite en rive droite. Depuis Siguiri en Guinée, il n'y a plus de branche principale qui conflue, seuls quelques petits marigots, à sec six à neuf mois par an, viennent alimenter le cours du fleuve. La limite de partage des eaux entre le bassin du Sénégal et celui du Niger passe à moins de trente kilomètres au Nord (Figure 8).

Les vallées sont à fond plat. D'amont en aval, la pente est faible : la courbe de niveau 360m pénètre profondément sur plusieurs kilomètres, voir plusieurs dizaines de kilomètres entre les buttes tabulaires qui forment le relief.

Dans certaines parties, les vallées sont étroites (< 1km), et ont une largeur relativement constante sur des portions assez rectilignes. Leurs versants sont abrupts et gagnent rapidement le rebord des buttes vers 400m d'altitude. Ces dernières sont aussi étroites et plutôt allongées. C'est le cas du secteur de Banankoro. Mais dans d'autres parties, vers l'Est ou le Nord par exemple, les vallées ont une largeur beaucoup plus variable, de moins de 1km à plus de 2km. Elles sont ramifiées, et leurs versants sont moins pentus. Les buttes sont moins tabulaires. L'aspect du paysage est alors nettement plus ondulé.

Sur une coupe réalisée du Sud au Nord, c'est-à-dire de la plaine du Niger jusqu'au plateau de Famansa dans les monts Mandingues, on distingue d'abord une première série de buttes tabulaires dont les altitudes dépassent presque systématiquement les 400m, avec les vallées principales aux environs de 360m (Figure 8). La ligne de partage des eaux entre le Sénégal et le Niger passe par ces buttes. On



observe ensuite plus au Nord, à partir du village de Kourémalé, une seconde série de buttes dont les altitudes n'atteignent plus 400m, mais seulement 360m, et les vallées principales sont à environ 320m. Juste avant la falaise des monts Mandingues, on remarque la large vallée du Balanko, comparable aux dépressions annulaires qui existent au pied des inselbergs. Dans cette région, le Niger coule donc à une altitude nettement supérieure à celle du réseau hydrographique amont du Sénégal. A l'échelle des temps géologiques, cette dénivelée, ajoutée à l'étroitesse du bassin de la rive gauche du Niger, annonce sans doute la capture prochaine du Niger par le Sénégal.

## E. Le secteur d'étude

Le secteur d'étude est centré sur une butte tabulaire allongée, dit plateau de Banankoro, située juste à l'Ouest du village de Tombola, en bordure de la route nationale Bamako-Siguiri par la plaine du Niger.

### 1. Le plateau de Banankoro

L'altitude du plateau est en moyenne supérieure à 380m. Elle tend à augmenter d'Est en Ouest, pour atteindre son point culminant, le mont Koro Nidjan, à environ 470m (Figure 9). Le modelé du plateau est du type convexo-concave, faiblement ondulé. En plus du Koro Nidjan, il existe deux autres bombements topographiques sur le plateau : l'un occupe une position centrale et atteint 420m, l'autre de 415m est situé plus à l'Est. Entre ces deux sommets, les altitudes descendent en-dessous de 380m et forment un col d'allure concave : la dénivelée à cet endroit atteint donc 40m. Mais certaines parties du plateau sont monoclinales : à partir d'une certaine distance des sommets, il y a une rupture de pente et la surface devient moins pentue. C'est le cas par exemple au Sud-Est du sommet 415m entre les altitudes 380 et 360m (Figure 10), et entre le sommet central et le mont Koro Nidjan où la pente générale du plateau est en direction de la vallée du Kokoyon (Figure 9). Sur cette dernière partie, le rebord nord est très entaillé par tous les axes de drainage qui coulent à la saison des pluies sur le plateau. Les autres plateaux du secteur, la plateau de la Dinkolé au Nord et le plateau ouest, présentent des morphologies comparables.

### 2. Les vallées adjacentes

Le plateau de Banankoro est entourée par cinq vallées d'importances différentes (Figure 9) :

- Son extrémité est bordée par la plaine inondable du Niger, le fleuve même se situant à une distance de 4km environ.
- Au nord, il longe la vallée du Kokoyon, qui est un des marigots principaux de la région. Cette vallée s'étend sur plus de trente kilomètres. Sa partie amont, de direction N-S forme la frontière avec la Guinée. Puis vers l'aval, son cours s'infléchit et prend une direction E-W, avant de déboucher dans la plaine du Niger. En suivant le plateau de Banankoro, l'altitude de cette vallée reste inférieure à 360m sur 13km.
- La vallée sud est d'extension réduite, elle n'est longue que de 3km, avant d'arriver dans la plaine du Niger. Son altitude est toujours située en-dessous de 360m, sauf sa partie amont qui prend source sur le plateau de Banankoro vers 390m.
- à l'Ouest, la vallée de Guilingoué est aussi d'extension réduite, elle ne fait que 5km avant de rejoindre la plaine du Niger. Mais son altitude est pratiquement toujours supérieure à 360m.
- Au N-W, la vallée de Diourouka s'étend sur 9km, avant de confluer avec celle du Bandon, qui forme dans son cours aval la frontière avec la Guinée. La partie de cette vallée qui longe le plateau de Banankoro sur notre secteur d'étude, a une altitude toujours supérieure à 360m.

D'après l'orientation de la pente des plateaux qui bordent les vallées, on distingue deux principaux types de vallées :

- Pour le premier type, la pente générale des plateaux est orientée vers l'axe du talweg, qui s'est donc mis en place dans les zones concaves du relief (Figure 11A). Les axes de drainage des plateaux convergent vers ces vallées, et les rebords de plateau sont très découpés.
- Pour le second type, la pente générale des plateaux est divergente par rapport au talweg, dont les parties amonts forment alors des cirques (Figure 11B). Les rebords des plateaux sont plutôt rectilignes ou courbes.

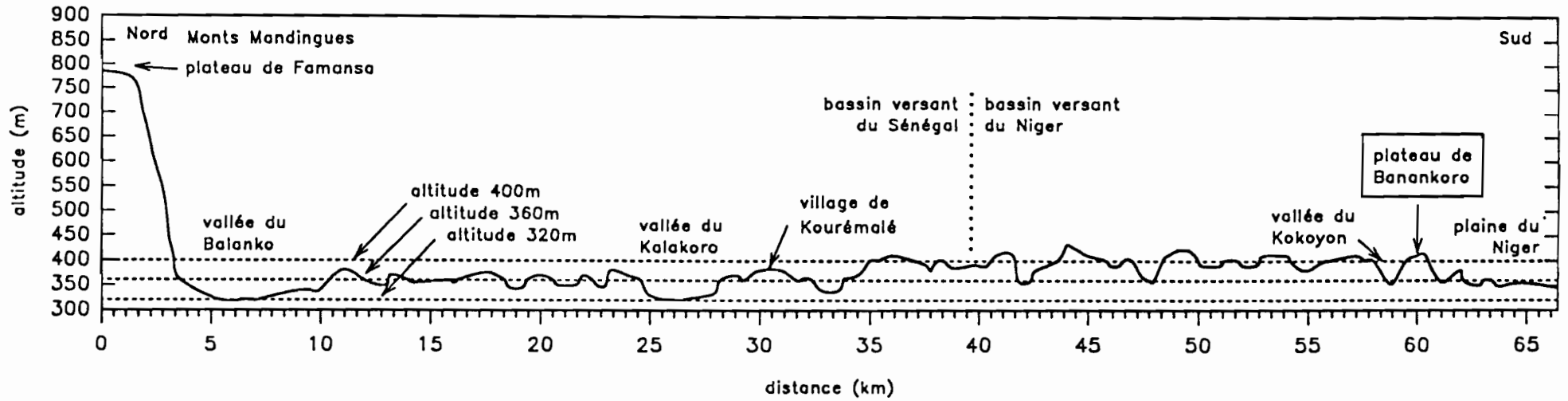


Figure 8 : Coupe topographique sud-nord, du village de Dioulafoundou dans la plaine du Niger au plateau de Famansa dans les monts Mandingues, d'après les cartes topographiques IGN à 1/200 000 de Yanfolila et de Bamako-ouest.





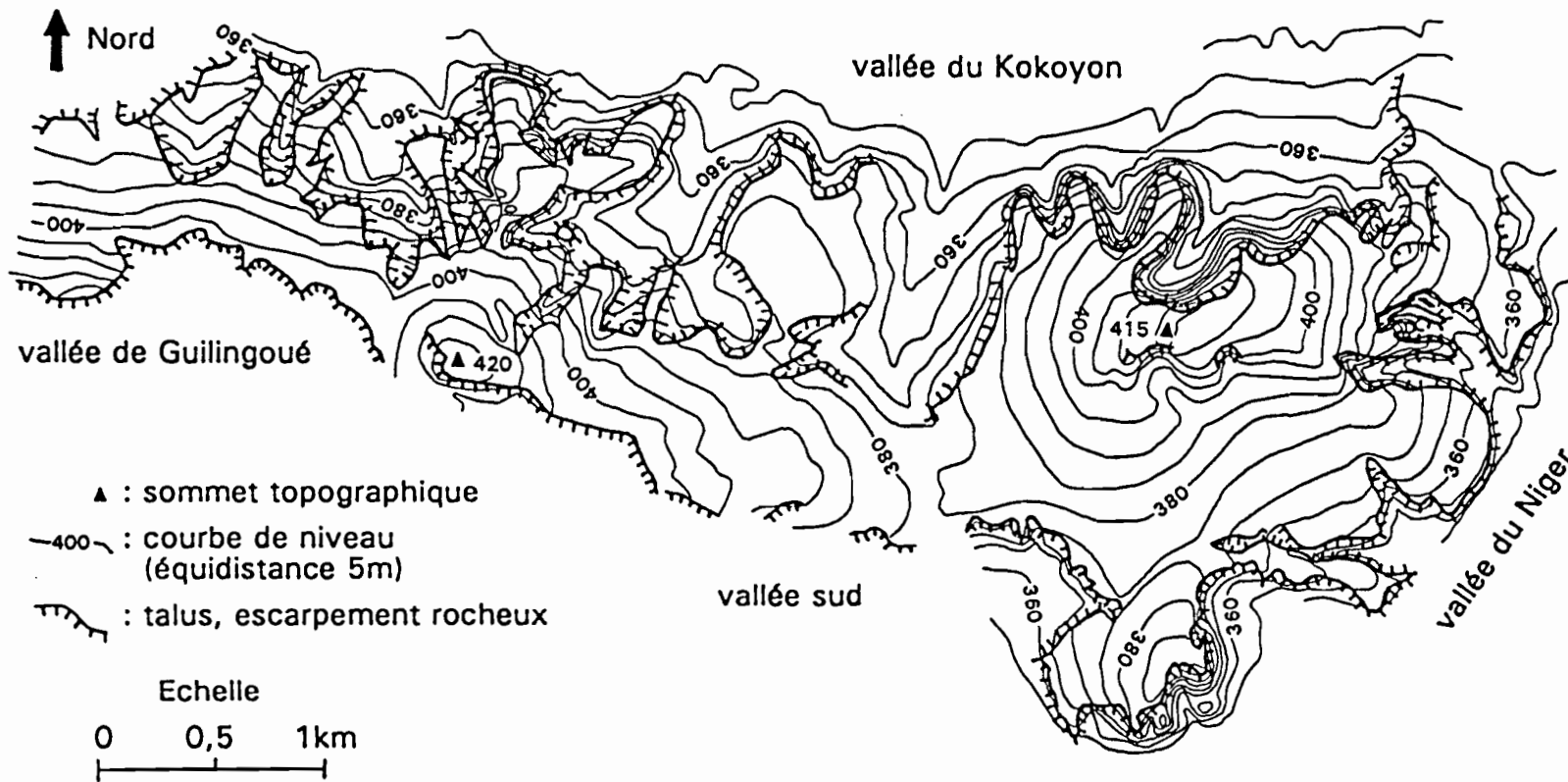


Figure 10 : Carte topographique de la partie orientale du plateau de Banankoro, d'après la carte ORSTOM levée à 1/10 000 (inédite).

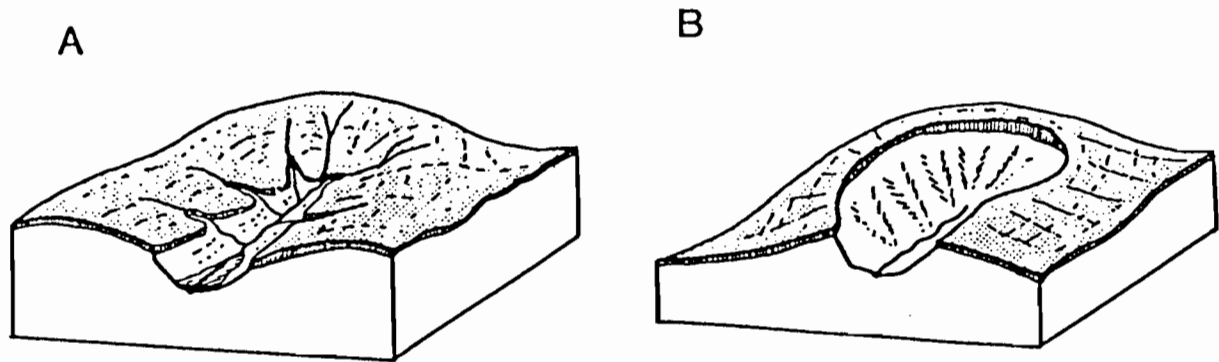


Figure 11 : Schéma des deux principaux types de vallée, d'après FREYSSINET (1990).

La vallée sud, mais surtout celle du Kokoyon sont du premier type. Les vallées ouest, de Guilingoué et de Diourouka, sont du second type.

Le réseau hydrographique secondaire est nettement plus dense dans la vallée du Kokoyon que dans les autres vallées. Il est composé par des drains rectilignes de quelques centaines de mètres à deux kilomètres au maximum. Leur orientation préférentielle ( $N15^{\circ}$ - $N30^{\circ}$ ) est sans doute calquée sur la schistosité de la roche-mère.

### 3. Les versants

Les versants qui relient les plateaux aux vallées sont généralement abrupts, ils forment de véritables talus dont les dénivelées sont presque toujours supérieures à la dizaine de mètres (Figure 10). Elles peuvent même dépasser 30m à proximité des bombements topographiques, les versants prennent alors l'allure de véritables escarpements.

Dans de rares zones, la vallée se raccorde au plateau par un glacis en pente douce, sans qu'il y est de rupture vraiment marquée. C'est le cas en rive droite du Kokoyon, à l'Ouest du sommet 415m, et à l'extrémité est du plateau.

### 4. Le cuirassement

Dans le secteur de Banankoro, les cuirasses ferrugineuses sont très étendues, en particulier sur les plateaux. Ainsi le plateau de Banankoro est presque entièrement cuirassé. La dalle ferrugineuse massive affleure directement en de nombreux endroits sur plusieurs kilomètres carrés, pour former les bowé caractéristiques de cette région. Elle forme en sommet de talus, un escarpement qui peut atteindre plusieurs mètres de haut. Mais elle peut être aussi recouverte par différents types de matériaux, soit directement issus du démantèlement superficiel de la cuirasse, en formant alors des "champs" de gravillons ferrugineux et de blocs allant jusqu'à des tailles décimétriques, soit remontés du profil latéritique par les termites, pour former des sols argilo-limoneux (FREYSSINET, 1990).

Sur le plateau, les niveaux ferrugineux indurés ne sont presque jamais entièrement décapés. Les axes de drainage ne forment que très localement, en bordure de plateau, des gouttières d'érosion étroites qui entaillent la dalle cuirassée sur plusieurs centaines de mètres de long, comme c'est le cas sur le rebord nord, au N-E du sommet 420m, et sur le rebord est vers la vallée du Niger (Figure 10). C'est sur les pentes des sommets que les traces d'érosion sont les plus fortes : il se forme des petits cirques où l'ablation peut aller jusqu'à la lithomarge. Mais en aval quand la pente diminue, l'axe de drainage perd de la puissance, il n'érode plus complètement la cuirasse, on finit même par perdre sa trace plus en aval sur le bowal. Ce cas se présente juste au Sud du sommet 415m (Figure 10). Mais d'une manière générale, le cuirassement du plateau reste très résistant à l'érosion : il arme les reliefs. C'est ce qui donne le modelé des buttes tabulaires caractéristique de cette région.

Par contre, le cuirassement dans les vallées est nettement moins répandu : les vallées principales comme celle du Kokoyon sont cuirassées, les vallées secondaires ne le sont pas (Figure 12).

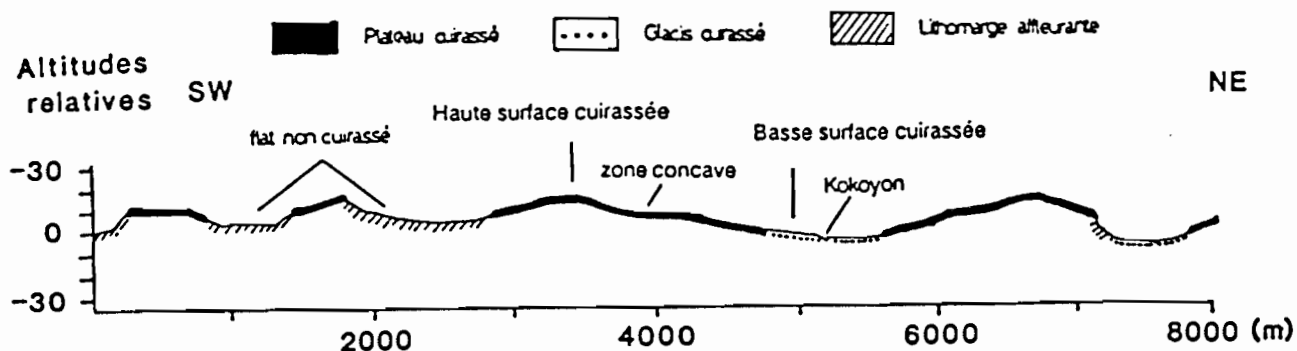


Figure 12 : Coupe topographique SW-NE, parallèle au Niger, montrant la répartition des surfaces cuirassées, d'après FREYSSINET (1990).

Dans la vallée du Kokoyon, la surface cuirassée occupe les zones de glacis qui longent le réseau hydrographique principal. La morphologie de cette surface est faiblement ondulée, les pentes n'excèdent pas 2 à 3°. La cuirasse enveloppe un modelé légèrement convexo-concave. Sur les parties les plus hautes, elle peut affleurer largement, et prendre l'allure d'un véritable bowal. Mais le plus souvent, elle est recouverte par un horizon silteux épais. Cette surface cuirassée n'est souvent entaillée que par le marigot principal, dont la profondeur du lit peut atteindre 3 à 4m. On n'observe que très rarement des gouttières d'érosion rectilignes, qui entaillent complètement cette surface jusqu'aux niveaux argileux sous-jacents. Ce cuirassement semble armer les vallées d'une manière comparable à celui des plateaux.

En général, les glacis cuirassés des vallées ne se raccordent pas à la surface cuirassée des plateaux, car les talus correspondent à la surface fonctionnelle d'érosion. Mais le recul des versants reste limité, il ne représente que quelques dizaines de mètres. Seul le versant peu pentu nord, qui relie la vallée du Kokoyon à la zone concave du plateau formant un col à 380m entre les sommets cotés 415m et 420m, donne un exemple de cuirassement continu entre les deux surfaces (Figure 10). Mais la limite du plateau se marque quand même par une marche irrégulière de plusieurs décimètres.

La convergence générale de la pente de la surface cuirassée des plateaux vers les vallées principales semble indiquer que celles-ci sont surimposées au paléoréseau existant lors de la mise en place de cette surface (FREYSSINET, 1990).

## 5. La végétation

La végétation présente à Banankoro est caractéristique du domaine soudano-guinéen, et correspond à une mosaïque de savanes et de forêts claires, qui pendant la saison sèche sont régulièrement parcourues par les feux de brousse (GRANIER, 1980). La strate arborée est constituée par : le Néré (*Parkia biglobosa*), le Kapokier (*Bombax costatum*), le Tamarinier (*Tamarindus indica*), le Caïllédrat (*Khaya senegalensis*), le Baobab ; et la strate arbustive par : *Gardena erubescens*, pour ne citer que les plus typiques.

Sur les plateaux, le cuirassement important empêche le développement de la strate arborée. Néanmoins, certaines zones sont boisées à la faveur du démantèlement de la cuirasse, auquel participe activement le système racinaire des arbres en se développant dans les diaclases. Sur le plateau de Banankoro, le couvert arboré, qui n'est jamais très élevé, est relativement important, car il gêne souvent la vue d'ensemble que l'on peut avoir d'un secteur. Les sommets sont particulièrement bien recouverts, ce qui peut constituer un indice de démantèlement. Les rares termitières cathédrales présentent sur le plateau abritent souvent une flore arbustive typique.

Sur les talus, les arbres sont nettement plus nombreux, ils couvrent pratiquement toute la surface disponible, car la cuirasse est complètement érodée. Les villageois défrichent certains endroits pour cultiver une variété de maïs.

Les vallées, même non cuirassées, ne sont pas boisées en continu. De vastes superficies de savane alternent avec les parties arborées. Les arbres sont plus hauts et mieux développés que sur les plateaux. Le long des principaux marigots pousse une galerie forestière étroite, qui maintient en place les berges abruptes.

#### IV. LES LATÉRITES

Pour présenter les latérites, les paragraphes qui suivent reprennent les grandes lignes de deux chapitres consacrés à ce sujet dans "Weathering, Soils and Paleosols" (1992) :

- Diversity and terminology of lateritic profiles par TARDY ;
- Geochemistry and evolution of lateritic landscapes par TARDY et ROQUIN.

Le terme latérite est pris dans son sens le plus large, comme le produit d'une altération intense aboutissant à la formation d'assemblages de minéraux tels que les oxy-hydroxydes de fer et d'aluminium, la kaolinite et le quartz. Il inclut donc les bauxites, les ferricrètes, les horizons tachetés, les carapaces, les cuirasses, les plinthites, les matériels à pisolites et nodules ; et il est étendu aux horizons qui font partie des sols ferrallitiques rouges ou jaunes, des sols ferrugineux tropicaux et des lithomarges kaoliniques.

##### A. Le profil d'altération latéritique

Dans les profils latéritiques "type", on distingue trois horizons majeurs (BOCQUIER *et al.*, 1984) (Figure 13) :

- 1- la zone d'altération, à la base ;
- 2- la zone à glébules, au milieu ;
- 3- la zone meuble, au sommet.

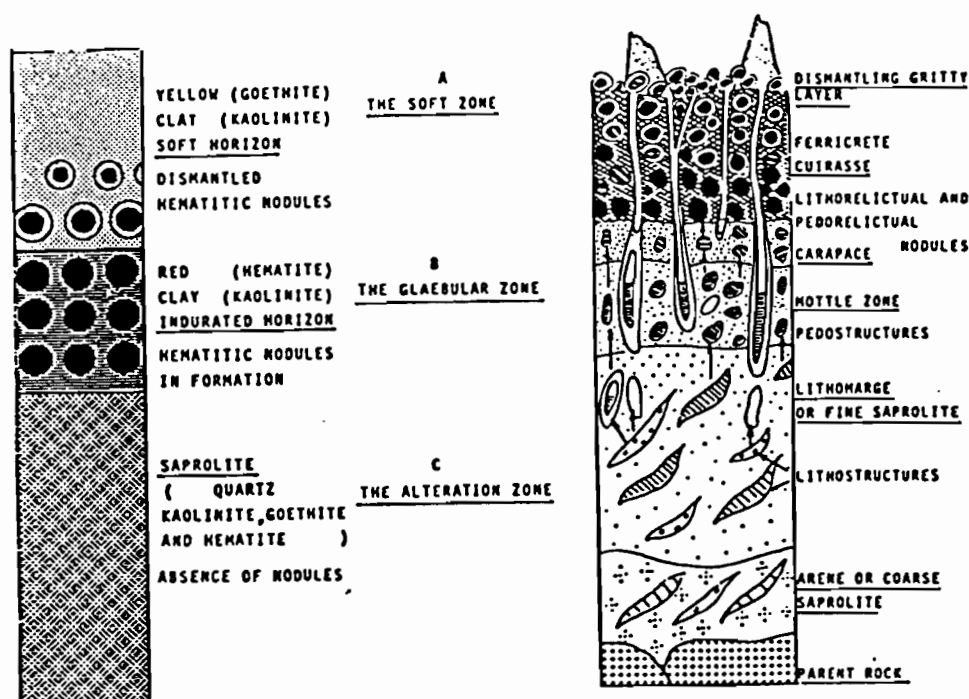


Figure 13 : Représentations schématiques d'un profil latéritique couvert par une ferricrète, d'après TARDY (1993).

## La zone d'altération

Dans la zone d'altération, les structures et les volumes de la roche-mère sont grossièrement conservés. La dissolution des minéraux primaires est essentiellement incongruente, et la plupart du matériel soluble est lessivé. Les éléments les moins mobiles comme le fer et l'aluminium, libérés par l'altération, se réorganisent presque sur place avec peu ou pas de transport. Les différents horizons de cette zone sont normalement situés dans la zone saturée de la nappe phréatique, et donc dans des conditions d'humidité permanente.

On distingue souvent deux formations :

- A la base du profil d'altération, la saprolite grossière contient de nombreux fragments de roche non altérée. Le front d'altération progresse irrégulièrement en laissant des morceaux de roches et des reliques de minéraux primaires parfois haut dans le profil. L'épaisseur est variable selon la nature de la roche, mais elle est réduite dans la zone tropicale humide, et relativement développée dans les régions arides et tempérées (TARDY, 1969 ; BOULET, 1978). Les produits de l'altération peuvent être des phases minérales seules (vermiculite, smectite, kaolinite, gibbsite, imogolite, aluminosilicates amorphes et hydratés), ou des assemblages (vermiculite-kaolinite, smectite-kaolinite, kaolinite-gibbsite).

- Au-dessus, dans la saprolite fine, encore appelée lithomarge, les structures de la roche et les volumes originels sont encore préservés (LENEUF, 1959 ; MILLOT, 1964). Les progrès de l'altération s'expriment par une augmentation de la porosité, une transformation complète ou partielle des minéraux primaires et une diminution de la cohésion de la roche (NAHON, 1986). En plus du quartz qui se dissout lentement, les espèces dominantes sont la kaolinite secondaire, et les oxy-hydroxydes de fer (goéthite, hématite et phases amorphes). Il n'y a pas de gain ou de perte importante de fer ou d'aluminium. L'épaisseur des lithomarges kaoliniques peut être importante et faire plusieurs dizaines de mètres.

Le sommet de la lithomarge peut présenter un horizon de lessivage intense à grains grossiers de quartz ou un horizon d'accumulation dans les cavités de kaolinite néoformée ou déposée, accompagnée de goéthite. Ces deux horizons sont des domaines de transition vers la zone tachetée située au-dessus.

## La zone à glébules

Sous les climats tropicaux contrastés ( $25^{\circ}\text{C} < \text{température} < 30^{\circ}\text{C}$ , pluviosité = 1500mm/an, 5 mois de saison sèche, humidité relative = 65%), le fer est généralement redistribué et concentré pour former la zone à glébules, au sein de laquelle une ferricrête peut se développer. Un profil de ferricrête "type" se compose de trois horizons majeurs : une zone tachetée, une ferricrête, et en surface un horizon de démantèlement à gravillons.

la zone tachetée se caractérise par un contraste entre des domaines blanchis et des tâches ferrugineuses. La kaolinite et le quartz forment les domaines blanchis, à cause de la déferrugination des associations kaolinite-oxy-hydroxydes de fer. Les particules de kaolinite peuvent migrer et être lessivées. Ces changements s'accompagnent d'une forte augmentation de la porosité, et des macrovides comme des tubules ou des alvéoles peuvent apparaître. L'action des termites produit une remobilisation et une remontée de matériaux fins, quartz et kaolinite, vers le haut du profil (ESCHENBRENNER, 1987). Les tâches ferrugineuses de couleur brun-rouge sont des glébules diffus et résultent d'une concentration de fer qui précipite surtout sous forme de goéthite et d'hématite avec la kaolinite. Dans deux cas distincts, les accumulations de kaolinite sont les précurseurs de la formation de nodule : dans le premier cas, ce sont les structures originelles de la roche où les minéraux primaires sont riches en aluminium et en fer qui fournissent par altération une association stable de kaolinite et d'oxy-hydroxydes de fer, on parle alors de tâches ou nodules lithorelictuels ; dans le second cas, l'accumulation de kaolinite se fait par néoformation ou dépôts dans les vides créés dans les domaines blanchis, on parle alors de tâches ou nodules pédorelictuels.

Vers le sommet du profil, la zone tachetée évolue soit vers un horizon nodulaire (AMBROSI *et al.*, 1986), soit vers une ferricrête.

Au-dessus de la zone tachetée et de l'horizon non induré à nodules se succèdent des horizons indurés variés. La carapace est un horizon intermédiaire entre la zone tachetée située en-dessous et la cuirasse

située au-dessus. Elle correspond à une accumulation progressive du fer dans les nodules. Le domaine blanchi se réduit. La cuirasse est considérablement enrichie en fer, particulièrement en hématite, et les domaines blanchis sont presque absents. La taille des vides se réduit. Les canaux peuvent se remplir de kaolinite et de quartz, qui évolueront vers des nodules pédorelictuels. De la carapace à la cuirasse, les nodules hématitiques croissent et se rejoignent : c'est le processus majeur de formation des ferricrêtes (McFARLANE, 1976). Mais dans certains cas, la matrice argileuse est en plus complètement envahi par le fer, il se forme alors une ferricrête de structure massive. Son faciès est alors dit massif et vacuolaire ; il est le plus évolué, le plus riche en fer, en hématite et en kaolinite, et le plus pauvre en quartz. Vers le sommet, un nouveau système de vide secondaire se crée. Le faciès de la ferricrête devient soit pseudo-conglomératique, soit pisolithique. Tout ces horizons font partie d'un seul système de formation et de destruction.

Au sommet du profil, un horizon à gravillons ferrugineux se développe à partir des produits de démantèlement de la ferricrête sous-jacente, en mélange avec des niveaux silteux formés par le quartz libéré par la dissolution de la ferricrête. Le fer, l'aluminium et la silice sont lixiviés depuis la surface dans les horizons érodés ; ils précipitent dans des niveaux plus profonds et participent ainsi à la reconstitution de la ferricrête en-dessous.

La zone tachetée, l'horizon nodulaire et la ferricrête se forment dans la zone non saturée, hydratée et déshydratée en fonction de la saison, dans laquelle les transferts du fer sont souvent observés.

Les bauxites qui se caractérisent par une épaisse accumulation d'aluminium résultent d'une longue altération latéritique sous des climats tropicaux humides ou équatoriaux (VALETON, 1972 ; BARDOSSY, 1982 ; LUCAS, 1989). Au-delà d'une pluviosité de 1700mm/an, s'opère le démantèlement des ferricrêtes alors que la gibbsite se forme, se développe et s'accumule.

#### La zone meuble

La zone à glébules est souvent recouverte par un horizon meuble. Sa mise en place peut avoir une origine soit sédimentaire, soit dans le démantèlement *in situ* de la ferricrête sous-jacente, soit dans les remontées par les termites de matériels issus de la zone tachetée.

En conclusion, en dépit d'une apparente homogénéité due au petit nombre de minéraux qui les composent (hématite, goethite, kaolinite, gibbsite, boehmite, quartz), les latérites présentent une grande diversité de composition minéralogique et chimique, et donc de faciès, en relation avec leur âge, leur degré d'évolution et la nature de la roche-mère dont elle dérivent.

### B. Dynamique du paysage latéritique

Les paysages latéritiques évoluent au cours du temps par la descente verticale du sol en surface et du front d'altération à la base : la surface du paysage s'abaisse. Les cuirasses ferrugineuses apparaissent donc comme des reliques autochtones lithodépendantes (WACKERMANN, 1975 ; BLOT *et al.*, 1976, 1978 ; BOULET, 1978 ; PION, 1979 ; LEPRUN, 1979 ; SCHELLMANN, 1986). Le principe de lithodépendance s'applique au volume des roches antérieurement situées au-dessus, mais qui dans la plupart des cas sont similaires à celles non altérées qui sont situées en-dessous. Pendant les processus d'altération, une homogénéisation chimique prend place et les cuirasses différentes à l'origine deviennent identiques avec le temps.

En Afrique de l'Ouest, les cuirasses ferrugineuses couvrent de larges surfaces d'âges différents. Dans le Fouta Djallon, en Guinée et au Mali, MICHEL (1973) a mis en évidence trois hautes surfaces bauxitiques d'âge Jurassique, Crétacé et Eocène, et quatre bas niveaux de cuirasses ferrugineuses : le Relief Intermédiaire (Pliocène), le Haut Glacis (Quaternaire ancien), le Moyen Glacis (Quaternaire moyen) et le Bas Glacis (Quaternaire récent). Mais les âges des quatre surfaces ferrugineuses sont certainement plus anciens : évalués par les dénivelées d'érosion ou estimés par calculs géochimiques, ils montrent qu'il faut plusieurs millions d'années pour former une cuirasse de quelques mètres surmontant une



lithomarge de quelques dizaines de mètres (LENEUF, 1959 ; TARDY, 1969, 1993 ; FRITZ, 1975 ; NAHON, 1986 ; NAHON et LAPPARTIENT, 1977 ; GAC, 1980 ; GAC et TARDY, 1980). Ainsi les âges estimés par calcul d'érosion sont du Pliocène pour le Moyen Glacis, du Miocène pour le Haut Glacis et de l'Eocène ou de l'Oligocène pour le Relief Intermédiaire (TARDY, 1993). Depuis le Jurassique, les latérites se sont donc formées plus ou moins en continu en Afrique de l'Ouest. Les bauxites ont été relayées à l'Oligocène par les cuirasses ferrugineuses. Les climats qui président à la formation des latérites ont donc changé : de tropicaux humides ou perhumides de la fin du Jurassique, ils sont devenus contrastés à partir de l'Eocène (TARDY *et al.*, 1989). Deux causes sont responsables de ce tournant climatique : le changement du climat global et le déplacement des zones climatiques accompagnant la dérive des continents.

Avant l'ouverture de l'Atlantique, les continents sont encore soudés pour former la Pangée. Les aires continentales sont vastes, et le désert couvre d'immenses surfaces. Le climat global est sec et la température est restée relativement basse depuis la dernière grande glaciation du Permien. Au milieu du Jurassique, l'Atlantique s'ouvre et la tectonique globale s'active. Les continents divisés sont plus arrosés. A la fin du Jurassique, au Crétacé et au Paléocène, le climat global est chaud et humide. Après l'Eocène les continents vont se regrouper dans l'hémisphère nord, et la tectonique globale baisse en intensité. Le climat global est froid et sec.

Par les mouvements de dérive des continents, l'Afrique de l'Ouest, tout en restant dans la zone intertropicale, est passée du Sud de la zone équatoriale au Nord (Figure 14). Ainsi tout concourt à ce que, sur plusieurs millions d'années, le climat de cette partie de bloc continental passe de l'humide à l'aride, ce qui explique dans le paysage le relais des bauxites par les cuirasses ferrugineuses (PARRISH *et al.*, 1982 ; TARDY, MELFI et VALETON, 1988 ; KOBILSEK, 1990 ; TARDY, KOBILSEK et PAQUET, 1991 ; TARDY et ROQUIN, 1992).

A l'échelle régionale, le paysage latéritique à cuirasse ferrugineuse se compose d'une multitude de plateaux cuirassés séparés par des vallées où affleurent les horizons inférieurs du profil d'altération de la zone tachetée à la roche-mère. Les surfaces des plateaux supposées appartenir au même niveau ne montrent pas les mêmes compositions minéralogiques et géochimiques, et ne présentent donc pas le même degré d'évolution (MAZALTARIM, 1989 ; BOEGLIN, 1990).

De plus, une même surface appartenant à une même unité morphologique, un plateau, apparaît très hétérogène (ROQUIN *et al.*, 1989 ; FREYSSINET, 1990). Les processus d'érosion différentielle peuvent expliquer de tels hétérogénéités.

### C. Les résultats de la géochimie et de la minéralogie obtenus à Banankoro

La région de Banankoro a fait l'objet d'une cartographie régionale de 35km sur 40km dont les résultats sont consignés dans la thèse de MAZALTARIM (1989). Deux niveaux bauxitiques sont identifiés au Nord sur le plateau de Famansa et deux principaux niveaux de cuirasses ferrugineuses sont distingués à Banankoro.

Mais c'est surtout le travail de FREYSSINET (1990) qui cerne le mieux le secteur du plateau de Banankoro. Ses principaux résultats sont les suivants :

-1- Deux surfaces cuirassées distinctes structurent la géomorphologie du paysage : la haute surface cuirassée forme de longs plateaux au modelé convexe, et elle est relayée dans les vallées par des glacis qui composent la basse surface cuirassée.

-2- La pétrographie et la géochimie d'une toposéquence a démontré l'absence de variations lithologiques à la transition entre ces deux surfaces : le relief n'est donc pas déterminé par des variations locales de lithologie, comme le suggèrent LEPRUN (1979) et PION (1979) au Burkina Faso.

-3- La présence de profils cuirassés sur des alluvions intégrés aux glacis apportent la preuve "sédimentologique" d'une évolution discontinue du cuirassement. L'entaille du profil d'altération dans les dépressions permet d'expliquer la différence d'épaisseur de profil entre les deux surfaces cuirassées, mise en évidence par des études de magnéto-tellurique (PHAM *et al.*, 1988).



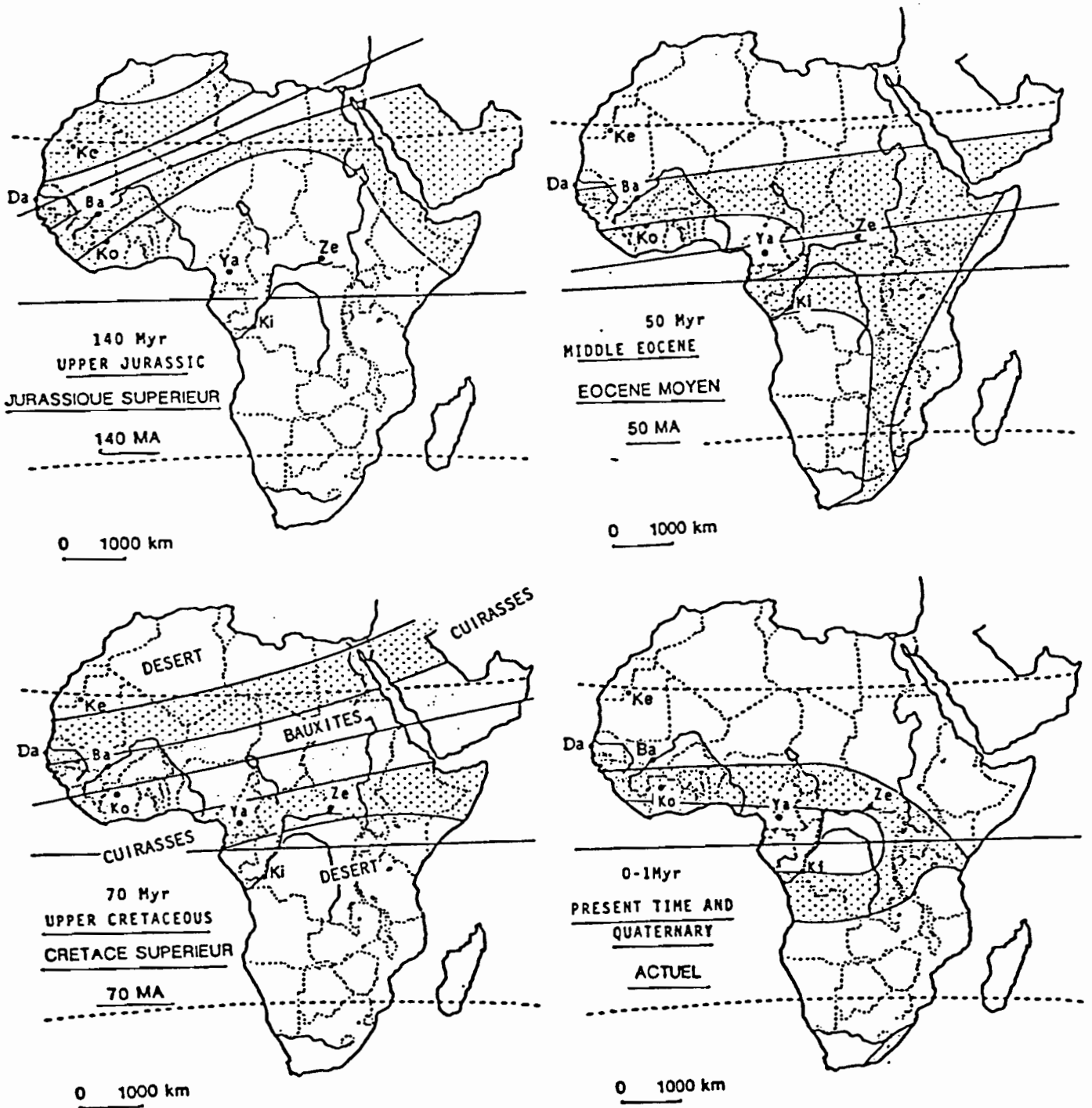


Figure 14 : Migration du continent africain par rapport à l'équateur et aux différentes zones climatiques, et distribution potentielle des bauxites en zone équatoriale et des cuirasses ferrugineuses en climat tropical contrasté (d'après TARDY, MELFI ET VALETON, 1988 ; TARDY, KOBILSEK ET PAQUET, 1991 ; TARDY et ROQUIN, 1992).

-4- L'évolution verticale de l'altération se marque par une forte accumulation en fer, qui correspond d'abord au développement de l'hématite aux dépens des kaolinites, depuis les imprégnations du plasma argileux jusqu'à la cuirasse massive. Les domaines goethitiques sont moins abondants et se développent postérieurement à l'hématite, d'abord dans la macro-porosité sous forme de cutanes, puis au dépens de l'hématite en isolant des plages sub-circulaires qui vont évoluer jusqu'au faciès nodulaire. Les nodules de la cuirasse sont des lithoreliques. Dans les profils de plateau, l'hématite est l'oxyde de fer dominant. Le rapport hématite/goethite décroît progressivement de la lithomarge au sommet de la cuirasse. Alors que dans les profils de glacis, qui sont plus humectés, la goethite est dominante dans la lithomarge et l'argile tachetée. Le rapport hématite/goethite croît de la lithomarge à la carapace, puis décroît de la cuirasse vers le sol. Les apports absolus de fer se concentrent principalement dans les faciès pseudo-nodulaires et massifs. Dans les profils de plateaux, la gibbsite est la dernière phase qui précipite.

-5- Quelle que soit la surface cuirassée, tous les types de faciès sont présents à l'affleurement à cause des processus d'érosion, qui rajeunissent l'âge apparent de la cuirasse en la décapant. Le faciès nodulaire, le plus évolué, est préservé sur les rides convexes, alors que les faciès pseudo-nodulaires puis massifs affleurent vers les bords des plateaux. Les profils sont donc rajeunis de l'amont vers l'aval. Il apparaît donc difficile d'interpréter les faciès cuirassés en terme d'âge. En moyenne, les deux surfaces cuirassées ne se distinguent pas par leur teneur moyenne en fer. Mais par rapport à la basse surface, la haute surface se marque systématiquement par la présence de gibbsite. Le paramètre qui caractérise le mieux le degré d'évolution de la cuirasse est en fait la somme "hématite + goethite + gibbsite".

-6- Le recouvrement argilo-silteux présent au-dessus des cuirasses correspond à du matériel remonté en surface par l'activité des termites, dont une partie s'infiltré par la macroporosité et constitue un apport absolu de la surface en quartz et minéraux lourds dans les cuirasses. Ce recouvrement participe à la dégradation des cuirasses, qui fondent par le haut, en laissant des nodules noyés dans la matrice argilo-silteuse autochtone. De plus, dans les conditions hydromorphes des bas-fonds, la formation d'une goethite tardive aux dépens du plasma hématitique conduit également à la formation de nodules noyés dans une matrice argilo-goethitique sous les cuirasses. Mais la dégradation générale de l'ensemble des cuirasses se situe en surface, au niveau du faciès nodulaire, qui correspond au stade final d'évolution de la cuirasse avant son démantèlement en sol gravillonnaire.

-7- Dans un diagramme  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  et kaolinite (GRANDIN, 1976), les deux surfaces cuirassées de Banankoro se situent à la transition entre les domaines du Relief Intermédiaire et du Haut Glacis. Les cuirasses alumino-ferrugineuses occupent une position médiane entre le Relief Intermédiaire et les surfaces bauxitiques. Il apparaît donc difficile de classer ces deux surfaces cuirassées, qui sont d'âges différents mais qui n'ont pas de composition type à cause des mécanismes de différenciation latérale et du rajeunissement par érosion mécanique. Cependant la haute surface cuirassée a supporté l'ensemble des phases de cuirassement et présente donc une forte différenciation latérale, alors que la basse surface cuirassée, plus récente, est plus uniforme.



## CHAPITRE II

# LE SONDAGE ELECTRIQUE

Dans ce chapitre, les développements théoriques ont été limités aux aspects nécessaires à la compréhension des principes physiques sur lesquels est basée la méthode du sondage électrique. On peut pour plus de précisions, se reporter aux ouvrages de référence suivants : LASFARGUES (1957), SEGUIN (1971), TELFORD *et al.* (1976) et MECHLER (1982). Par contre, les aspects plus pratiques ont été plus largement développés pour bien définir le protocole d'utilisation de la méthode du sondage électrique appliquée à l'étude des profils d'altération latéritique.

### I. INTRODUCTION

Le sondage électrique est une méthode géophysique basée sur la distribution du courant continu dans le sous-sol. C'est une application directe de la loi d'Ohm :  $\Delta V = R \cdot I$  ( $\Delta V$  : différence de potentiel en volt ; R : résistance en ohm ; I : intensité de courant en ampère).

Il permet, en un lieu donné, d'étudier les propriétés électriques du sous-sol. Pour cela, on met en place un circuit d'émission, qui injecte au moyen de deux électrodes enfoncées dans le sol un courant électrique en profondeur ; on mesure la différence de potentiel par un autre circuit dit de réception à l'aide de deux autres électrodes aussi plantées dans le sol.

La profondeur d'investigation, correspondant à la pénétration du courant dans le sol, augmente en fonction de l'écartement des électrodes du circuit d'émission. Le sondage électrique consiste à établir pour chaque station la courbe de résistivité apparente mesurée en fonction de l'écartement des électrodes.

Cette courbe de résistivité mesurée sur le terrain est ensuite comparée par ordinateur à des courbes théoriques calculées à partir de modèles tabulaires correspondant à une succession de n couches horizontales. Chaque couche horizontale est caractérisée par une épaisseur et une résistivité dite vraie. On retient les paramètres du modèle pour lesquels les deux courbes coïncident le mieux.

On a appliqué cette méthode sur l'ensemble du secteur de Banankoro. Malgré la très grande résistance électrique des niveaux superficiels latéritiques en fin de saison sèche, la très faible résistivité des horizons plus profonds, et aussi la grande épaisseur du profil d'altération, les appareils utilisés se sont révélés être très performants.

## II. LES PROPRIETES ELECTRIQUES DES ROCHES

N'importe quel minéral, ou n'importe quelle roche, peut être caractérisé par sa conductibilité électrique, encore appelée conductivité, c'est à dire par sa capacité à conduire le courant électrique.

Selon la facilité avec laquelle le courant traverse le solide étudié, on le qualifiera de conducteur, s'il laisse facilement passer le courant, ou de résistant, s'il laisse difficilement passer le courant. Ces deux termes sont relatifs, ils dépendent du problème posé et du milieu environnant.

### A. Les différents types de conduction électrique

Il existe trois types de conduction électrique (SEGUN, 1971): la conduction électronique, la conduction ionique, la conduction diélectrique.

La conduction électronique ne concerne que les particules métalliques et les semi-conducteurs. Elle est encore appelée conduction métallique. La conduction du courant se fait par le déplacement des électrons libres, très nombreux dans les métaux. Ces derniers sont d'une façon générale de très bons conducteurs. Plus la roche contient de particules métalliques, plus elle est conductrice.

La conduction ionique est présente dans toutes les roches. Sous ce terme, on regroupe deux types de conduction électrique : la conduction ionique du type solide et la conduction électrolytique.

La première est la conduction propre de toutes les roches sèches où les liaisons ioniques sont très forts. En conséquence, cette conduction ionique du type solide est faible.

La seconde est étroitement liée à la présence d'eau dans la roche. L'application d'un champ électrique provoque le déplacement des ions en solution, permettant ainsi le passage du courant électrique. En général, la conduction électrolytique augmente quand la teneur en eau et/ou sa salinité et/ou la perméabilité du milieu augmente. Ce type de conduction ionique joue un rôle très important dans les propriétés géoélectriques des profils d'altération.

La conduction diélectrique est due aux phénomènes de polarisation électrique. Elle n'intéresse que les méthodes qui emploient des courants alternatifs ce qui n'est pas le cas du sondage électrique où ils sont continus.

### B. Les unités de mesure de la conductivité

On mesure en laboratoire à l'aide d'appareils électriques la conductivité d'une roche. Son unité, dans le système international de mesure, est l'ohm<sup>-1</sup>-mètre<sup>-1</sup> (en abrégé  $\Omega^{-1}m^{-1}$ ).

On a la relation suivante :  $1\Omega^{-1}m^{-1} = 1\text{mho}.m^{-1} = 1S.m^{-1}$ , avec S pour siemens.

En pratique, on utilise plus souvent l'inverse de la conductivité, c'est à dire de résistivité avec comme unité l'ohm-mètre (en abrégé  $\Omega m$ ). Car d'une manière générale, les roches ont une conductivité extrêmement faible, elles sont nettement résistantes. Et même les anomalies conductrices recherchées par les géologues miniers ou les hydrogéologues sont souvent assez résistantes.

Les mesures réalisées sur des échantillons naturels de roches montrent que leurs résistivités s'échelonnent de moins d'un ohm-mètre jusqu'à plus de la dizaine de milliers d'ohm-mètres (Tableau 1 et 2). Par exemple les métaux ont une résistivité de l'ordre de  $10^{-5}\Omega m$  alors que celle d'un gabbro peut atteindre  $10^7\Omega m$  (TELFORD, 1976).

D'une façon générale, la résistivité des roches magmatiques comme les granites est supérieure à celle des roches métamorphiques comme les schistes, qui elle même est supérieure à celle des roches sédimentaires comme les grès. Et pour un même type de roche, la résistivité dépend de sa texture et de ses structures.

Tableau 1 : Exemples de résistivité pour des minéraux.

minéral	résistivité ( $\Omega.m$ )	auteur
ilménite $FeTiO_3$	0.5 à 5	PARASNIS (1956)
magnétite $Fe_3O_4$	$10^{-5}$ à $10^{-4}$	

Tableau 2 : Exemples de résistivité pour des roches.

type de roche	résistivité ( $\Omega.m$ )	auteur
roches sédimentaires roches métamorphiques roches ignées	$5 \cdot 10^2$ à $6 \cdot 10^2$ $10^4$ $2 \cdot 10^4$ à $4 \cdot 10^4$	SEGUIN (1971)
marnes calcaires grès roches métamorphiques roches volcaniques	1 à 10 $10^2$ à $10^4$ 1 à $6.4 \cdot 10^8$ $10$ à $10^4$ $10^4$ à $10^5$	TELFORD (1976)
argiles calcaires roches métamorphiques roches intrusives roches éruptives	50 à $5 \cdot 10^2$ $10^2$ à $5 \cdot 10^3$ $10^3$ à $10^4$	MECHLER (1982)

Cette gamme de valeurs très étendue montre l'intérêt des méthodes géoélectriques pour la caractérisation des matériaux géologiques qui présentent généralement des valeurs de résistivité bien contrastées.

Mais les roches selon leur teneur en particules métalliques, leur perméabilité, leur teneur en eau, la qualité de cette eau, ont des limites de résistivités très larges qui se recoupent d'une nature lithologique à l'autre.

Dans certains cas, il devient alors parfois difficile d'individualiser une formation géologique parmi d'autres uniquement par sa résistivité.

### III. LA METHODE DU SONDAGE ELECTRIQUE

Le sondage électrique (en abrégé SE) fait partie des méthodes géoélectriques. Il appartient à la méthode des résistivités électriques (Tableau 3). Cette méthode est caractérisée par l'emploi d'une source artificielle pour provoquer le passage d'un courant continu dans le sol ; il peut s'agir soit de piles, de batteries, ou de groupes électrogènes.

L'appareillage à la base du SE est très simple. On met en place en surface deux circuits électriques : un circuit dit d'émission, un autre dit de réception (Figure 15).

#### A. Le circuit d'émission

Le circuit d'émission comporte la source artificielle. L'injection du courant dans le sol se fait par deux électrodes appelées A et B, plantées en surface et reliées à la source par des câbles électriques isolés. A l'aide d'un ampèremètre branché sur ce circuit, on mesure l'intensité I du courant qui passe quand on ferme le circuit.

Tableau 3 : Les différentes méthodes géoélectriques.

	courant continu	courant variable	polarisation
source naturelle	pas de méthode	méthode magnéto-tellurique	méthode de la polarisation spontanée
source artificielle	méthode des résistivités électriques	méthode électro-magnétique	méthode de la polarisation provoquée

## B. Le circuit de réception

Le circuit de réception comporte un voltmètre relié à la surface du sol par deux électrodes appelées M et N. Il permet de mesurer les différences de potentiel  $\Delta V$  à la surface du sol dues au passage du courant dans le circuit d'émission.

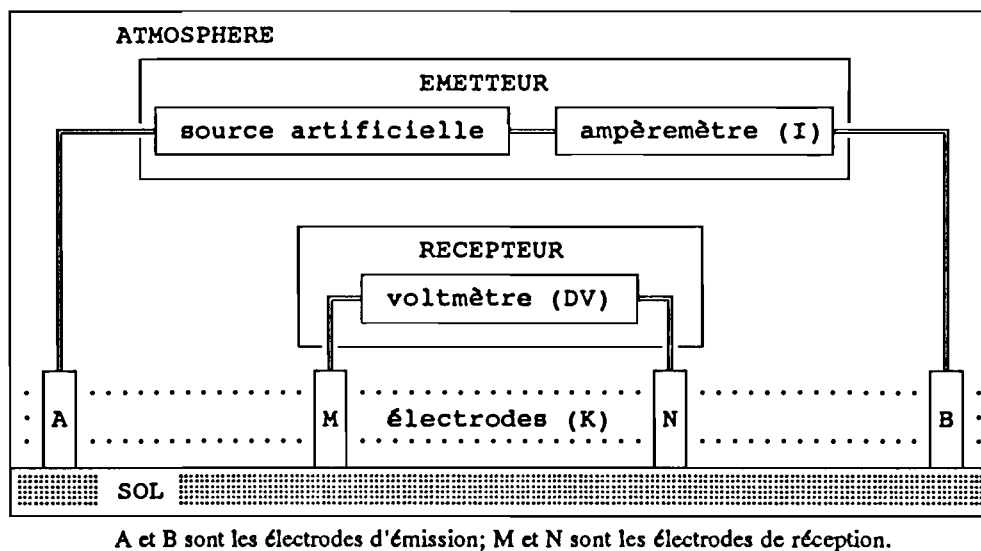


Figure 15 : Schéma des circuits d'émission et de réception mis en place pour un sondage électrique.

## C. La résistivité apparente

Pour pouvoir décrire la résistivité apparente, il faut rappeler la définition de la résistivité électrique et les lois de distribution du courant continu dans un milieu homogène et isotrope.

### 1. La définition de la résistivité électrique

La résistance  $R$  d'un conducteur cylindrique est donnée par la formule :

$$R = \rho (L / S), \quad (1)$$

avec :

- $\rho$  : coefficient de proportionnalité défini comme étant la résistivité électrique ( $\Omega m$ ) ;
- $L$  : longueur du cylindre (m) ;
- $S$  : section du cylindre ( $m^2$ ).

Si on l'écrit :

$$R = V / I = \rho (L / S), \quad (2)$$

avec :

- V : tension appliquée au cylindre (volts) ;  
I : courant traversant le cylindre (ampères),

on obtient la loi d'Ohm :

$$\rho = (V / L) / (I / S) = E / J, \quad (3)$$

avec :

- E : champ électrique (volts/m) ;  
J : densité de courant (ampères/m<sup>2</sup>).

## 2. La distribution du courant continu dans un sous-sol homogène et isotrope

Maintenant si on considère une source ponctuelle I, en contact au point A avec un milieu semi-infini, homogène et isotrope, le courant émis se distribue radialement dans toutes les directions (Figure 16). La densité de courant J en un point M situé à la distance r du point d'injection A est :

$$J = I / (2 \pi r^2), \quad (4)$$

$2 \pi r^2$  étant la surface d'une demie-sphère de rayon r.

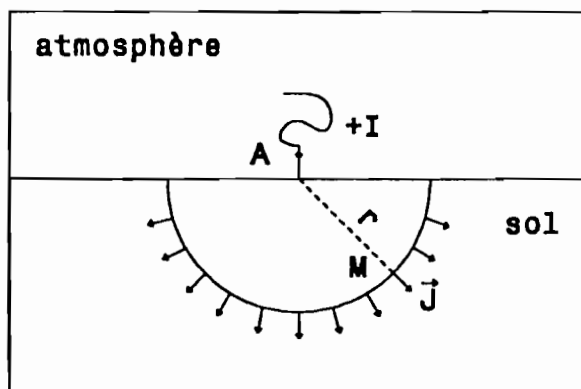


Figure 16 : Distribution du courant dans un milieu homogène semi-infini à partir de l'électrode d'injection A.

Et en appliquant toujours la loi d'Ohm ( $E = \rho J$ ), on obtient :

$$E = (\rho I) / (2 \pi r^2). \quad (5)$$

Sachant que :

$$E = - \nabla V = - \partial V / \partial r, \quad (6)$$

$\nabla$  désignant le gradient, on a finalement :

$$\partial V / \partial r = - (\rho I) / (2 \pi r^2). \quad (7)$$

Et donc :

$$V = (\rho I) / (2 \pi r) + c^te. \quad (8)$$

De plus on a  $c^te = 0$  puisque  $V_{(r \rightarrow \infty)} = 0$ .

Dans le cas du dispositif employé pour le sondage électrique, le point M est situé en surface. Soit  $V_1$  le potentiel en M dû à l'électrode d'injection A (courant +I). On a :

$$V_1 = (\rho I) / (2 \pi d_{AM}), \quad (9)$$

avec  $d_{AM}$  : distance entre les points A et M (m).



Soit  $V_2$  le potentiel en M dû à l'électrode d'injection B (courant -I). On a :

$$V_2 = - (\rho I) / (2 \pi d_{BM}). \quad (10)$$

Donc en M, le potentiel est :

$$V_M = V_1 + V_2 = \rho (I / 2 \pi) (1/d_{AM} - 1/d_{BM}). \quad (11)$$

De même le potentiel au point N dû aux électrodes A et B est :

$$V_N = V_3 + V_4 = \rho (I / 2 \pi) (1/d_{AN} - 1/d_{BN}). \quad (12)$$

Donc la différence de potentiel  $\Delta V$  entre les points M et N est :

$$\Delta V = V_M - V_N = V_1 + V_2 - (V_3 + V_4), \quad (13)$$

soit

$$\Delta V = \rho (I / 2 \pi) (1/d_{AM} - 1/d_{BM} - 1/d_{AN} + 1/d_{BN}). \quad (14)$$

Et donc finalement la résistivité  $\rho$  est donnée par la formule :

$$\rho = (\Delta V / I) 2 \pi (1/d_{AM} - 1/d_{BM} - 1/d_{AN} + 1/d_{BN})^{-1}, \quad (15)$$

ou encore

$$\rho = K (\Delta V / I), \quad (16)$$

avec K : coefficient purement géométrique (m),

$$K = 2 \pi (1/d_{AM} - 1/d_{BM} - 1/d_{AN} + 1/d_{BN})^{-1}. \quad (17)$$

### 3. La notion de résistivité apparente

Les relations du paragraphe précédent ne sont valables que dans l'hypothèse d'un terrain homogène et isotrope, de résistivité  $\rho$ . L'équation (16),  $\rho = K (\Delta V / I)$ , perd sa signification physique quand il s'agit d'un milieu hétérogène pour lequel il convient de définir un autre paramètre: la résistivité apparente  $\rho_a$ . Les hétérogénéités du milieu traversé font que les surfaces équipotentielles ne sont plus des hémisphères : elles sont déformées. La résistivité apparente correspond alors à la résistivité d'un milieu homogène fictif qui produit le même potentiel que le milieu réel.

On a donc :

$$\rho_a = K (\Delta V / I). \quad (18)$$

Cette résistivité apparente  $\rho_a$  n'est pas la résistivité décrite dans la partie II. sur les propriétés électriques des roches, même si elle en possède la même dimension physique ( $\Omega m$ ). SEGUIN (1971) la définit de la façon suivante : "C'est un concept artificiel qui comprend une part de signification physique et une autre d'abstraction mathématique. Il ne représente pas par exemple la résistivité moyenne du sous-sol. Il représente une différence de voltage ( $\Delta V$ ) standardisée pour une configuration choisie d'électrodes (K) lorsque le courant (I) qui circule est constant".

La résistivité apparente dépend à la fois de la nature du sous-sol et de la configuration des électrodes.

### D. La profondeur d'investigation

Le volume de terrain concerné par le passage du courant s'étend non seulement en profondeur entre A et B, mais aussi latéralement (Figure 17). Grâce à la disposition particulière des électrodes dans un SE, on arrive à la verticale d'un lieu donné à saisir de plus en plus profondément les propriétés électriques du terrain.

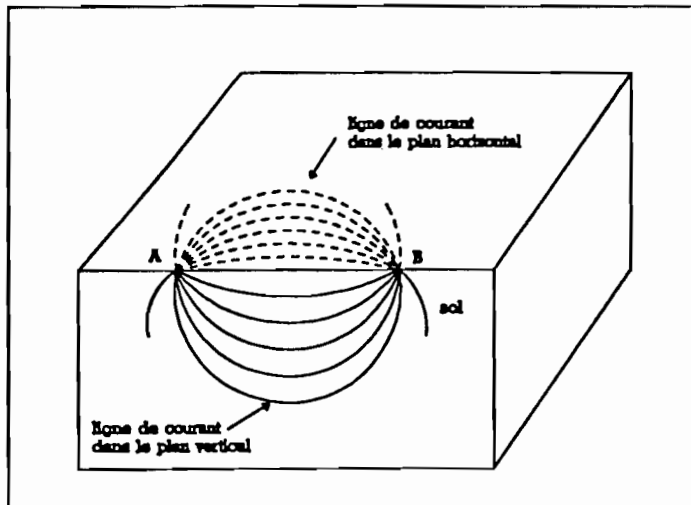


Figure 17 : Allure des lignes de courant dans le sol.

La densité horizontale du courant en un point P situé à une profondeur z dans le sol est (Figure 18) :

$$J_x = -\rho^{-1} (\partial V / \partial x), \quad (19)$$

c'est-à-dire avec  $V = \rho I / 2 \pi d$  :

$$J_x = - (I / 2 \pi) (\partial(1/d_{AP} - 1/d_{BP}) / \partial x), \quad (20)$$

ou encore

$$J_x = (I / 2 \pi) ((x/d_{AP}^3) - ((x-L)/d_{BP}^3)). \quad (21)$$

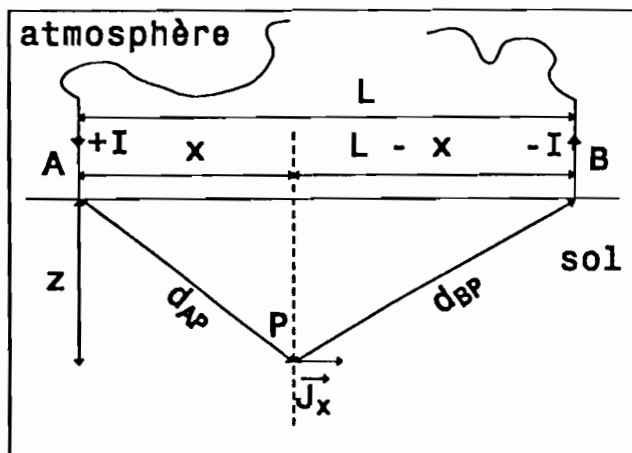


Figure 18 : Représentation géométrique pour la densité de courant horizontale en un point P du sol.

Si le point P est centré entre les électrodes A et B, on a :

$$d_{AP} = d_{BP} = d, \quad (22)$$

et

$$d = (z^2 + (L^2/4))^{1/2}, \quad (23)$$

donc

$$J_x = (I / 2 \pi) (L / (z^2 + (L^2/4))^{3/2}). \quad (24)$$

D'après cette formule, on remarque que :

- quand la profondeur z augmente, la densité de courant diminue ;
- quand la distance L entre les électrodes d'injection augmente, la densité de courant pour une profondeur Z donnée augmente.

Autrement dit, en augmentant la distance entre les électrodes d'émission A et B, la fraction du courant qui pénètre en profondeur augmente elle aussi (Figure 19).

Pour un milieu hétérogène, les modifications des lignes de courant dans le sol sont dues aux variations des caractéristiques géoélectriques du sous-sol qui entraînent des modifications dans les surfaces équipotentielles. Et ces modifications se retrouvent dans les résistivités apparentes mesurées en surface.

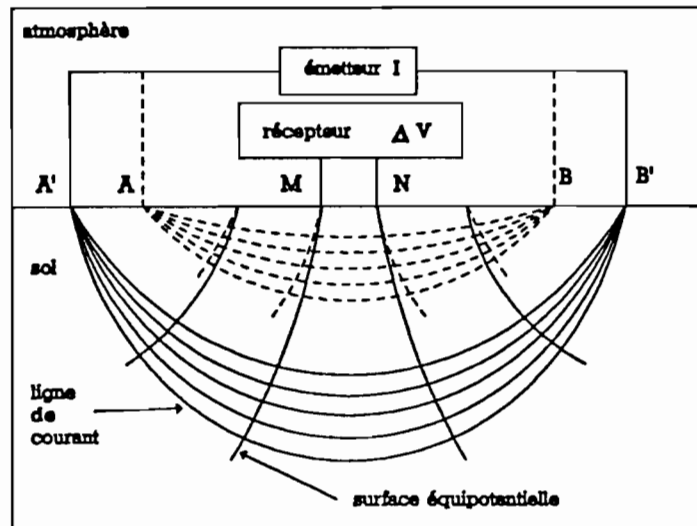
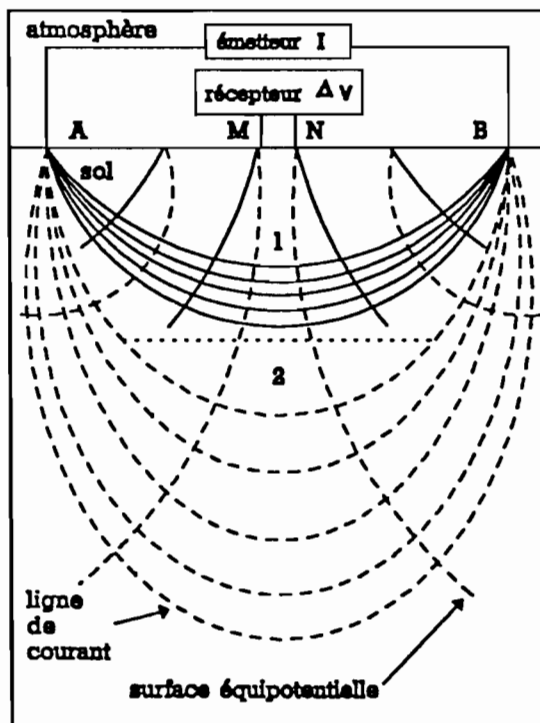


Figure 19 : Profondeur d'investigation en fonction de l'écartement des électrodes A et B.

La profondeur d'investigation dépend non seulement de la configuration du dispositif employé, c'est à dire les écartement entre les électrodes A, B, M et N, de la sensibilité et de la précision des appareils de mesure mais surtout de la nature même du sous-sol (Figure 20).

En effet, pour un substratum conducteur cette profondeur sera moins grande que pour un résistif, à configuration d'électrodes identiques. Un niveau conducteur à tendance à se comporter comme une piège pour les lignes de courant vis à vis de leur profondeur de pénétration. C'est le contraire pour un niveau résistif.



- 1 : profondeur d'investigation des lignes de courant dans un sous-sol conducteur ;
- 2 : profondeur d'investigation des lignes de courant dans un sous-sol résistif.

Figure 20 : Profondeur d'investigation des lignes de courant dans le sous-sol selon sa résistivité.

Cette profondeur est au mieux de l'ordre du quart de l'écartement des électrodes émettrices A et B, mais peut chuter jusqu'à environ  $AB/12$  si le sous-sol est très conducteur. Pour l'estimer, il faut connaître la configuration des électrodes qui sera employée et avoir une idée de la résistivité et de l'épaisseur des couches qui forment le sous-sol (NABIGHIAN et ELLIOT, 1976).

### E. Le dispositif des électrodes

Les 2 dispositifs les plus souvent employés pour des SE sont ceux dits de Wenner et de Schlumberger. Pour ces deux configurations, les quatre électrodes sont alignées, les électrodes émettrices A et B encadrent les électrodes réceptrices M et N. Le SE est centré en MN.

Pour un dispositif du type Wenner, les valeurs des écartements sont les suivants :  $AM = MN = NB = a$  (Figure 21).

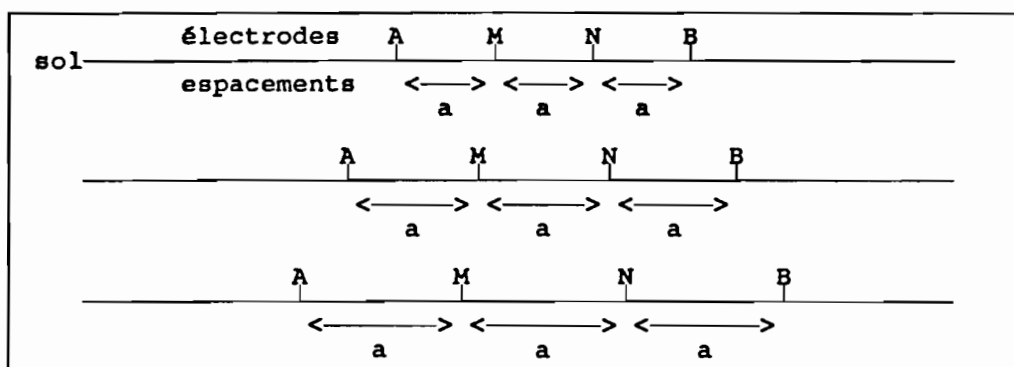


Figure 21 : Schéma du dispositif de type Wenner avec  $AM=MN=NB=a$  croissant.

Pour un dispositif du type Schlumberger, l'écartement entre A et B est beaucoup plus grand que celui entre M et N. Il faut que :  $MN \leq AB/10$  (Figure 22).

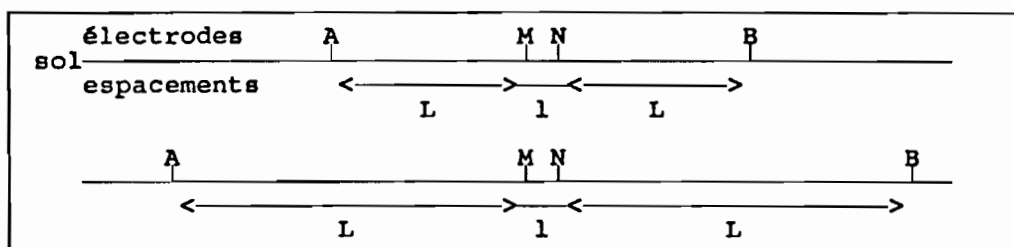


Figure 22 : Schéma du dispositif de type Schlumberger avec  $MN=l$ ,  $AB=2L+l$  et  $MN \leq AB/10$ .

### F. Les caractéristiques des courbes obtenues par sondage électrique

Sur le terrain, on réalise directement un diagramme où les résistivités apparentes sont reportées en fonction de l'écartement des électrodes d'émission, par exemple  $AB/2$  si la configuration est du type Schlumberger.

Les valeurs de résistivité apparente ainsi mesurées vont de l'ohm-mètre à la dizaine de milliers d'ohm-mètres. L'écartement entre les électrodes A et B peut aller sur le terrain du mètre jusqu'à la centaine de mètres. Dans certains cas, où l'investigation doit être très profonde, l'écartement peut même dépasser la dizaine de kilomètres.

Le repère utilisé pour tracer les courbes est bilogarithmique. Avec cette échelle, l'écartement des électrodes émettrices se fait d'une façon particulière : on essaie de prendre les mêmes multiples des puissances de dix dans chaque module (un module est égale sur le papier à une puissance de dix), de façon à ce qu'ils soient disposés le plus régulièrement possible. Par exemple, on pourrait prendre comme écartement en mètre 1, 2, 4, 7 pour le premier module puis 10, 20, 40, 70 pour le deuxième etc...

On cherche en même temps à définir le mieux possible la courbe car chaque palier, bosse ou creux correspond au moins à un niveau géoélectrique (Figure 23).

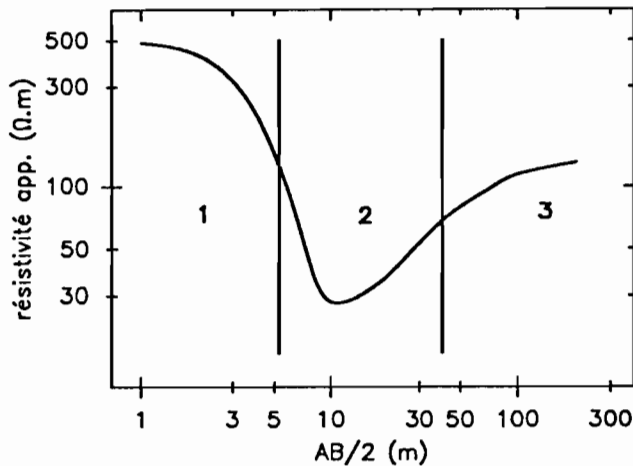


Figure 23 : Exemple de courbe de sondage électrique où l'on distingue de la surface vers la profondeur un niveau résistant (1), puis un niveau conducteur (2), et enfin un niveau résistant (3).

Le choix des écartements dépend de la précision que l'on désire, de la forme de la courbe (nombre et position des bosses et des creux) et surtout du temps dont on dispose pour réaliser un SE. Plus les écartements sont nombreux et grands, plus le temps nécessaire pour effectuer les mesures d'un SE est long.

### G. L'interprétation des courbes de sondage électrique

La courbe "brute" donne des renseignements qualitatifs sur les différentes couches géoélectriques qui composent le sous-sol. On peut alors mettre en évidence un certain nombre de terrains en les qualifiant relativement les uns par rapport aux autres de conducteur ou de résistant, épais ou mince suivant la position des paliers, bosses ou creux de la courbe. Quand les courbes se ressemblent et avec un peu d'habitude, on arrive rapidement à une interprétation semi-quantitative.

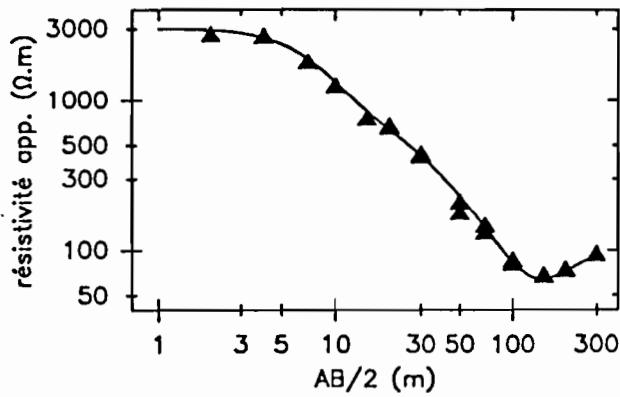
Pour arriver à une interprétation quantitative donnant des épaisseurs en mètre et des résistivités vraies en ohm-mètre, on compare les résultats obtenus sur le terrain à ceux de modèles à géométrie simple.

Les modèles peuvent être soit des modèles expérimentaux, réalisés à échelle réduite en laboratoire, soit des modèles théoriques calculés mathématiquement. Actuellement ce sont ces derniers qui sont les plus utilisés, le traitement informatique leur apporte une grande précision et une grande souplesse d'emploi.

Pour ces modèles, les hypothèses que l'on fait généralement sont les suivantes : le sous-sol est composé de  $n$  couches géoélectriques horizontales, chacune caractérisée par une épaisseur  $H_i$  et une résistivité "vraie"  $\rho_i$  (Figure 24). Si on admet qu'à la réalité du terrain correspond un tel modèle, les variations de résistivités apparentes mesurées en surface quand on écarte les électrodes A et B sont dues à des couches géoélectriques de plus en plus profondes.

#### 1. La loi de similitude en courant continu

La loi de similitude est importante pour l'interprétation quantitative des courbes de sondage électrique, car c'est elle qui permet la comparaison des courbes expérimentales avec les courbes théoriques en prenant un repère bilogarithmique



▲ : résistivité apparente mesurée sur le terrain.  
 — : courbe théorique calculée par ordinateur.

Figure 24 : Exemple de courbe de sondage électrique avec sa courbe théorique calculée par ordinateur à partir d'un modèle à 5 couches horizontales :  $\rho_1 = 3000\Omega m$  et  $H_1 = 3.6m$ ,  $\rho_2 = 700\Omega m$  et  $H_2 = 11m$ ,  $\rho_3 = 230\Omega m$  et  $H_3 = 28m$ ,  $\rho_4 = 12\Omega m$  et  $H_4 = 22m$ ,  $\rho_5 = 200\Omega m$ .

Soient deux structures, S et S' (Figure 25), semblables géométriquement et électriquement, c'est-à-dire qu'elles ne se distinguent que par un coefficient géométrique  $k_L$  qui correspond à un changement d'échelle, et un coefficient électrique  $k_\rho$  tels que :

$$r' = k_L r, \rho_1' = k_\rho \rho_1 \text{ et } \rho_2' = k_\rho \rho_2. \quad (25)$$

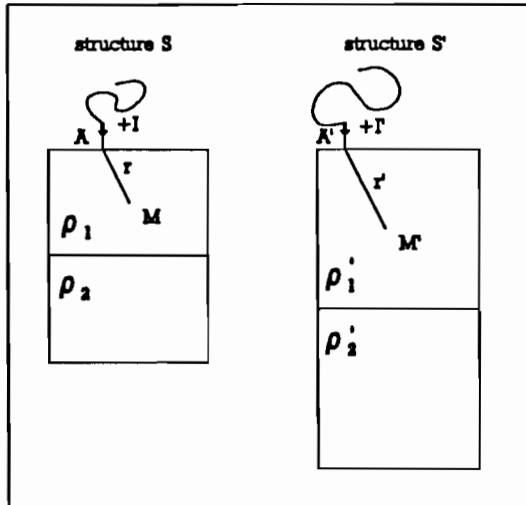


Figure 25 : Représentation géométrique pour la loi de similitude.

Les courants I et I' injectés au niveau des électrodes A et A' ne sont pas forcément égaux. Les potentiels V et V', respectivement en M et M', ne peuvent être que proportionnels, c'est-à-dire  $V' = C V$ , avec  $C = c^{te}$ .

Car V et V' étant des fonctions harmoniques  $\Delta V = \Delta V' = 0$ , cela implique :

$$V' = C V, \quad (26)$$

$$\partial V' / \partial x = C \partial V / \partial x, \partial V' / \partial y = C \partial V / \partial y, \partial V' / \partial z = C \partial V / \partial z, \quad (27)$$

$$\partial^2 V' / \partial x^2 = C \partial^2 V / \partial x^2, \partial^2 V' / \partial y^2 = C \partial^2 V / \partial y^2,$$

$$\partial^2 V' / \partial z^2 = C \partial^2 V / \partial z^2. \quad (28)$$

Donc en tous points homologues entre les structures S et S', on a  $V' / V = C$ .

Dans la cas de la figure 25, avec une surface plane, et M proche de A, et M' de A', on a :

$$V' = (\rho_1' I') / (2 \pi r') \text{ et } V = (\rho_1 I) / (2 \pi r), \quad (29)$$

donc

$$V' / V = (I' / I) (\rho_1' / \rho_1) (r / r') = (I' / I) (k_\rho / k_L) = C. \quad (30)$$

Avec des dispositifs d'électrodes semblables pour mesurer les résistivités apparentes, c'est-à-dire  $K' = k_L K$ , on a :

$$\rho_a' = K' dV' / I' \text{ et } \rho_a = K dV / I, \quad (31)$$

soit

$$dV' / dV = (I' / I) (\rho_a' / \rho_a) (K / K'), \quad (32)$$

or

$$\partial V' / \partial V = V' / V = C, \quad (33)$$

donc

$$(I' / I) (\rho_a' / \rho_a) (K / K') = (I' / I) (k_\rho / k_L) = C, \quad (34)$$

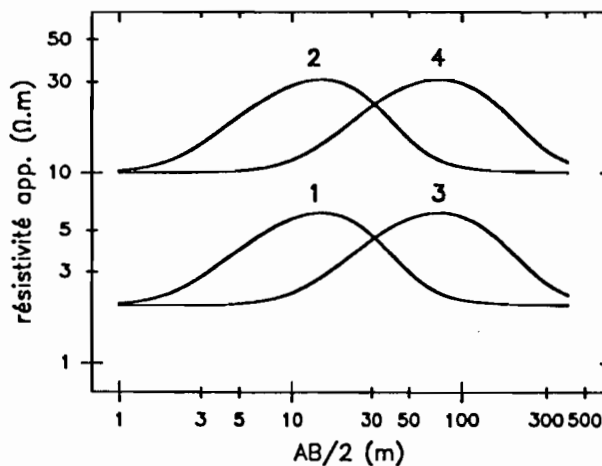
d'où finalement

$$\rho_a' = k_\rho \rho_a. \quad (35)$$

Autrement dit, la similitude géométrique à elle seule n'affecte pas la résistivité apparente, si on compense le changement d'échelle pour les structures par le même changement d'échelle pour le dispositif des électrodes. On mesurera la même résistivité apparente sur deux structures géométriquement semblables avec deux dispositifs d'électrodes géométriquement semblables, si les résistivités vraies restent identiques dans les structures.

Pratiquement cela implique que la courbe de sondage électrique  $\rho_a' = f(\text{écartement des électrodes d'émission pour la structure } S')$  peut se déduire de la courbe  $\rho_a = f(\text{écartement des électrodes d'émission de la structure } S)$  par une dilatation (si  $k_L > 1$ ) ou une contraction (si  $k_L < 1$ ) des abscisses.

L'autre cas étant pour deux structures identiques ( $k_L = 1$ ), deux dispositifs d'électrodes identiques, mais des résistivités semblables ( $k_\rho \neq 1$ ), ce qui implique pratiquement que la courbe de sondage électrique  $\rho_a' = f(\text{écartement des électrodes d'émission pour la structure } S')$  peut se déduire de la courbe  $\rho_a = f(\text{écartement des électrodes d'émission de la structure } S)$  par une dilatation (si  $k_\rho > 1$ ) ou une contraction (si  $k_\rho < 1$ ) des ordonnées. Ces dilatations et ces contractions des coordonnées en échelle de valeur naturelle reviennent à une translation en échelle bilogarithmique. La représentation de ces courbes avec un tel repère, permet la conservation de la forme des courbes pour les deux types de similitude géométrique et électrique (Figure 26). Ainsi on peut facilement comparer des courbes qui ont des formes similaires.



- 1 : modèle de base à 3 couches horizontales avec  $\rho_1=20\Omega\text{m}$ ,  $\rho_2=200\Omega\text{m}$ ,  $\rho_3=20\Omega\text{m}$ ,  $H_1=2\text{m}$ ,  $H_2=4\text{m}$  et  $H_3=\infty$ .
- 2 : 1<sup>ère</sup> application avec  $\rho_i \times 5$  et  $H_i$  constant, la courbe est traduite vers le haut parallèlement à l'axe des ordonnées.
- 3 : 2<sup>ème</sup> application avec  $\rho_i$  constant et  $H_i \times 5$ , la courbe est traduite vers la droite parallèlement à l'axe des abscisses.
- 4 : 3<sup>ème</sup> application avec  $\rho_i \times 5$  et  $H_i \times 5$ , la courbe est traduite vers le haut et vers la droite.

Figure 26 : Principe de conservation de la forme de la courbe d'un modèle à  $n$  couches horizontales quand les paramètres résistivité et épaisseur sont multipliés par un même facteur.

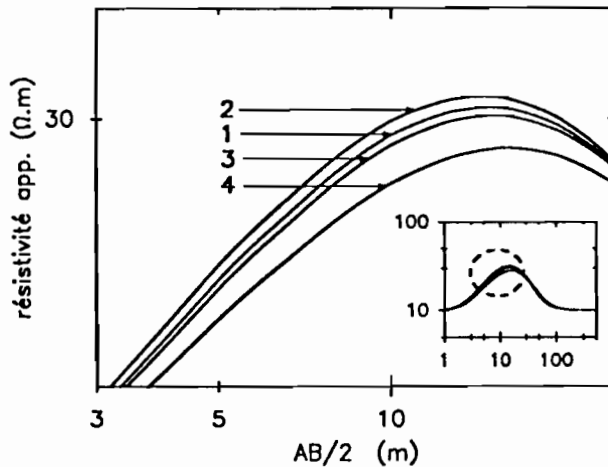
## 2. Le principe d'équivalence

Le principe d'équivalence est important du point de vue pratique. Il permet, sous certaines conditions, de modifier les caractéristiques d'un terrain sans engendrer de variations notables de la courbe de résistivité apparente. Ce principe s'applique aux bosses et aux creux des courbes, mais de façon distincte.

Pour les bosses, c'est à dire pour un terrain résistant compris entre deux terrains conducteurs, il se manifeste surtout par la résistance transversale du terrain résistant (notée  $RT_R$ ). Cette résistance transversale est égale au produit de la résistivité vraie par l'épaisseur du terrain résistant (notées respectivement  $\rho_R$  et  $H_R$ ), soit  $RT_R = \rho_R \times H_R$ . Ce principe permet de changer les caractéristiques du terrain résistant (épaisseur et résistivité) en conservant à peu près la forme de la courbe. Pour cela il faut simplement que le terrain résistant de remplacement ait la même résistance transversale ou une résistance transversale très proche.

D'une manière générale, pour une même résistance transversale, si la résistivité vraie augmente le sommet de la courbe se déplace vers le haut, et inversement si elle diminue (Figure 27). Les autres parties de la courbe, quant à elles, ne changent pas.

Mais l'amplitude des variations de la courbe en réponse aux variations du terrain résistant dépend du rapport, appelé conductance longitudinale du terrain résistant (noté  $CL_R$ ) et qui est égale à  $H_R/\rho_R$ . Ce rapport doit rester faible par rapport à celui des terrains conducteurs pour que l'amplitude de la variation reste faible. Ce rapport fixe les limites de validité du principe d'équivalence (MATHIEZ et HUOT, 1966).



1 : modèle de base à 3 couches horizontales avec  $\rho_1=10\Omega\text{m}$ ,  $\rho_2=100\Omega\text{m}$ ,  $\rho_3=10\Omega\text{m}$ ,  $H_1=2\text{m}$ ,  $H_2=4\text{m}$  et  $H_3=\infty$ . On a alors  $RT_1=20\Omega\text{m}^2$ ,  $CL_1=0,2\Omega^{-1}$ ,  $RT_2=400\Omega\text{m}^2$ ,  $CL_2=0,04\Omega^{-1}$ ,  $RT_3=\infty$  et  $CL_3=\infty$ .

2 : 1<sup>ère</sup> application avec  $\rho_2=200\Omega\text{m}$  et  $H_2=2\text{m}$ . On a alors  $RT_2=400\Omega\text{m}^2$  comme dans le modèle de base, et  $CL_2=0,01\Omega^{-1}$ , ce qui reste faible par rapport à  $CL_1$  et  $CL_3$ . Les 2 courbes sont très proches, alors que la résistivité vraie du résistant a doublé et que l'épaisseur totale des 2 premières couches a diminué d'un tiers.

3 : 2<sup>ème</sup> application avec  $\rho_2=80\Omega\text{m}$  et  $H_2=5\text{m}$ . On a alors  $RT_2=400\Omega\text{m}^2$

comme dans le modèle de base, et  $CL_2=0,06\Omega^{-1}$ , ce qui reste faible par rapport à  $CL_1$  et  $CL_3$ . Les 2 courbes sont très proches, alors que la résistivité vraie du résistant a diminuée de 1/5<sup>ème</sup> et que l'épaisseur totale des 2 premières couches a augmenté de 1/6<sup>ème</sup>.

4 : 3<sup>ème</sup> application avec  $\rho_2=50\Omega\text{m}$  et  $H_2=8\text{m}$ . On a alors  $RT_2=400\Omega\text{m}^2$  comme dans le modèle de base, et  $CL_2=0,16\Omega^{-1}$ , ce qui n'est plus faible par rapport à  $CL_1$ . Là les 2 courbes se différencient plus nettement, on est en dehors du domaine de validité du principe d'équivalence pour la résistance transversale.

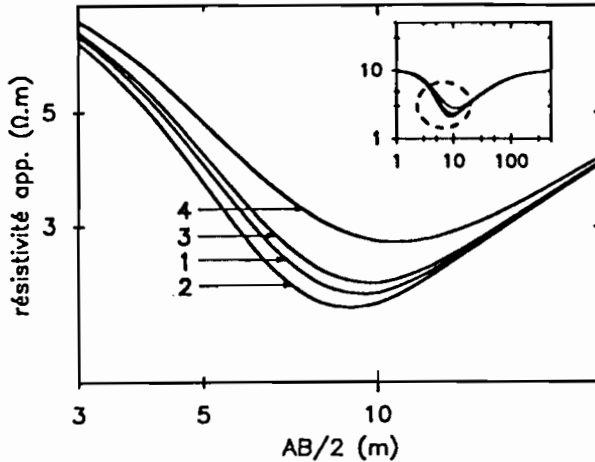
Figure 27 : Modification de la courbe des résistivités apparentes pour un terrain résistant placé entre deux terrains conducteurs.

Pour les creux, c'est à dire pour un terrain conducteur compris entre deux terrains résistants, le principe d'équivalence se manifeste surtout par la conductance longitudinale du terrain conducteur (notée  $CL_C$ ). Cette conductance longitudinale est égale au quotient de l'épaisseur par la résistivité vraie du terrain conducteur (notées respectivement  $H_C$  et  $\rho_C$ ), soit  $CL_C = H_C/\rho_C$ . Des terrains conducteurs ayant des conductances longitudinales presque identiques, placés entre les deux mêmes résistants donnent des courbes pratiquement similaires (Figure 28).

La validité du principe d'équivalence dans ce cas dépend de la résistance transversale du conducteur ( $RT_C = \rho_C \times H_C$ ), celle-ci doit rester faible par rapport à celles des couches voisines (MATHIEZ et HUOT, 1966). Les courbes présentent les mêmes variations que pour la résistance transversale : pour une même conductance longitudinale, si la résistivité vraie augmente, le minimum de la courbe se



déplace vers le haut, et inversement si elle diminue.



rapport à  $RT_1$  et  $RT_3$ . Les 2 courbes sont très proches, alors que la résistivité vraie du 2<sup>ème</sup> terrain a augmenté de 1/4 et que l'épaisseur des 2 premières couches a augmenté de 1/6<sup>ème</sup>.

- 4 : 3<sup>ème</sup> application avec  $\rho_2=2\Omega m$  et  $H_2=8m$ . on a alors  $CL_2=4\Omega^{-1}$  comme dans le modèle de base, et  $RT_2=16\Omega m^2$ , ce qui n'est plus faible par rapport à  $RT_1$ . Les 2 courbes se différencient plus nettement, on est en dehors du domaine de validité du principe d'équivalence pour la conductance longitudinale.

Figure 28 : Modification de la courbe des résistivités apparentes pour un terrain conducteur placé entre deux terrains résistants.

### 3. Le principe de suppression

Le principe de suppression est important du point de vue pratique. Il permet d'ajouter ou d'enlever sous certaines conditions des terrains sans modifier l'allure de la courbe des résistivités apparentes.

Un terrain de résistivité vraie proche de celle d'une des deux couches situées au-dessus et au-dessous, ne modifie pas l'allure de la courbe du SE tant que son épaisseur reste faible par rapport à celles des deux autres couches. On parle de suppression car, même si ces terrains existent dans la réalité, ils ne sont pas mis en évidence par SE. C'est une limite à la résolution du SE. Ce principe est d'autant mieux vérifié que la résistivité du niveau intermédiaire est proche de celle de la couche inférieure (Figures 29 et 30).

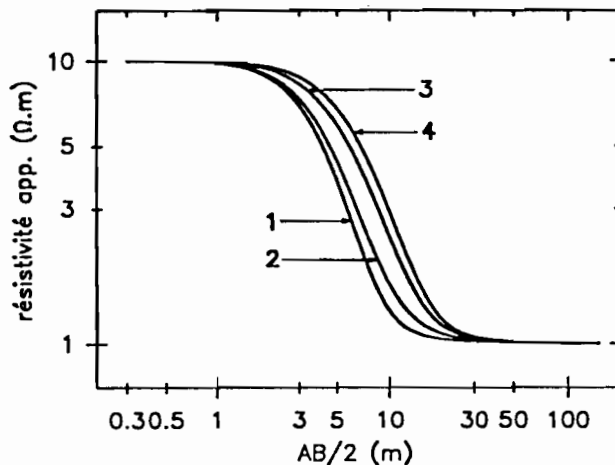
### H. Conclusion

Le SE est fondé sur des principes simples d'électricité, il est relativement facile à mettre en oeuvre et accessible d'un point de vue pratique. On mesure des résistances, des différences de potentiel, des intensités de courant et des résistivités. Ce qui fait que le contrôle de la mise en place et de la manipulation des appareils sur le terrain reste simple.

Mais les principes d'équivalence et de suppression sont les deux difficultés majeures de l'interprétation du SE. Dans le premier cas, on a des solutions multiples pour identifier un terrain. Dans le second cas, on peut oublier des solutions pour plusieurs couches. Finalement, l'interprétation des données peut conduire à une représentation très éloignée de la réalité du terrain. Pour éviter cela, il faut déjà avoir une idée sur la nature géoélectrique des couches qui forment le sous-sol, au moins du point de vue qualitatif (résistant ou conducteur, épais ou mince). Il convient alors de se reporter aux études réalisées sur des terrains similaires, ou bien aux connaissances acquises sur le terrain lui-même (affleurement, forage...).

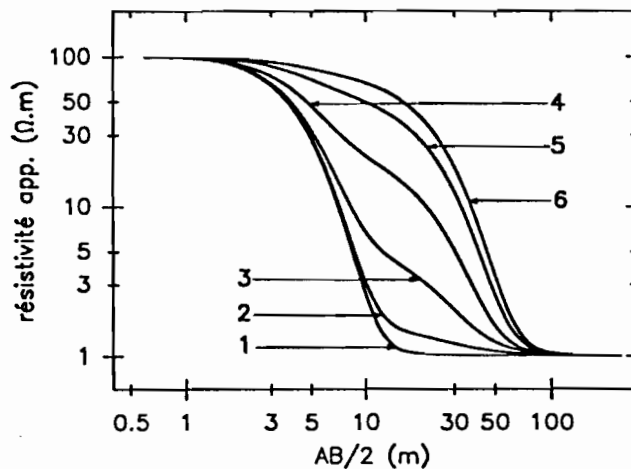
De plus, il faut combiner le SE avec d'autres méthodes géophysiques choisies en fonction du problème posé. Parmi celles-ci, c'est la diagraphie électrique qui en mesurant des résistivités directement dans les trous de forage apporte le plus de renseignements sur les variations de la résistivité en fonction de la profondeur. Mais jusqu'à présent les deux méthodes n'ont jamais été appliquées sur un même secteur d'alévation latéritique épais : les forages y sont rares et les diagraphies encore plus.

Un seul SE, pris isolément hors de son contexte, ne suffit pas pour connaître la nature et l'organisation du sous-sol, et il est nécessaire de tenir compte d'informations complémentaires utilisées comme contraintes dans le choix des modèles d'interprétation.



- 1 : modèle de base à 2 couches horizontales avec  $\rho_1=100\Omega\text{m}$ ,  $\rho_3=1\Omega\text{m}$ ,  $H_1=2\text{m}$  et  $H_3=\infty$  ;  
 et avec comme terrain intermédiaire les valeurs suivantes :  
 2 : 1<sup>ère</sup> application avec  $\rho_2=2\Omega\text{m}$  et  $H_2=2\text{m}$  ;  
 3 : 2<sup>ème</sup> application avec  $\rho_2=5\Omega\text{m}$  et  $H_2=2\text{m}$  ;  
 4 : 3<sup>ème</sup> application avec  $\rho_2=7\Omega\text{m}$  et  $H_2=2\text{m}$ .

Figure 29 : Modification de la courbe des résistivités apparentes par le principe de suppression avec un faible contraste entre les résistivités et les épaisseurs.



- 1 : modèle de base à 3 couches horizontales avec  $\rho_1=100\Omega\text{m}$ ,  $\rho_3=1\Omega\text{m}$ ,  $H_1=10\text{m}$  et  $H_3=\infty$  ;  
 et avec comme terrain intermédiaire les valeurs suivantes :  
 2 : 1<sup>ère</sup> application avec  $\rho_2=1,5\Omega\text{m}$  et  $H_2=10\text{m}$  ;  
 3 : 2<sup>ème</sup> application avec  $\rho_2=5\Omega\text{m}$  et  $H_2=10\text{m}$  ;  
 4 : 3<sup>ème</sup> application avec  $\rho_2=20\Omega\text{m}$  et  $H_2=10\text{m}$  ;  
 5 : 4<sup>ème</sup> application avec  $\rho_2=50\Omega\text{m}$  et  $H_2=10\text{m}$  ;  
 6 : 5<sup>ème</sup> application avec  $\rho_2=70\Omega\text{m}$  et  $H_2=10\text{m}$ .

Figure 30 : Modification de la courbe des résistivités apparentes par le principe de suppression avec un fort contraste entre les résistivités et les épaisseurs.

#### IV. PRESENTATION DES APPAREILS UTILISES POUR LES SONDEGES ELECTRIQUES

Pour réaliser un SE, il suffit de mettre en place : - une source artificielle de courant et un ampèremètre pour le circuit d'émission, - un voltmètre pour le circuit de réception.

Actuellement on trouve sur le marché des appareils très sophistiqués, qui contiennent toujours ces trois éléments de base. Ceux dont nous avons disposés pour effectuer les mesures sur Banankoro appartiennent au Laboratoire de Géophysique Appliquée et Structurale (LA.GAS) de Vandoeuvre-lès-Nancy. Ils sont de marque canadienne HUNTEC. L'émetteur contient la source artificielle et l'ampèremètre, il s'agit du modèle HUNTEC LOPO M-4. Le récepteur formé par le voltmètre, est le modèle HUNTEC MARK IV. Ces 2 appareils combinés permettent de mesurer la polarisation spontanée, la résistivité pour les méthodes électriques et la polarisation provoquée dans les domaines temporel et fréquentiel.

## A. L'émetteur

Théoriquement l'émetteur produit une onde de courant rectangulaire (en créneau) de type alternatif avec une coupure (Figure 31). Mais en pratique, à cause des phénomènes électromagnétiques existants à l'émission et à la rupture du courant et aussi à cause des variations parfois importantes de la polarisation spontanée, le signal émis est très perturbé par rapport au signal théorique.

C'est pour cela que le HUNTEC LOPO M-4 ajuste automatiquement sa tension de sortie en fonction des variations naturelles de la résistance entre les bornes A et B, de façon à émettre un courant stabilisé à la valeur voulue par l'opérateur. En effet, grâce à un dispositif analogique très élaboré, il a été conçu comme source de courant régularisé et non comme simple source de tension.

Pour régler le type de signal émis, on a le choix pour sa période entre 2, 4, 8 ou 16 secondes. Le rapport entre le temps d'émission et le temps de coupure peut être de 1/1, 1.28/1, 1.67/1 et 2.2/1.

L'émetteur fonctionne sur des batteries ou tout autre source de courant continu, pourvu qu'il reçoive en entrée 30 à 40 volts fournissant 10 à 15 ampères. Le courant émis maximal est de 1,5 ampères en continu, sa tension de sortie maximale est de 1800 volts en continu.

L'appareil possède de nombreux avantages pratiques qui facilitent l'acquisition des données sur le terrain:

- l'opérateur peut choisir la valeur du courant émis de 0 à 1,5 volts ;
- un cadran analogique multifonctionnel permet de mesurer le voltage des batteries en entrée, la résistance existante entre les bornes A et B avant l'émission pour savoir si le circuit est bien fermé, et l'intensité du courant émis pour la fixer à la valeur désirée et observer son bruitage ;
- deux signaux lumineux alternatifs donnent le sens du passage du courant ;
- un signal sonore indique le temps d'émission du courant, sa fréquence auditive est proportionnelle à l'intensité du courant ;
- un signal lumineux prévient les surchauffes des circuits électroniques ;
- un autre signal lumineux indique le sous- ou le sur-voltage ;
- un disjoncteur empêche les court-circuits ;
- un système interne pouvant être branché directement sur le récepteur permet de vérifier ses mesures par l'émission d'un signal connu.

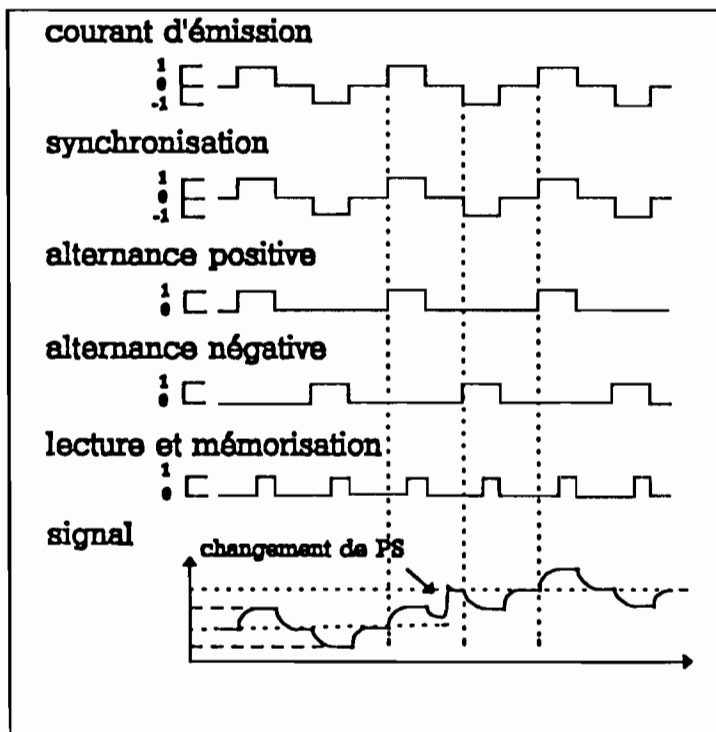


Figure 31 : Type de signal électrique créé par l'émetteur.

## B. Le récepteur

Le HUNTEC MARK IV s'adapte à tous les émetteurs envoyant des courants sous la forme de créneau. Il est prévu pour mesurer de façon détaillée tous les phénomènes de résistivité, de polarisation spontanée et de polarisation provoquée dans les domaines temporel et fréquentiel.

Il est muni d'un microprocesseur. Sur un cycle de 4 à 8 secondes, il échantillonne 2048 points sur le signal reçu et il les accumule sur plusieurs périodes afin de minimiser le bruit. Il peut se caler sur 11 fréquences de transmission standard : 1/64, 1/32, 1/16, 1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8 et 16 Hz. Mais il faut noter que d'autres valeurs peuvent être introduites de façon à se régler sur n'importe quel émetteur.

On peut donner un temps de délai avant qu'il ne commence ses calculs, on évite ainsi les parties les plus perturbées du signal au début de l'injection et au début de la coupure du courant émis. Le signal arrive dans le récepteur par une entrée différentielle ce qui réduit encore le bruit.

L'intervalle de tension mesurée va de 50  $\mu$ volts à 10 volts.

Les avantages pratiques de ce récepteur sont les suivants :

- l'ensemble des données recueillies peut être affiché sur un cadran à cristaux liquides, et pendant la prise des mesures, on peut suivre l'évolution des paramètres enregistrés ;
- par un cadran analogique, on peut mesurer l'impédance entre les bornes M et N pour vérifier la bonne fermeture du circuit de réception ;
- ce même cadran donne le signal reçu, on peut donc suivre qualitativement l'allure de la différence de potentiel enregistrée, en particulier les variations du signal par rapport au bruit ;
- on peut enregistrer sur des cassettes magnétiques les données recueillies ainsi que la forme moyenne du signal reçu.
- grâce à son microprocesseur, il peut automatiquement tester ces circuits analogiques et numériques, et en localiser les pannes, ce qui fait gagner beaucoup de temps pour les réparations.

## C. Le système de synchronisation

Pour une accumulation correcte des mesures, il faut que le début de l'échantillonnage du signal soit précis à chaque période. Il faut s'assurer d'une bonne synchronisation entre l'émetteur et le récepteur. Pour cela, le récepteur permet l'emploi d'un système de synchronisation. Ce système se branche directement sur le circuit d'émission et se relie au récepteur. Alors le microprocesseur est informé de l'instant exact du départ des créneaux.

Cette synchronisation permet d'augmenter le rapport signal/bruit, ce qui est très important pour les mesures de polarisation provoquée ou les mesures très bruitées en général.

Le système de synchronisation employé sur le terrain a été élaboré au L.A.G.A.S.

## D. Conclusion

L'avantage des appareils utilisés sur le terrain est qu'ils permettent de contrôler pratiquement tous les paramètres. Par exemple : la qualité de la fermeture des circuits est vérifiée par la résistance entre les électrodes A et B d'une part et M et N d'autre part ; l'allure du signal émis est suivi d'une façon visuelle et sonore pour connaître le sens dans lequel le courant passe le moins bien ; l'allure du signal reçu est suivie de la même façon pour indiquer à quel moment il faut changer la longueur MN ou/et l'intensité du courant émis.

Grâce à cela et comparés à d'autres appareils testés sur notre secteur d'étude, cet appareillage s'est révélé vraiment performant.

## V. LES CARACTERISTIQUES OPERATOIRES DES SONDAGES ELECTRIQUES SUR DES PROFILS LATERITIQUES

C'est à l'occasion du premier séjour en 1988 sur le plateau de Banankoro, que les appareils embarqués pour la mission servaient à faire des mesures sur des latérites. C'était une première pour toute l'équipe alors présente. Et heureusement les premiers essais réalisés sur le plateau lui-même ont été concluants.

Petit à petit, au cours des deux séjours en 1988 et 1989, toute une procédure de mise en oeuvre des SE sur le terrain s'est élaborée. Comme pour n'importe quel SE il a fallu déterminer les bonnes longueurs de ligne AB, les écartements adéquats entre AB et MN, ainsi que la quantité d'eau minimum à emporter. Mais il a fallu aussi innover en utilisant des plaques métalliques comme électrodes pour assurer le meilleur contact possible avec le sol.

### A. Les écartements entre AB et MN

Les écartements entre les électrodes d'injection A et B retenus ont été les suivants :

- 4, 8, 14, 20, 40, 60, 100, 140, 200, 400 et 600m pour toutes les stations ;
- plus 800, 900 et 1000m en certains endroits, où à cause de la grande épaisseur du profil d'altération, la remontée finale de la courbe ne s'amorçait que pour ces valeurs, et même parfois elle n'a pas été atteinte;
- plus encore 30 et 300m, employés dans quelques cas lors de la première mission et systématiquement lors de la seconde.

Les valeurs des écartement entre les électrodes M et N sont les suivantes :

- 0.3, 0.5, 1, 2, 4, 5, 6, 8, 10, 14, 20, 30, 40, 60, 80, 100m.

Les correspondances entre AB et MN sont données dans le tableau 4, ainsi que leurs fréquences d'utilisation de chaque configuration par mission selon la valeur de AB et selon l'ensemble des mesures effectuées au cours des deux missions.

Tableau 4 : Ecartements choisis entre AB et MN, et leurs fréquences d'utilisation (début).

AB/2 (m)	MN/2 (m)	n1 1988	n2 1989	n 88+89	pourcentage			par rapport		
					1988	à AB/2 1989	88+89	à N1 1988	à N2 1989	à N 88+89
2	0.15	2	--	2	3	--	2	0.20	--	0.09
2	0.25	69	62	131	97	100	98	7.01	5.15	5.99
3	0.25	1	--	1	100	--	100	0.10	--	0.05
4	0.15	1	--	1	1	--	1	0.10	--	0.05
4	0.25	69	63	131	96	100	98	7.01	5.24	6.03
4	0.50	2	--	2	3	--	1	0.20	--	0.09
7	0.25	15	62	77	18	95	52	1.52	5.15	3.52
7	0.50	62	3	65	75	5	44	6.29	0.25	2.97
7	0.70	1	--	1	1	--	1	0.10	--	0.05
7	1.00	5	--	5	6	--	3	0.51	--	0.23
10	0.25	--	60	60	--	95	42	--	4.99	2.74
10	0.50	57	2	59	70	3	41	5.79	0.17	2.70
10	1.00	24	1	25	30	2	17	2.44	0.08	1.14
15	0.25	--	60	60	--	91	87	--	4.99	2.74
15	0.50	1	5	6	33	8	9	0.10	0.42	0.27
15	1.00	2	--	2	66	--	3	0.20	--	0.09
15	2.00	--	1	1	--	1	1	--	0.08	0.05
20	0.25	--	56	56	--	58	31	--	4.66	2.56
20	0.50	8	37	45	9	39	24	0.81	3.08	2.06
20	1.00	58	--	58	67	--	32	5.89	--	2.65
20	2.00	18	3	21	21	3	11	1.83	0.25	0.96
20	2.50	3	--	3	3	--	2	0.31	--	0.14

avec n1 : nombre de mesures réalisées pour chaque AB/2 et MN en 1988, n2 : idem pour 1989, n : idem pour 1988 et 1989 (n=n1+n2), N1 : nombre total de mesures effectuées en 1988, N2 : idem pour 1989, N : idem pour 1988 et 1989 (N=N1+N2).

(suite)

AB/2 (m)	MN/2 (m)	n1 1988	n2 1989	n 88+89	pourcentage			par rapport		à N 88+89
					1988	à AB/2 1989	88+89	à N1 1988	à N2 1989	
25	1.00	1	--	1	100	--	100	0.10	--	0.05
30	0.25	--	3	3	--	4	2	--	0.25	0.14
30	0.50	--	56	56	--	80	38	--	4.66	2.56
30	1.00	2	4	6	3	6	4	0.20	0.33	0.27
30	2.00	67	7	74	87	10	50	6.80	0.58	3.38
30	2.50	1	--	1	1	--	1	0.10	--	0.05
30	3.00	4	--	4	5	--	3	0.41	--	0.18
30	4.00	1	--	1	1	--	1	0.10	--	0.05
30	5.00	2	--	2	3	--	1	0.20	--	0.09
40	5.00	1	--	1	100	--	100	0.10	--	0.05
50	0.50	--	47	47	--	42	23	--	3.91	2.15
50	1.00	--	1	1	--	1	1	--	0.08	0.05
50	2.00	15	54	69	19	49	36	1.52	4.49	3.15
50	2.50	1	--	1	1	--	1	0.10	--	0.05
50	3.00	1	--	1	1	--	1	0.10	--	0.05
50	4.00	61	9	70	75	8	36	6.19	0.75	3.20
50	5.00	3	--	3	4	--	2	0.31	--	0.14
60	5.00	1	--	1	100	--	100	0.10	--	0.05
70	2.00	--	53	53	--	46	28	--	4.41	2.42
70	4.00	23	55	78	30	48	40	2.34	4.57	3.56
70	5.00	1	--	1	1	--	1	0.10	--	0.05
70	7.00	49	7	56	65	6	29	4.98	0.58	2.56
70	10.0	3	--	3	4	--	2	0.31	--	0.14
100	2.00	--	4	4	--	4	2	--	0.33	0.18
100	4.00	4	50	54	5	44	27	0.41	4.16	2.47
100	5.00	1	--	1	1	--	1	0.10	--	0.05
100	7.00	13	56	69	16	48	35	1.32	4.66	3.15
100	10.0	64	4	68	78	4	35	6.50	0.33	3.11
150	4.00	--	5	5	--	4	2	--	0.42	0.23
150	7.00	3	55	58	10	46	39	0.31	4.57	2.65
150	10.0	28	56	84	90	47	57	2.84	4.66	3.84
150	15.0	--	3	3	--	3	2	--	0.25	0.14
200	4.00	--	1	1	--	1	1	--	0.08	0.05
200	7.00	--	3	3	--	2	1	--	0.25	0.14
200	10.0	7	53	60	9	49	32	0.71	4.41	2.74
200	15.0	3	50	53	--	46	28	--	4.16	2.29
200	20.0	71	1	72	91	2	38	7.21	0.17	3.34
300	7.00	1	1	2	1	1	1	0.10	0.08	0.09
300	10.0	--	6	6	--	5	3	--	0.50	0.27
300	15.0	--	50	50	--	45	26	--	4.16	2.29
300	20.0	20	51	71	26	46	38	2.03	4.24	3.24
300	30.0	57	4	61	73	3	32	5.79	0.33	2.79
400	15.0	--	1	1	--	3	1	--	0.08	0.05
400	20.0	2	18	21	3	47	20	0.20	1.50	0.91
400	30.0	54	19	71	83	50	70	5.48	1.58	3.34
400	40.0	2	--	2	3	--	2	0.20	--	0.09
400	50.0	7	--	7	11	--	7	0.71	--	0.32
450	30.0	2	--	2	66	--	66	0.20	--	0.09
450	40.0	1	--	1	33	--	33	0.10	--	0.03
500	40.0	1	--	1	8	--	8	0.10	--	0.05
500	50.0	12	--	12	92	--	92	1.22	--	0.55
total des colonnes		985 =N1	1203 =N2	2188 =N				100%	100%	100%

avec n1 : nombre de mesures réalisées pour chaque AB/2 et MN en 1988, n2 : idem pour 1989, n : idem pour 1988 et 1989 (n=n1+n2), N1 : nombre total de mesures effectuées en 1988, N2 : idem pour 1989, N : idem pour 1988 et 1989 (N=N1+N2).

On remarque d'après le tableau 4 que sur ce type de terrain on est pratiquement obligé de changer de longueur MN à chaque nouvelle longueur AB. Car d'un AB à l'autre, à cause du faible signal reçu pour la d.d.p. entre MN et de son fort bruitage, on doit souvent travailler avec un MN égal à AB/10 pour avoir une mesure correcte. Cela est d'autant plus vrai que l'on va vers les grands écartements et que l'on atteint les horizons plus conducteurs en profondeur.

Sur les courbes de résistivité apparente en fonction de  $AB/2$ , on n'obtient donc pas comme cela se fait ailleurs, de longues séries de mesures avec une même longueur  $MN$ . Ces courbes sont très morcelées. D'après les mesures de terrain, on s'aperçoit que souvent le changement de  $MN$  ne modifie que très peu les valeurs de résistivité apparente obtenue pour un même  $AB$  (Figure 32). C'est surtout vrai pour les valeurs les plus faibles de résistivité apparente vers le bas de la courbe, et après, sur la branche ascendante, où ces variations, appelées "à-coups de prise", sont très faibles. Mais même pour la partie descendante de la courbe, où la pente est très forte, les changements de valeurs dus au déplacement des  $MN$  restent assez faibles.

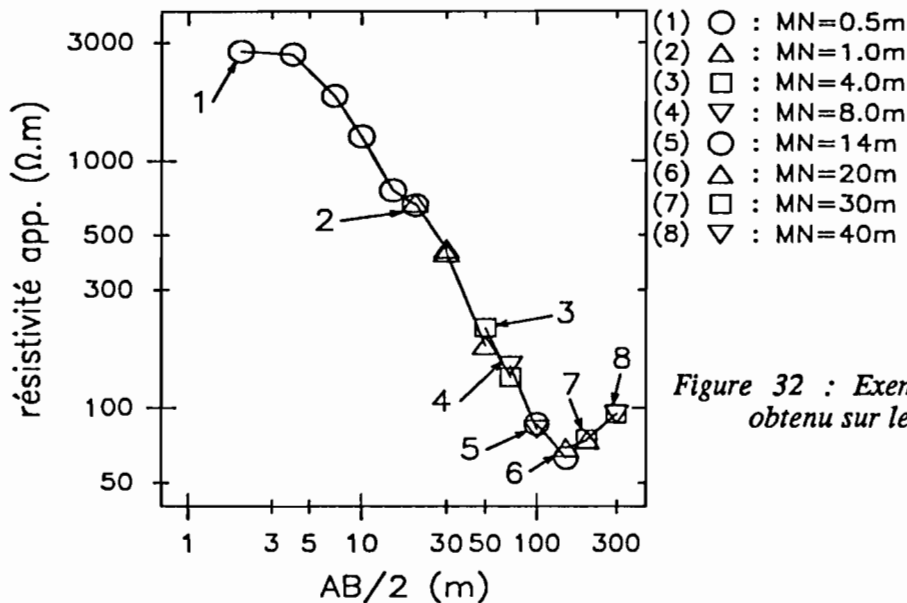


Figure 32 : Exemple de sondage électrique obtenu sur le secteur de Banankoro.

### B. Les caractéristiques du signal émis

La période du signal émis retenue pour l'ensemble des mesures est de 8 secondes. Elle se décompose de la façon suivante : 2 secondes d'injection positive, 2 secondes de coupure, 2 secondes d'injection négative et 2 secondes de coupure. Le rapport entre le temps d'émission et le temps de coupure est donc de 1/1.

### C. L'emploi d'eau salée pour les contacts électrodes-sol

Pour avoir un bon contact entre les électrodes et le sol, on doit les arroser d'eau salée. En milieu de saison sèche (janvier, février et mars), les niveaux supérieurs du profil d'altération sont très secs. Il faut verser à plusieurs reprises l'eau salée dans le trou de l'électrode, en laissant à chaque fois le temps à l'eau d'imbiber le sol. En une journée de travail, on réalise deux SE soit environ 150 contacts électrode-sol. La quantité d'eau consommée chaque jours sur le terrain est alors de 160l, soit plus d'un litre par contact. Sur notre secteur, à cette époque de l'année les marigots sont pratiquement complètement à sec. Seules subsistent en de rares endroits de petites mares d'eau stagnante, souvent cachées ou alors inabordable. Il faut donc transporter 160l d'eau salée tous les jours. Cette solution est obtenue en diluant environ 300g de NaCl dans 20l d'eau de nappe, soit une concentration d'environ  $15\text{g l}^{-1}$ .

### D. L'emploi de bobines supplémentaires pour les grandes longueurs AB

Quand en fin de travail on rembobine les câbles électriques, il se pose alors le problème de leur résistance à la traction. Pour des longueurs de lignes de 400 à 500m, les câbles se rompent très souvent. Pour parer à cela, on met en place dès 200m une nouvelle bobine en relais pour tirer les 100 à 300m restants.



## E. L'entretien des batteries

Pour abaisser leur coût de revient, les batteries d'origine servant à l'alimentation des appareils ont été remplacées par des batteries de voiture du type 12 volts et 36 ampères/heure. L'emploi d'un testeur de charge se révèle très utile, car sur une journée de travail la capacité des batteries chute de beaucoup. Et tous les soirs, il faut les recharger à l'aide d'un groupe électrogène pendant une heure. Mais cela ne suffit pas. Au bout d'une dizaine de jours, il faut les recharger davantage pendant au moins trois heures. En cas de décharge trop importante sur le terrain, on peut se dépanner en se branchant sur la batterie du véhicule tout terrain.

## F. L'entretien des câbles

A cause de la forte température (> 35°C l'après-midi) et du fort ensoleillement régnant sur le terrain, l'usure de la gaine plastique protégeant les fils électriques est rapide : elle durcit et devient cassante. Il faut veiller à son entretien en appliquant du chattering et en coupant régulièrement sur plusieurs mètres l'extrémité du câble qui sert le plus.

## G. La vérification des contacts électrodes-sol

Sur le terrain, il faut constamment vérifier les contacts électriques. En effet, si une série de mesures avec la même disposition d'électrodes dure longtemps (plus de dix minutes), il arrive que la résistance entre les électrodes AB ou MN change et remonte, car l'eau s'est évaporée ou a été complètement absorbée par le sol. Et souvent cela ne concerne qu'une des deux électrodes. Il faut alors l'identifier et l'humidifier à nouveau. Pour cela on utilise un ohmmètre. Si on le branche sur la prise de terre d'un des appareils, à condition qu'elle même ait un bon contact avec le sol, et si on le relie à l'électrode testée, il permet de repérer l'électrode qui a un mauvais contact. C'est un gain de temps précieux quand il s'agit de l'électrode A ou B pour les grands écartement

## H. L'emploi de plaques métalliques comme électrode

Sur les zones où les cuirasses affleurent, il est impossible de planter les électrodes. L'induration des cuirasses est trop forte. C'est le problème majeur rencontré quand on ne possède pas de marteau piqueur. Il a été réglé de trois façons :

- la première façon consiste à rechercher une fissure dans la cuirasse ou mieux encore une termitière et d'y planter l'électrode. C'est très efficace. Mais cela n'est possible que pour les grands AB de plus de 200m, où la précision de l'alignement et de la valeur de l'écartement permet de choisir un peu le point d'implantation.
- la deuxième façon emploie des plaques métalliques à la place des piquets couramment utilisés comme électrode .

Ces plaques sont de forme carrée de 15 cm de côté. L'extrémité du câble s'y fixe directement par un trou percé en son centre. Elle ne repose pas directement sur le sol. On met d'abord une couche de quelques centimètres de terre argileuse provenant d'une termitière, on la broie et on arrose abondamment d'eau salée. On place par dessus une plaque de mousse plastique spongieuse de 5cm d'épaisseur, que l'on arrose aussi d'eau salée. On pose la plaque métallique par dessus. On écrase l'ensemble par des poids ou des blocs de cuirasse pour faciliter les contacts.

Pour les petites longueurs AB, cette technique s'est révélée d'une aide capitale. C'est grâce à elle que l'on pouvait abaisser assez la résistance entre A et B à environ 60000Ω, pour que l'émetteur puisse fonctionner. Avec ce système, l'eau salée finit par oxyder les pinces métalliques qui relient le câble électrique à la plaque. Le contact devient alors de plus en plus mauvais. Il suffit alors de vérifier les pinces avec l'ohmmètre avant de commencer les mesures, et d'en avoir une bonne réserve.

- la troisième façon réduit l'emploi des plaques, et permet l'emploi des piquets pour les petites longueurs MN. En effet il suffit parfois de tasser un peu de terre de termitière bien humide en une petite motte sur la cuirasse et d'y planter l'électrode, pour fermer correctement le circuit.



## I. Conclusion

D'un point de vue pratique, les caractéristiques géoélectriques des profils latéritiques posent des problèmes pour réaliser les mesures :

- à cause des très fortes résistivités des niveaux superficiels, il faut des appareils puissants pour l'injection du courant ;
- les très faibles résistivités des niveaux argileux humides profonds posent le problème du rapport signal sur bruit qui doit être assez fort pour obtenir des valeurs cohérentes ;
- l'épaisseur du profil si on veut atteindre la roche saine imposent l'emploi d'appareils d'autant plus sensibles qu'ils sont légers.

Mais avec de l'expérience, une équipe bien rodée, de bons appareils et quelques astuces, la routine s'installe.

## VI. LES CARACTERISTIQUES GEOELECTRIQUES DU MILIEU LATERITIQUE

On trouve dans la littérature des exemples de mesures électriques effectuées sur des zones latéritiques, mais dans des buts différents. Les exemples les plus nombreux proviennent des hydrogéologues (MATHIEZ et HUOT, 1966 ; ENGALENC, 1978 ; BERNARDI et MOUTON, 1981 ; PALACKY *et al.*, 1981). Ils concernent surtout l'Afrique tropicale sèche. Ils s'intègrent dans le cadre très général de l'exploration des nappes d'eaux souterraines, exploitables pour les travaux hydrauliques villageois. Dans ce domaine, la technique du SE est couramment utilisée. D'autres exemples proviennent de l'exploration minière sur les continents africain et sud-américain (PALACKY et KADEKARU, 1979 ; PERIC, 1981). Le SE y est souvent combiné aux méthodes géophysiques électro-magnétiques pour localiser des minéralisations dans les manteaux d'altération. Pour certaines études de structures tectoniques assez localisées, les méthodes électriques servent encore (DORBATH *et al.*, 1975). Elles mettent alors en évidence les directions tectoniques en recherchant les zones de fractures masquées par le manteau d'altération. Dans le domaine de la recherche sur les couvertures d'altération proprement dites, l'emploi du SE est rare (ALBOUY *et al.*, 1970 ; BOULANGE et CARN, 1971). C'est la première fois à notre connaissance, qu'un même secteur est couvert par autant de SE dans le but d'étudier l'organisation du manteau d'altération à l'échelle du paysage.

### A. Des exemples de sondages électriques concernant les latérites

On présente ci-dessous une série d'ouvrages ou d'articles, classés chronologiquement, qui donnent des caractéristiques géoélectriques sur des profils d'altération de type latéritique.

#### 1. Mathiez et Huot (1966)

En 1966, MATHIEZ et HUOT étudient les différents types d'aquifères présents dans les profils d'altération développés sur un socle cristallin en Afrique de l'Ouest. D'après leurs données, l'épaisseur moyenne totale des profils est généralement de 20 à 30m ; elle peut atteindre en certains endroits 60m, ce qui est alors qualifié par les auteurs de considérable.

Des valeurs de résistivité vraie sont données pour chaque horizon :

- la carapace ferrugineuse (1) a une résistivité vraie variant de 10000 à 300 $\Omega$ m, celle de la zone de transition à concrétions (2) va de 300 à 100 $\Omega$ m, celle de la base argileuse à canalicules (3) varie aussi de 300 à 100 $\Omega$ m ;
- les arènes fluentes (4) ont une résistivité vraie allant de 30 à 3 $\Omega$ m, celle du granite altéré (5) varie de 200 à 30 $\Omega$ m ;
- la résistivité vraie du socle (6) est supérieure à 200 $\Omega$ m.

MATHIEZ et HUOT remarquent en se référant au principe de suppression que sur les diagrammes des SE les niveaux (2), (3) et (5) sont souvent invisibles : la courbe des résistivités apparentes obtenues en

fonction de  $AB/2$  est donc du type 3 couches avec les niveaux (1), (4) et (6). De plus avec la succession résistant-conducteur-résistant :  $\rho_{(1)} > \rho_{(4)} < \rho_{(6)}$ , la courbe a l'allure d'un V ou encore d'un fond de bateau.

## 2. Albouy, Pion et Wackermann (1970)

En 1970, ALBOUY, PION et WACKERMANN donnent les résultats de SE réalisés au Sénégal oriental et en Haute-Volta pour des zones où l'épaisseur du profil est faible. Leur but est d'aider l'implantation de puits pour étudier directement le profil latéritique à l'aide de SE.

Les 41 SE entrepris sont du type 3 couches en fond de bateau (Figure 33). En moyenne l'épaisseur totale du profil d'altération est de 10m, parfois elle dépasse 15m, et elle peut atteindre 35 à 60m. Les auteurs remarquent que l'interprétation du SE donne une épaisseur totale souvent supérieure à la réalité.

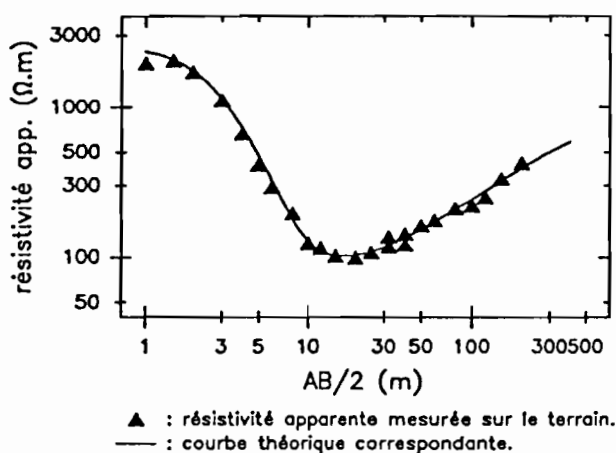


Figure 33 : Exemple de sondage électrique réalisé sur granite d'après ALBOUY et al., 1970.

L'épaisseur de la première couche rencontrée, appelée sol, est très variable, mais elle reste inférieure à 5m. Leurs résistivités s'échelonnent de 11 à 35000 Ohm.m, la moyenne se situant vers 100 Ohm.m.

Pour la deuxième couche rencontrée, dit manteau d'altération, son épaisseur est toujours nettement supérieure à celle du sol. Elle varie beaucoup, la plupart des valeurs sont de l'ordre de 10m, avec comme minimum 1,5m et comme maximum une valeur mal déterminée de 35 à 60m. Ses résistivités vraies vont de 6 à 100 Ohm.m.

La troisième couche correspond à la roche saine.

ALBOUY *et al.* ont classés ces profils selon 4 types de manteau d'altération dits:

- 1- à argiles gonflantes,
- 2- à kaolinite et argiles gonflantes,
- 3- à kaolinite,
- 4- arénacé ou encore appelé roche peu altérée.

Les résistivités vraies du manteau se distribuent alors de la manière suivante :

$$\rho_{\text{arg.gonfl.}} < \rho_{\text{arg.gonfl.+kaol.}} < \rho_{\text{kaol.}} < \rho_{\text{arèn.}}$$

Pour ces différents domaines les limites sont les suivantes (en Ohm):

- argiles gonflantes :  $6 \leq \rho \leq 14$ ,
- argiles gonflantes+kaolinite :  $15 \leq \rho \leq 25$ ,
- kaolinite :  $20 \leq \rho \leq 30$ ,
- arène :  $50 \leq \rho < 100$ .

Les auteurs remarquent que tous ces SE sont incapables de "voir" les nappes phréatiques.

## 3. Boulangé et Carn (1971)

En 1971, BOULANGE et CARN présentent les résultats d'une prospection électrique en Côte d'Ivoire sur différents secteurs cuirassés. Ces auteurs ont réalisés 9 SE sur des surfaces bauxitiques, 1 sur une

surface intermédiaire, 4 sur des surfaces de haut glacis et 1 sur une surface de moyen glacis. Les roches-mères sont variées : il s'agit d'amphibolites, de métadolérites, de roches vertes, de roches volcaniques basiques et de schistes. BOULANGE et CARN ont étalonné leurs mesures d'après 4 puits creusés dans une cuirasse bauxitique, dans une cuirasse bauxitique démantelée, dans une cuirasse intermédiaire et dans une cuirasse de haut glacis. Les 2 premières cuirasses se sont développées sur des amphibolites, la troisième sur des roches vertes et la dernière sur des schistes.

D'après ces étalonnages, BOULANGE et CARN distinguent trois catégories de résistivités :

- des très fortes résistivités (3000 à 10000 $\Omega$ m) pour les différents types de cuirasses en fonction de leur degré d'induration et de la teneur en fer,
- des résistivités moyennes (1000 à 3000 $\Omega$ m) qui marquent les horizons sous cuirasses : argiles tachetées, schistes ferruginisés, mais aussi bauxites mal indurées,
- des faibles résistivités (< 100 $\Omega$ m) pour les lithomarges argileuses formées par une kaolinite très pure.

D'après les 15 SE, l'épaisseur des horizons cuirassés et de la zone des argiles tachetées varie jusqu'à 10m, elle est comprise entre 10 et 60m pour la lithomarge argileuse et entre 10 et 40m pour les schistes altérés. En conclusion, BOULANGE et CARN donnent un tableau (Tableau 5) qui récapitule les caractéristiques électriques des différents horizons des profils en fonction du type de cuirassement.

#### 4. Dorbath, Froidevaux, Blot et Carn (1975)

En 1975, DORBATH, FROIDEVAUX, BLOT et CARN montrent l'utilisation du SE faite au Sénégal oriental pour aborder la tectonique du massif granitique de Saraya, masquée par un manteau d'altération. En effet, les SE arrivent à distinguer les profils d'altération développés sur les dykes basiques, qui soulignent la tectonique cassante subie par le massif, de ceux développés sur le granite.

Ainsi sur les dykes doléritiques, les courbes ont la forme très particulière d'un V bien pointu, le creux du V correspond à des résistivités apparentes minimales toujours inférieures à 50 $\Omega$ m, tombant même parfois à 10 $\Omega$ m (Figure 34). En revanche, sur le granite, les courbes présentent un fond de bateau assez plat et large, qui correspond à des résistivités apparentes minimales de 150 à 200 $\Omega$ m.

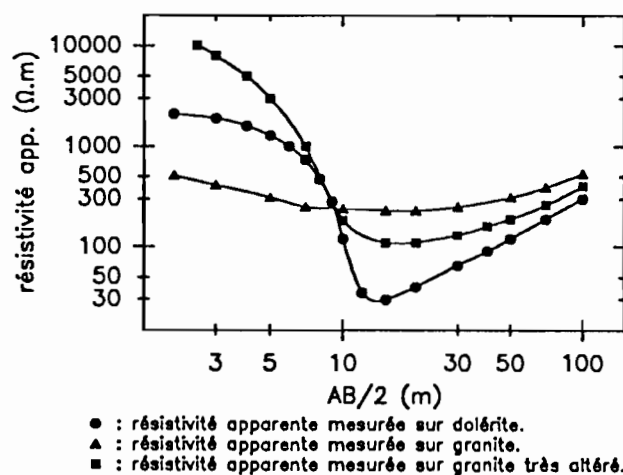


Figure 34 : Exemples de sondages électriques réalisés sur dolérite, sur granite et sur granite très altéré d'après DORBATH et al., 1975.

Toutes les courbes sont du type 3 couches. Pour ces auteurs, le premier terrain résistant correspond à la cuirasse, le conducteur à la lithomarge et le dernier résistant à la roche saine. Or ils notent que les puits révèlent un quatrième terrain, l'arène, situé entre la lithomarge et la roche saine. Cette arène contient la nappe phréatique des roches basiques. La résistivité vraie de ce niveau étant proche de celle de la roche saine et son épaisseur relativement faible, il reste invisible sur les SE par le principe de suppression.

Tableau 5 : Relations entre les résistivités apparentes et les horizons des différentes surfaces cuirassées selon BOULANGE et CARN, 1971.

résistivité appa- rente (ohm.m)	surface bauxitique		surface intermédiaire	haut glacis			moyen glacis
<100	recouvrement humifère - néosol						
100 - 1000	recouvrement meuble avec blocs, graviers, gravillons - cuirasse démantelée						
>10000	cuirasse compacte ferro-alumineuse		cuirasse compacte ferrugineuse				
1000 - 10000	cuirasse alumino- ferrugineuse			cuirasse ferrugineuse			cuirasse ferrugineuse
500 - 3000	bauxite possible		argile ferruginisée ou partiellement indurée (kaolinite)	nappe d'eau temporaire avec un mur argileux (50 - 500)			
	argile ferruginisée (kaolinite)	schistes altérés (peut-être bauxitisés)		argile tachetée ferruginisée partiellement indurée	schistes altérés ferrugi- nisés	horizon tacheté argilo- sableux granites altérés	
<100	kaolinite		kaolinite	kaolinite			kaolinite et argile 2/1
~500		schistes			schistes		
infinie	roches volcaniques basiques		roches volcaniques basiques	roches volcani- ques basiques		granites	roches volcaniques basiques

### 5. Engalenc (1978)

En 1978, ENGALENC propose une réorientation des recherches d'eau souterraine par géophysique vers les zones de fracturation situées à la base des profils d'altération. Il fait une synthèse de nombreux chantiers africains.

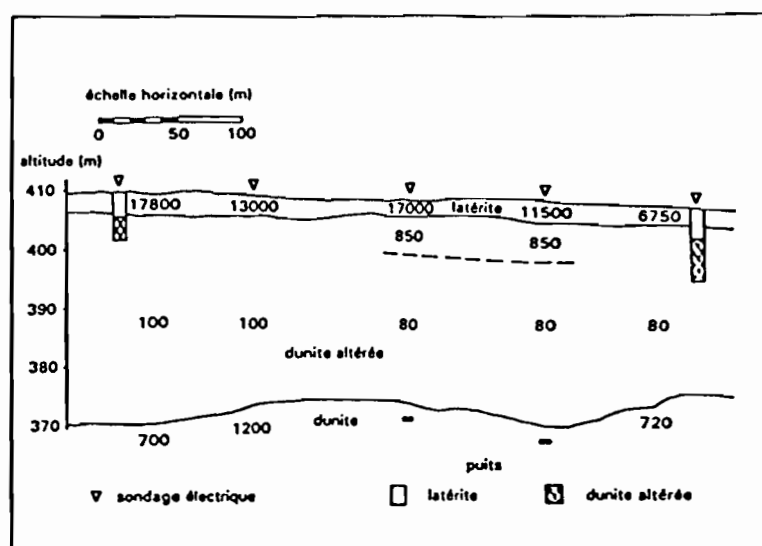
D'une manière très générale, Engalenc donne les résistivités vraies des horizons rencontrés :

- ainsi la carapace ferrugineuse présente une résistivité vraie variant de 300 à 10000 $\Omega$ m,
- la résistivité vraie de la cuirasse va de 300 à plus de 15000 $\Omega$ m,
- celle de la zone de transition à concrétions varie de 100 à 300 $\Omega$ m,
- pour la base argileuse à canalicules elle est comprise entre 100 et 300 $\Omega$ m,
- pour l'arène fluente entre 3 et 30 $\Omega$ m,
- pour l'arène sableuse entre 50 et 60 $\Omega$ m,
- pour l'arène grenue entre 15 et 90 $\Omega$ m,
- pour le granite fissuré et altéré entre 30 et 200 $\Omega$ m,
- pour le granite sain elle est supérieure à 200 $\Omega$ m,
- l'altération sur roches vertes est à 10 $\Omega$ m,
- les roches vertes altérées sont entre 10 et 80 $\Omega$ m,
- l'altération sur schistes entre 5 et 30 $\Omega$ m,
- les schistes altérés entre 250 et 400 $\Omega$ m,
- et les schistes sains ont une résistivité vraie de plus de 1000 $\Omega$ m.

La forme des courbes des SE est encore du type fond de bateau. Elles se terminent généralement par une branche montante correspondant au substratum résistant. Cependant, les arènes grenues, peu épaisses, sont souvent invisibles sur les diagrammes. De plus il n'est pas possible de distinguer les arènes grenues de la zone fissurée du toit du socle. La précision apportée dans l'évaluation des profondeurs est donc assez faible. La profondeur est en générale surestimée par rapport à la réalité, si bien que dans 50% des cas seulement, le SE permet de donner avec précision la profondeur du socle.

### 6. Palacky et Kadekaru (1979)

En 1979, PALACKY et KADEKARU rappellent les variations des caractéristiques électriques des profils d'altération tropicaux par 5 exemples régionaux brésiliens. Ainsi à Santa Fe, dans l'état de Goiás, la couverture latéritique d'une dunite nickélfère est étudiée par SE pour localiser les éventuelles minéralisations.



les nombres sont des résistivités interprétées en  $\Omega$ m

Figure 35 : Exemple de coupe géoélectrique dans une latérite nickélfère d'après PALACKY et KADEKARU, 1979.

Les courbes obtenues sont du type fond de bateau à trois et parfois quatre terrains.

Le niveau supérieur résistant, correspondant à l'horizon latéritique supérieur induré, a des résistivités vraies allant de 6750 à 178000 $\Omega$ m, et une épaisseur moyenne de 3m (Figure 35). Le niveau conducteur sous-jacent, appelé dunite altérée, a une résistivité homogène variant de 80 à 100 $\Omega$ m, et une épaisseur d'environ 35m. La résistivité de la dunite saine va de 700 $\Omega$ m à l'infini. En quelques endroits, apparaît un niveau supplémentaire situé directement sous l'horizon latéritique induré, sa résistivité est de 850 $\Omega$ m et son épaisseur de 7m.

### 7. Bernardi et Mouton (1981)

En 1981, BERNARDI et MOUTON montrent l'apport de la géophysique dans la recherche de nappes au débit supérieur à 2-5m<sup>3</sup>/h. Pour le SE, leurs données proviennent de 3000 stations implantées au Togo, Haute-Volta, Bénin, Kenya, Ghana et Zambie. Dans toutes ces régions les SE ont une allure en fond de bateau mettant en évidence la superposition de 3 milieux électriquement différenciés (Figure 36).

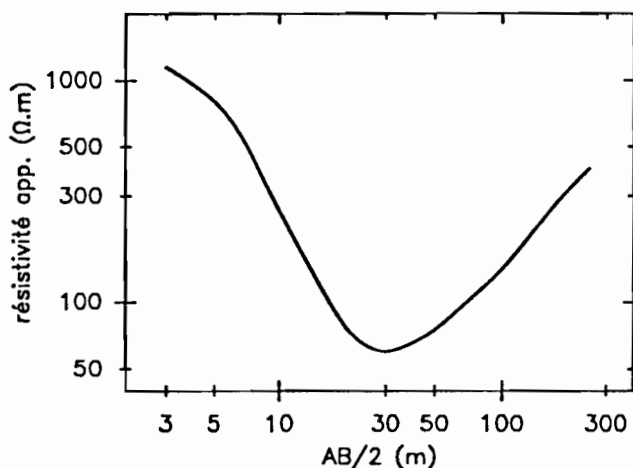


Figure 36 : Exemple de sondage électrique réalisé sur granite en Haute-Volta d'après BERNARDI et MOUTON, 1981.

Le premier niveau, appelé recouvrement résistant, a une résistivité vraie variant entre 100 et 3000 $\Omega$ m. Il correspond toujours à un milieu sec englobant l'éventuelle carapace latéritique et la partie supérieure de la couche d'altération argilo-sableuse. Le deuxième niveau, appelé complexe conducteur, a une résistivité apparente vraie allant de 10 à 100 $\Omega$ m. Il comprend toujours la base saturée d'eau de la couche d'altération et les niveaux humides sous-saturés qui la prolonge vers le haut. Il peut englober dans certains cas la zone fissurée du substratum encore sain. Le troisième niveau, résistant, correspond à la roche-mère saine. Sa résistivité apparente est supérieure à 500 $\Omega$ m.

### 8. Peric (1981)

En 1981, PERIC décrit l'emploi des méthodes électriques dans l'exploration de latérites nickélicifères au Burundi. Les courbes des SE obtenues sont du type fond de bateau à quatre couches avec  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$  (Figure 37). A partir des SE, le profil d'altération se décompose selon les horizons suivants, de haut en bas :

- La partie supérieure du profil se distingue par son fort degré d'induration. Elle contient des concrétions ferrugineuses (pisolites), qui sont partiellement cimentées pour former comme un type de brèche. Elle est appelée canga selon la nomenclature de B.N. Webber (1972). Sa résistivité vraie varie entre 4000 et 10000 $\Omega$ m.
- En-dessous, un matériau résiduel poreux, friable et de texture fine est désigné sous le terme de ferrallite. Il est essentiellement composé par des hydroxydes de fer. Sa couleur va du brun-violet au rouge, noir ou violet. Sa résistivité est comprise entre 600 et 1200 $\Omega$ m.
- Puis un niveau argileux et meuble sous-jacent est appelé saprolite. Il est moins ferrugineux, sa couleur reste dans les tons crème avec fréquemment du jaune et du vert. Sa résistivité est faible, elle va de 5 à 25 $\Omega$ m.
- Tout à la base se trouve la roche saine, dont la résistivité est supérieure à 200 $\Omega$ m. La transition entre la saprolite et la roche saine est abrupte, son épaisseur est comprise entre 1 et 3m. Parfois elle est plus graduelle, il apparaît alors un niveau supplémentaire appelé roche mère saprolitisée.

L'erreur moyenne sur l'épaisseur totale estimée du profil est de 15% par rapport à la réalité.

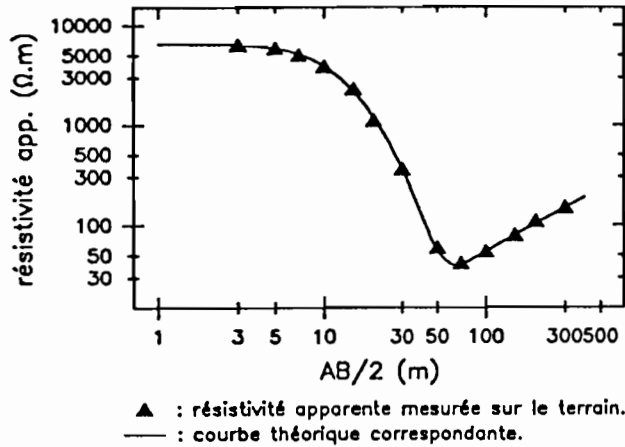


Figure 37 : Exemple de sondage électrique réalisé sur des latérites nickelifères au Burundi d'après PERIC, 1981.

### 9. Palacky, Ritsema et De Jong (1981)

En 1981, PALACKY, RITSEMA et DE JONG présentent une prospection électromagnétique des eaux souterraines en Haute-Volta sur des terrains précambriens. Plusieurs SE ont été réalisés afin de reconnaître les caractéristiques géoélectriques du profil d'altération. Comme les précédents, ils ont une allure en fond de bateau à 3 couches. Sur les séries volcano-sédimentaires du Précambrien C, l'épaisseur totale du profil varie entre 15 et 40m. Sur les zones granitiques, l'épaisseur totale du profil est inférieure à 15m.

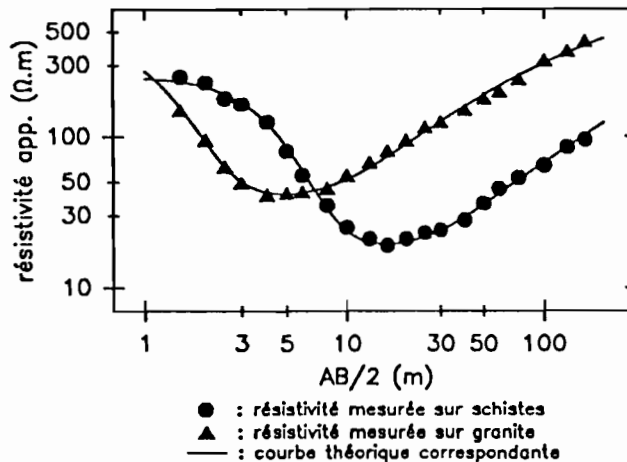


Figure 38 : Exemples de sondage électrique réalisé sur schistes et sur granite en Haute-Volta d'après PALACKY et al., 1981.

Un exemple de courbe sur schistes donne les horizons suivants (Figure 38):

- un niveau supérieur mince et résistant (2m et 250Ωm) correspondant à la croûte latéritique,
- un niveau intermédiaire épais et conducteur (23m et 18Ωm) correspondant à un complexe argileux,
- un niveau inférieur résistant (> 500Ωm) pour la roche saine.

Un autre exemple de courbes sur granite est donné (Figure 38):

- un niveau supérieur, appelé sol latéritique, est fin et résistant (0,6m et 450Ωm),
- le niveau conducteur est moins développé et plus résistant que celui des séries volcano-sédimentaires (8m et 38Ωm),
- la roche mère est très résistante (> 500Ωm).

La zone de transition entre la roche saine et le complexe argileux mise en évidence dans les puits n'apparaît pas sur les SE à cause du changement graduel de ses caractéristiques.

## B. Conclusion

Les premiers exemples de SE réalisés sur des latérites datent au moins de plus de vingt ans, malgré cela ils restent rares dans la littérature scientifique. Les sites d'étude sont très dispersés, et sur un même site le nombre des SE est faible. De plus ces travaux ont été réalisés avec des objectifs divers, à l'aide d'appareils de différents types. Tout cela fait que chaque exemple semble un cas particulier. Et finalement il est difficile à priori d'intégrer ces exemples dans un nouveau travail comme celui qui est présenté ici.

## C. Les travaux réalisés sur le secteur de Banankoro par la méthode des sondages magnéto-telluriques

Concernant de près notre travail, une étude géophysique du sous-sol du secteur de Banankoro a été réalisée avec la méthode magnéto-tellurique (PHAM et BOYER, 1988 ; PHAM *et al.*, 1988 et 1989). Il y a eu une étroite collaboration entre l'équipe "magnéto-tellurique" et l'équipe "électrique", aussi bien d'un point de vue pratique puisqu'on a effectué les mesures sur les mêmes stations pendant les mêmes périodes de l'année, que d'un point de vue scientifique puisque les résultats des sondages magnéto-telluriques ont servi de base à l'interprétation des SE.

### 1. La méthode magnéto-tellurique

La méthode magnéto-tellurique (en abrégé M.T.) fait partie des méthodes électromagnétiques. Elle utilise comme source le champ électromagnétique naturel qui a un spectre de fréquences extrêmement large puisqu'il va de  $10^{-5}$  Hz pour les plus basses fréquences jusqu'à  $10^4$  Hz pour les plus hautes fréquences.

En un lieu donné, le champ magnétique terrestre et le champ tellurique, c'est-à-dire le champ électrique naturel, varient constamment et de façons aléatoires. D'après leurs enregistrements, on remarque qu'il existe une étroite corrélation entre eux. C'est CAGNIARD qui en 1953 apporta une explication théorique à ce phénomène en établissant une relation mathématique entre les variations magnétiques et telluriques qui fait intervenir la résistivité électrique du sol. La principale hypothèse faite par CAGNIARD pour bâtir la théorie de la M.T. est celle d'une nappe tellurique uniforme, ce qui suppose une source d'excitation électromagnétique très lointaine. Cette hypothèse est généralement vérifiée car les sources électromagnétiques naturelles sont d'origine soit ionosphérique, soit orageuse. Pour cette dernière origine, il suffit donc que l'orage atmosphérique reste suffisamment éloigné.

En considérant dans un premier temps, un sous-sol homogène de résistivité uniforme  $\rho$  et une excitation sinusoïdale de période  $T$  d'origine lointaine donnant lieu à une nappe tellurique uniforme parallèle à l'axe  $O_x$ , les équations de MAXWELL permettent d'exprimer dans tout l'espace la composante  $E_x$  du champ tellurique et la composante  $H_y$  du champ magnétique associé qui lui est orthogonale. Alors, dans le sous-sol, à une profondeur  $z$ , les variations de  $E_x$  et de  $H_y$  en fonction du temps  $t$ , s'expriment dans le système d'unités électromagnétiques par :

$$E_x = e^{-z/P} \cos((2\pi t/T) - (z/P)) \quad (36)$$

et

$$H_y = (2T/\rho)^{1/2} e^{-z/P} \cos((2\pi t/T) - (z/P) - (\pi/4)), \quad (37)$$

$$\text{avec } P = (\rho T)^{1/2} / 2\pi. \quad (38)$$

Les champs magnétique et tellurique varient donc sinusoïdalement dans le temps avec la même période  $T$  que l'excitation d'origine. Les formules ci-dessus montrent le phénomène de décroissance exponentielle de l'amplitude du champ électromagnétique en profondeur avec le coefficient  $e^{-z/P}$ . Cette décroissance est caractérisée par le paramètre  $P$  qui a les dimensions physiques d'une longueur et qui s'appelle "profondeur de pénétration". Ce paramètre  $P$  est d'autant plus grand que la période  $T$  est grande et que la résistivité  $\rho$  est grande. La profondeur de pénétration a une définition purement mathématique. Elle ne représente pas la profondeur d'investigation qui, elle, dépend en plus de la structure du sous-sol. Néanmoins, les valeurs de  $P$  donnent une idée sur la possibilité d'atteindre des



structures profondes. Avec  $P$  exprimé en km,  $T$  en seconde et  $\rho$  en  $\Omega\text{m}$ , l'expression (38) devient:

$$P = (10 \rho T)^{1/2} / 2\pi. \quad (39)$$

Le tableau 6 donne quelques valeurs de la profondeur de pénétration.

Tableau 6 : Exemples de valeur de la profondeur de pénétration en fonction de la résistivité du sol et de la période du signal.

résistivité en $\Omega\text{m}$	période $T$ en seconde			
	1/3000	1/145	1/8	1
10	0.029	0.132	0.563	1.593
100	0.092	0.418	1.779	5.033
1000	0.291	1.322	5.627	15.915

A la surface du sol où  $z = 0$ , les expressions (36) et (37) deviennent :

$$E_x = \cos(2\pi t/T) \quad (40)$$

et

$$H_y = (2T/\rho)^{1/2} \cos((2\pi t/T) - (\pi/4)). \quad (41)$$

Les expressions (40) et (41) mettent en évidence qu'à la surface d'un sol homogène, le champ magnétique est déphasé de  $\pi/4$  par rapport au champ tellurique.

Le rapport des amplitudes  $|E_x|$  et  $|H_y|$  a pour valeur :

$$|E_x| / |H_y| = (\rho/2T)^{1/2}. \quad (42)$$

On en déduit :

$$\rho = 2T (|E_x| / |H_y|)^2. \quad (43)$$

Avec comme unités pratiques  $E_x$  en mvolts/km,  $H_y$  en gammes,  $T$  en secondes et  $\rho$  en  $\Omega\text{m}$ , l'expression (43) devient :

$$\rho = 0.2T (|E_x| / |H_y|)^2. \quad (44)$$

Cette expression (44) est la fameuse formule de CAGNIARD qui est à la base de la M.T. Elle montre la possibilité d'obtenir la résistivité du terrain à partir de la mesure d'une composante tellurique et d'une composante magnétique, orthogonales entre elles.

Pour étudier des cas de terrain, il faut passer d'un sol homogène à un sol hétérogène. La technique du sondage magnéto-tellurique appliquée par l'équipe de PHAM sur le secteur de Banankoro est fondée pour l'interprétation des mesures sur la même hypothèse que pour les SE : celle d'un sous-sol à structures tabulaires, c'est-à-dire formé par un empilement de couches horizontales électriquement homogènes. Dans ce cas, la formule (44) ne donne plus une résistivité vraie mais une résistivité apparente  $\rho_a$  comme pour les SE.

D'après la profondeur de pénétration  $P$ , quand on augmente la période  $T$ , la résistivité apparente  $\rho_a$  mesurée varie en fonction des terrains plus profonds. Le sondage magnéto-tellurique consiste donc à enregistrer simultanément en une station donnée, les variations du champ tellurique suivant une direction quelconque, soit  $E_x$ , et les variations du champ magnétique suivant une direction

perpendiculaire, soit  $H_y$ , et à faire en suite une analyse harmonique pour obtenir leur spectre d'amplitude, et finalement à appliquer la formule (44) pour construire la courbe de  $\rho_a$  en fonction de T.

L'interprétation de cette courbe se fait soit par des abaques, soit par un calcul direct par ordinateur. Finalement on obtient les résistivités et les épaisseurs des terrains intéressés.

A chaque station, les mesures ont été réalisées suivant deux directions magnétiques orthogonales : EW et NS. Pour chaque direction de mesure, douze valeurs de résistivité apparente sont obtenues sur douze fréquences, qui sont : 3, 5, 8, 13, 21, 34, 80, 170, 380, 680, 1300 et 2500Hz.

Mais sur le terrain, avec la fréquence la plus forte (2500Hz), la profondeur de pénétration théorique ( $P = (10 \rho T)^{1/2} / 2\pi$ ), qui est la plus faible, atteint le kilomètre à cause de la très forte résistivité des niveaux cuirassés affleurants ( $\approx 10000\Omega m$ ). Par conséquent, l'influence des couches résistantes en surface devient négligeable. Il faut donc compléter les mesures vers les plus hautes fréquences par la technique "V.L.F.". Elle consiste à capter les signaux émis par les émetteurs de télécommunication des sous-marins, dans la gamme des ondes radio "V.L.F.", "V.L.F." voulant dire Very Low Frequency. Les ondes "V.L.F." provenant d'émetteurs lointains ont les mêmes propriétés que les ondes électromagnétiques naturelles, elles sont planes et uniformes. Par conséquent la technique de mesure est la même que celle de la M.T. Cependant la direction de mesure est imposée par la direction des émetteurs, et la fiabilité des mesures dépend de la puissance de l'émetteur et de son éloignement. A BANANKORO, les émetteurs français (15,1Khz) et américain (24Khz) captés imposent respectivement comme direction N20° et N150°, ces directions sont déterminées par les droites reliant le secteur de BANANKORO aux stations d'émission. Les mesures prises selon ces deux directions complètent pour les premières les mesures NS de la M.T., et pour les secondes les mesures EW de la M.T.

Finalement pour chaque station, on obtient deux courbes M.T. selon les directions EW et NS, construites chacune à partir de treize fréquences.

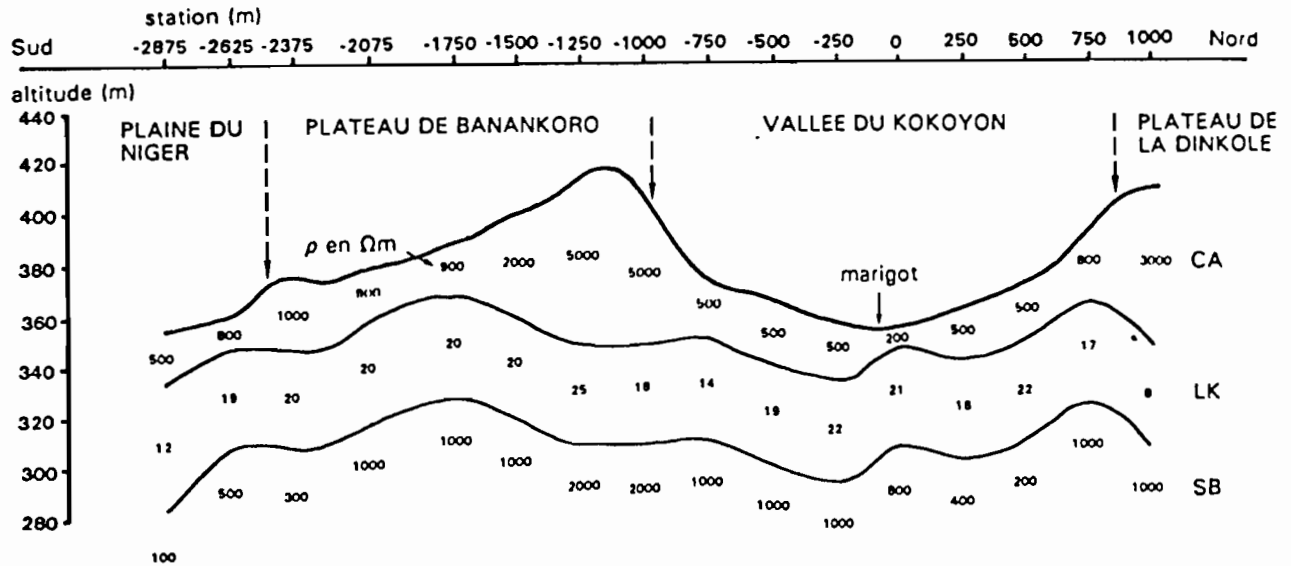
## 2. Les résultats de la méthode magnéto-tellurique

Pour résumer les résultats de la M.T., on rappelle les points suivants :

### Profil d'altération

- L'effet des terrains qui composent le profil d'altération, se mesure, sur la courbe des résistivités apparentes en fonction des périodes, pour les plus courtes périodes, en général jusqu'à  $1,47 \cdot 10^{-3}$ sec. Il s'agit de la résistivité apparente obtenue par la méthode "V.L.F.", et des trois premières résistivités apparentes correspondant aux trois plus courtes périodes de la M.T. A chaque station et pour chacune de ces quatre périodes, les différences de résistivité apparente mesurées selon les directions EW et NS ne sont en général pas significatives. Cela indique que le profil d'altération est électriquement isotrope.

- L'interprétation par un modèle tabulaire décompose le profil d'altération en deux niveaux (Figure 39). Le niveau supérieur a une résistivité de l'ordre de  $1000\Omega m$ . Son épaisseur est variable avec comme ordre de grandeur 10m. D'après les épaisseurs connues sur le secteur par les puits d'orpaillage et par une galerie creusée pour des travaux miniers (FREYSSINET, 1990), ce niveau résistant traduit plutôt l'effet de l'ensemble "cuirasse et argiles tachetées sous-jacentes" car, à cause de la profondeur de pénétration, la cuirasse très résistante et relativement peu épaisse est pratiquement invisible pour les ondes électromagnétiques. La résistivité de  $1000\Omega m$  est donc plus proche de celle de argiles tachetées que de celle de la cuirasse. Le niveau inférieur est nettement plus conducteur que le premier niveau. Son épaisseur est de 40m. La résistivité obtenue est généralement inférieure à  $40\Omega m$ . Ce niveau correspond vraisemblablement à la lithomarge kaolinique.



CA : ensemble "cuirasse et argiles tachetées" ; LK : lithomarge kaolinique ; SB : schistes birrimiens.

Figure 39 : Exemple de coupe géoélectrique montrant les niveaux superficiels "ensemble cuirasse et argiles tachetées" et "lithomarge kaolinique" pour le layon L1, d'après PHAM et BOYER, 1988.

- La résistivité de l'ensemble "cuirasse et argiles tachetées" est généralement plus forte sous les plateaux ( $> 10000\Omega m$ ) que sous les vallées ( $< 10000\Omega m$ ) (Figure 40). De même son épaisseur est aussi plus grande sous les plateaux, jusqu'à 60m, et plus petite sous les vallées, jusqu'à 40m (Figure 41). On distingue donc nettement deux types de profil cuirassé en fonction de la morphologie du paysage. En rajoutant les quarante mètres de la lithomarge kaolinique, le profil d'altération atteint sous les plateaux jusqu'à 100m d'épaisseur.

#### Formations situées sous le profil d'altération

- Alors que le début des courbes des résistivités apparentes en fonction des périodes est toujours isotrope, on observe parfois, vers les grandes périodes, des écarts significatifs entre les valeurs de résistivité apparente mesurées selon les directions EW et NS (Figure 42). Il s'agit alors d'anisotropie électrique, plus ou moins forte selon les stations. La répartition des stations selon l'anisotropie de la courbe permet de délimiter deux secteurs : un secteur occidental isotrope et un secteur oriental anisotrope (Figure 43).

Les courbes du secteur occidental montrent clairement les caractéristiques d'une coupe géoélectrique à trois terrains du type résistant-conducteur-résistant. Les deux premiers terrains appartiennent au profil d'altération, le troisième correspond à un substratum non seulement isotrope mais aussi très résistant ( $100000\Omega m$ ). Il s'agit probablement d'un socle de nature granitique qui affleure par ailleurs à 40km au NE près de Kangaba (COTTARD *et al.*, 1981).

L'anisotropie du secteur oriental est plus ou moins marquée selon les stations. Mais dans tous les cas, les résistivités apparentes mesurées selon la direction NS sont plus faibles que celles EW. De plus ces courbes anisotropes sont du type cinq terrains avec la succession résistant-conducteur-résistant-conducteur-résistant. L'origine de cette anisotropie doit être recherchée dans la nature et la structure du troisième niveau résistant, c'est-à-dire la roche-mère. Dans la région, cette roche-mère est constituée par des séries volcano-sédimentaires métamorphosées birrimiennes qui ont un plan de schistosité subvertical de direction subméridienne (BASSOT *et al.*, 1981). Or on sait que pour des schistes le courant passe plus facilement dans la direction parallèle à la schistosité que dans la direction perpendiculaire, ce qui explique les plus faibles résistivités apparentes NS obtenues. Ce niveau a une épaisseur variant de 200 à 700m (Figure 44).

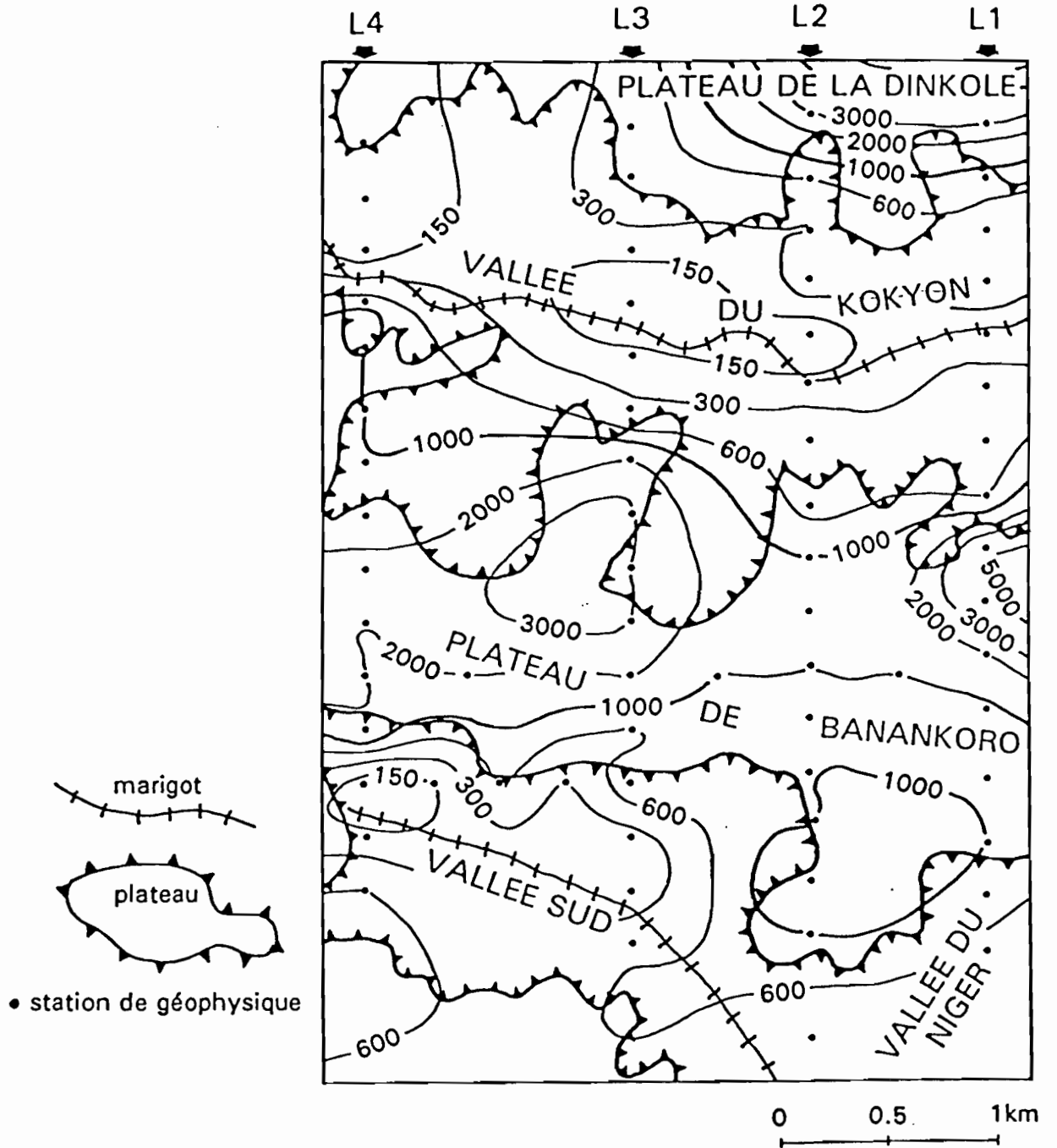


Figure 40 : Carte des résistivités en  $\Omega m$  de l'ensemble "cuirasse et argiles tachetées", qui est plus résistant sous les plateaux que sous les vallées, d'après PHAM et BOYER, 1988.

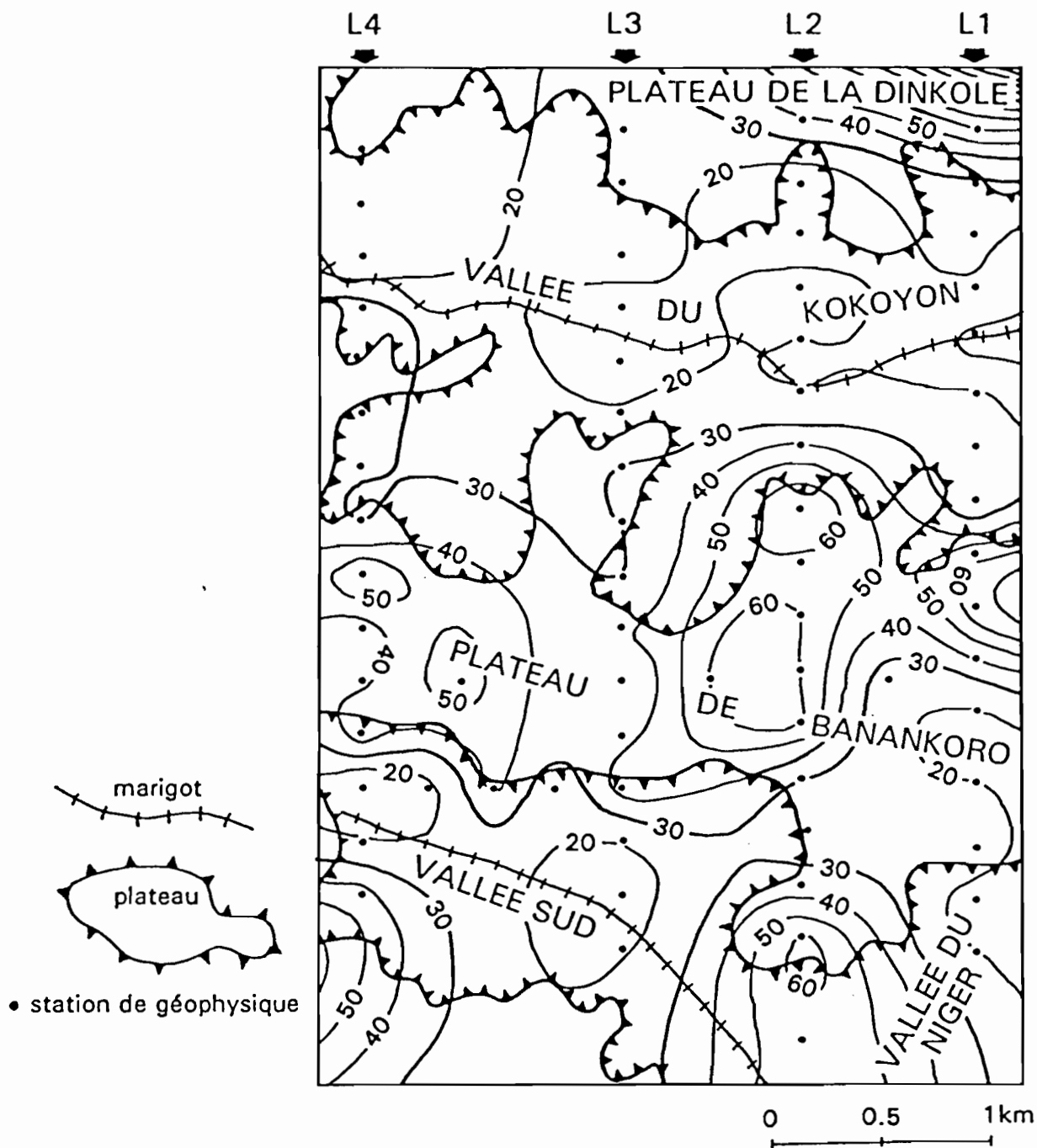
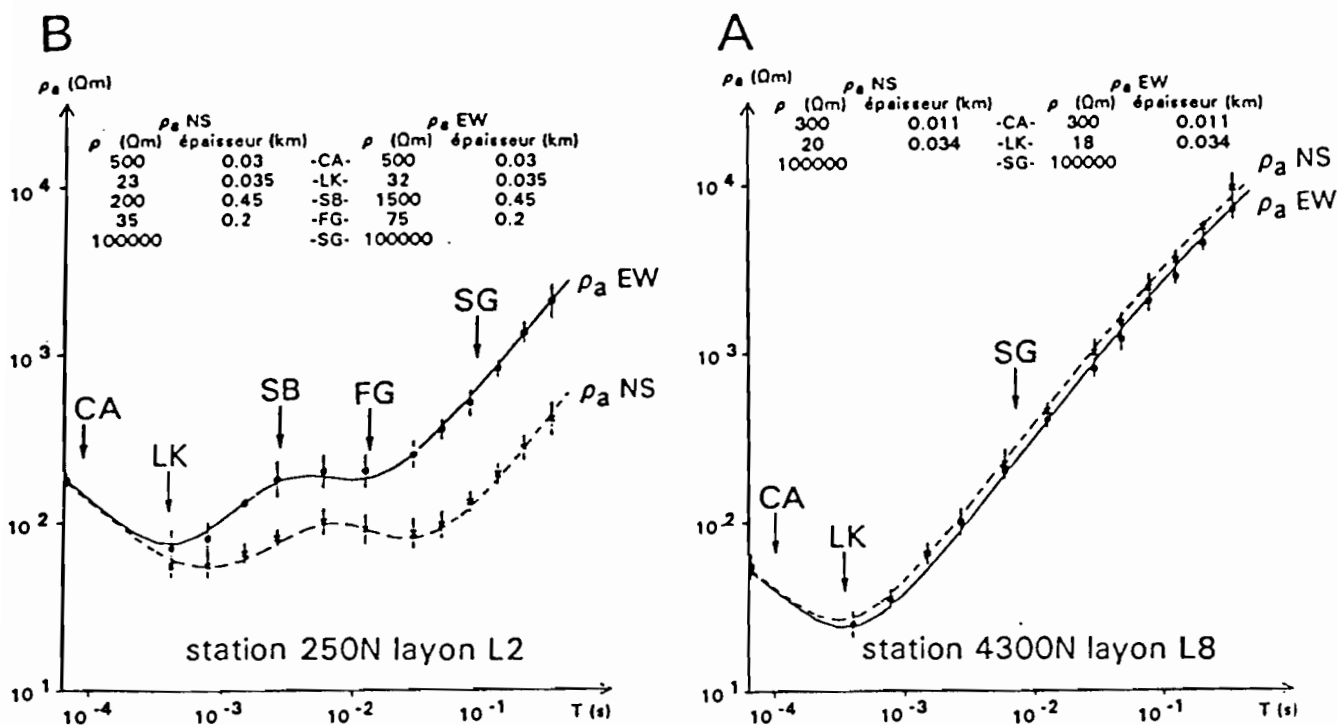


Figure 41 : Carte des épaisseurs en mètre de l'ensemble "cuirasse et argiles tachetées", qui est plus épais sous les plateaux que sous les vallées, d'après PHAM et BOYER, 1988.



CA : ensemble "cuirasse et argiles tachetées" ; LK : lithomarge kaolinique ; SG : socle granitique ; SB : schistes birrimiens anisotropes ; FG : faciès graphiteux ou nappe phréatique profonde.  
 Figure 42 : Exemples de courbe isotrope caractéristique du secteur occidental (A) et de courbe anisotrope caractéristique du secteur oriental (B), d'après PHAM et al., 1989.

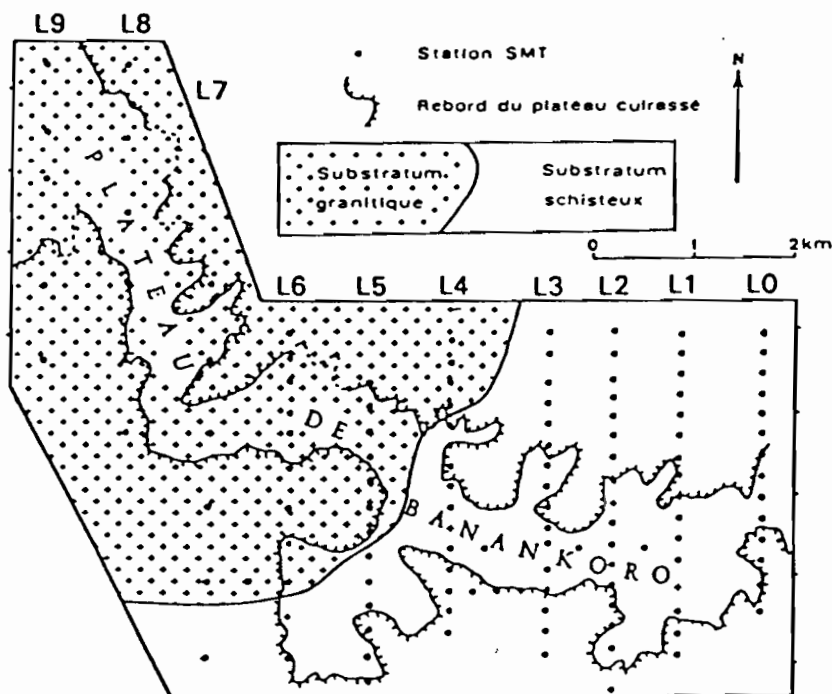


Figure 43 : Limite entre le secteur occidental isotrope et le secteur oriental anisotrope en fonction de la morphologie du paysage et de l'emplacement des stations de géophysique, d'après PHAM et al., 1989.

Uniquement pour les courbes NS de certaines stations, ce troisième niveau est parfois complexe : il peut encore se décomposer en trois terrains du type résistant-conducteur-résistant, les courbes présentent alors les plus fortes anisotropies. Cette nouvelle décomposition au niveau des séries volcano-sédimentaires peut s'expliquer par la présence d'une zone de cisaillement dont le fonctionnement contribue à accentuer la schistosité de la roche, et permet la circulation de fluides hydrothermaux qui favorisent l'altération en profondeur. Tout ceci fait que la résistivité de ce niveau est extrêmement variable et va comme ordre de grandeur de  $10^1$  à  $10^3 \Omega m$ .

Le quatrième niveau, le conducteur profond, a une épaisseur relativement constante de 200m et une résistivité qui varie de 11 à  $500 \Omega m$  (Figure 44). Cette faible résistivité permet d'expliquer ce niveau, inconnu jusqu'à présent, soit comme étant un faciès de schistes et quartzites graphiteux et friables, qui existe au sein du même sillon birrimien, mais plus au Sud, vers Siguiri en Guinée (GOLOUBINOW, 1936 ; BESSOLES, 1977), soit comme étant une nappe phréatique profonde formée par l'infiltration de l'eau à travers les schistes jusqu'aux granites. Le cinquième et dernier niveau est très résistant ( $100000 \Omega m$ ), il indique incontestablement la présence du socle granitique (Figure 44). La limite entre les deux secteurs, isotrope et anisotrope, a une orientation N20-N30, parallèle à celle de la vallée du Niger située à quelques kilomètres plus à l'Est (Figure 43). Il est possible que le secteur oriental anisotrope est été affecté par une fracturation plus intense que le secteur occidental et parallèle au couloir tectonique du Niger (CARRERE, 1974 ; SIMON *et al.*, 1982).

- Dans le secteur oriental anisotrope, la profondeur du toit du socle granitique varie entre 400 et 1000m, ce qui fait apparaître une importante structure anticlinale au centre du secteur étudié, plutôt située sous le plateau de Banankoro, et bordée par de grands accidents EW et NS (Figure 45). Le rejet des failles peut être supérieur à 250m au niveau du toit de ce socle. D'une manière générale, les plateaux sont plutôt localisés au-dessus des hauts-fonds de ce socle, et les vallées plutôt au-dessus des bas-fonds. Il semble donc exister une relation entre la structuration profonde du secteur et la morphologie du paysage latéritique.

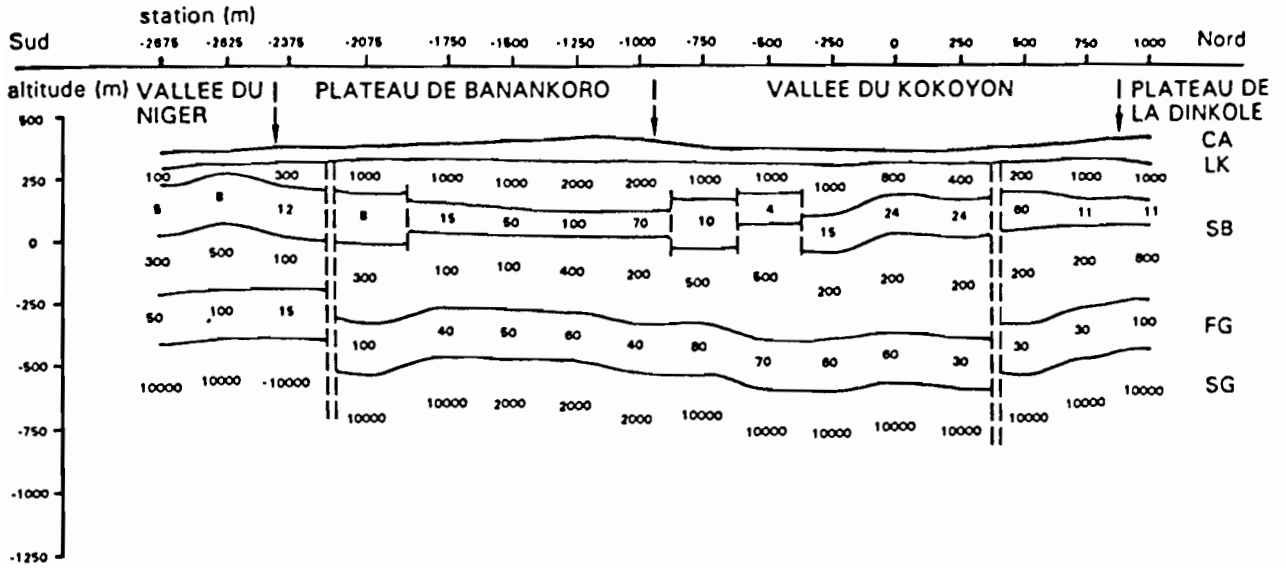
- La ligne de contact entre granites et schistes recoupe perpendiculairement la bordure qui sépare le plateau cuirassé des glacis également cuirassés, situés en contre-bas (Figure 43). Ce contact ne se marque donc pas dans la topographie. A Banankoro, la nature de la roche-mère n'est donc pas le facteur prépondérant qui détermine le tracé des limites entre les différents glacis cuirassés, comme cela a été décrit dans d'autres régions (PION, 1979 ; LEPRUN, 1979).

#### D. Discussion sur les résultats apportés par la méthode des sondages magnéto-telluriques

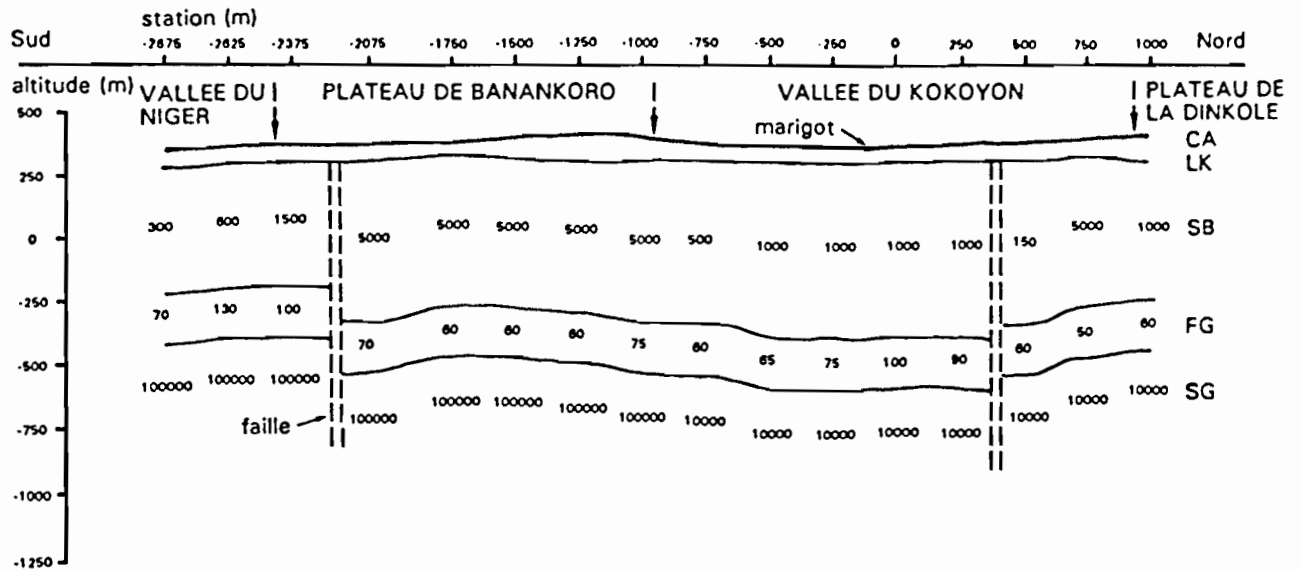
1- Les sondages M.T. ne mettent en évidence que deux niveaux dans le profil d'altération à cause de la grande profondeur de pénétration due à la très forte résistivité des horizons superficiels cuirassés, alors que les SE en montrent au moins trois d'après l'étude bibliographique. Le sondage M.T. ne permet donc pas une étude détaillée des différents horizons qui composent le profil d'altération.

2- Les caractéristiques géoélectriques du premier niveau appelé ensemble "cuirasse et argiles tachetées" sont fixées d'après la seule mesure réalisée par la méthode "V.L.F.". Il faut donc être particulièrement attentif sur cette mesure qui est prise par un autre appareillage que celui qui donne les résistivités apparentes pour les douze autres fréquences.

3- Pour déterminer les caractéristiques géoélectriques du deuxième niveau, appelé lithomarge kaolinique, il existe, comme pour les SE, un principe d'équivalence pour un terrain conducteur situé entre deux terrains résistants. Après plusieurs essais, son épaisseur a été fixée à 40m environ (PHAM, communication orale). En conséquence sa résistivité varie de 5 à  $50 \Omega m$ . Or étant donné les fortes variations d'épaisseur de l'ensemble "cuirasse et argiles tachetées" (de 12 à 70m), et vu le mode vertical d'enfoncement d'un profil d'altération, on peut penser que l'épaisseur de la lithomarge kaolinique varie elle aussi. En faisant varier son épaisseur, on peut arriver à une résistivité plus homogène, et donc plus caractéristique de la lithomarge kaolinique. De la même façon, en faisant varier l'épaisseur du niveau conducteur situé entre la roche-mère schisteuse et le socle granitique, qui est de 200m sur l'ensemble du secteur oriental anisotrope, on trouve une résistivité plus homogène, alors qu'elle varie de 11 à  $500 \Omega m$ .



CA : ensemble "cuirasse et argiles tachetées" ; LK : lithomarge kaolinique ; SG : socle granitique ;  
 SB : schistes birrimiens anisotropes ; FG : faciès graphiteux ou nappe phréatique profonde.



CA : ensemble "cuirasse et argiles tachetées" ; LK : lithomarge kaolinique ; SG : socle granitique ;  
 SB : schistes birrimiens anisotropes ; FG : faciès graphiteux ou nappe phréatique profonde.

Figure 44 : A- coupe géoélectrique complète du layon L1 appartenant au secteur oriental anisotrope, réalisées avec les mesures EW, montrant les schistes birrimiens, le conducteur profond et le socle granitique ; B- coupe géoélectrique complète du layon L1 appartenant au secteur oriental anisotrope, réalisées avec les mesures NS, montrant l'anisotropie des schistes birrimiens, et sa décomposition en trois niveaux pour la direction NS, d'après PHAM et al., 1988.



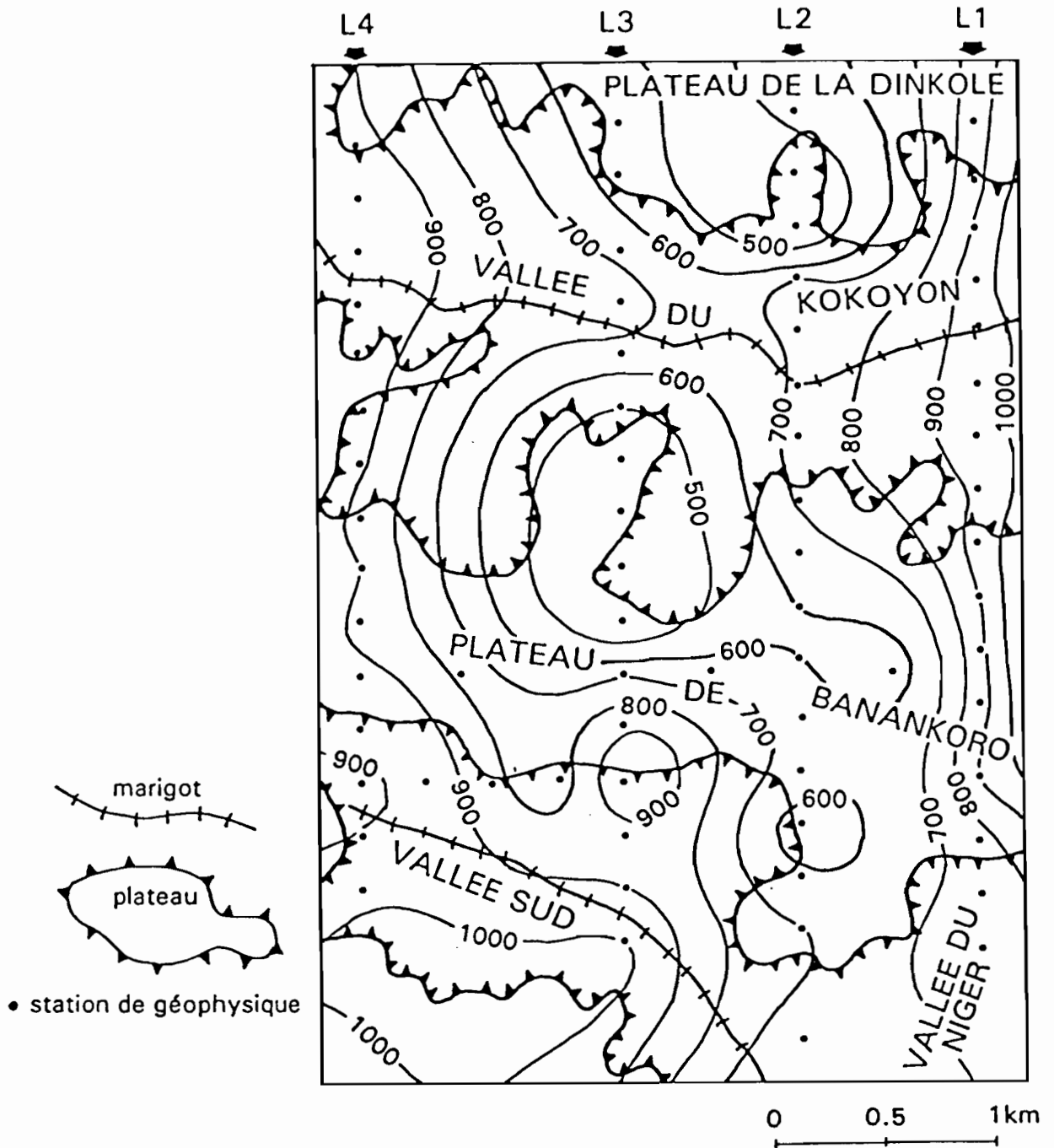


Figure 45 : Carte de la profondeur du toit du socle pour le secteur oriental anisotrope, avec ses hauts-fonds plutôt au niveau des plateaux qu'au niveau des vallées, d'après PHAM et BOYER, 1988.

4- Dans le cas d'une très forte anisotropie, la roche-mère se décompose dans la direction NS en trois niveaux d'après le modèle tabulaire, et l'interprétation de ces trois niveaux est basée sur l'accentuation de la schistosité verticale ayant permis les circulations des fluides hydrothermaux. A priori, il y a une certaine incompatibilité entre le modèle tabulaire à couches horizontales et l'interprétation par des hétérogénéités subverticales.

5- Concernant la structuration du socle sous le profil d'altération, il convient de préciser que, sur les coupes géoélectriques, les failles parallèles aux axes des vallées, au Nord et au Sud du plateau de Banankoro, délimitent des blocs effondrés sous ce plateau et plutôt surélevés vers le plateau de la Dinkolé au Nord. C'est au niveau de ces blocs effondrés que les hauts-fonds du socle granitique se localisent préférentiellement sous le plateau. On remarque que le haut-fond le plus proche de la surface, et qui a l'altitude la plus élevée, ne correspond pas, en surface sur le plateau, à une zone surélevée. De plus, la position des failles est déterminée par l'importance de la dénivelée du toit du socle granitique entre deux stations voisines. Il n'est pas toujours facile de placer ces failles de façon objective, c'est-à-dire que dans certains cas, pour une dénivelée donnée, il y aura une faille, et dans d'autres cas, pour une dénivelée identique ou même plus forte, il n'y aura pas de faille.

6- Dans l'interprétation générale du secteur, on peut faire l'hypothèse d'une faille située à la frontière entre la zone occidentale isotrope et la zone orientale anisotrope, à cause de la brusque remontée du toit du socle granitique due à la suppression des niveaux "schistes" et "schistes graphiteux", qui totalisent 700 à 900m d'épaisseur. La partie orientale se serait donc affaissée d'autant. On pourrait rattacher l'existence de cette faille de direction N20°-N30° au couloir tectonique de la vallée du Niger. Apparemment, quoiqu'il manque la carte de la profondeur du toit du socle pour l'ensemble du secteur, cette structuration du substratum ne se marque pas dans le paysage.

7- Il se peut que le profil d'altération présent actuellement sur le secteur occidental isotrope provienne de séries volcano-sédimentaires complètement "digérées" par les processus d'altération. D'ailleurs PHAM *et al.* (1989) n'excluent pas l'existence de ces séries à cet endroit sur une faible épaisseur. Dans une zone où deux natures de roche se superposent, il y a un décalage entre les caractéristiques géochimiques et minéralogiques des niveaux supérieurs du profil d'altération et celles des niveaux inférieurs. Dans ce cas il est normal que le changement de nature de roche-mère en profondeur n'apparaisse ni dans la nature des horizons superficiels du profil d'altération, ni dans la morphologie du paysage.

## E. Conclusion

Les sondages magnéto-telluriques, qui utilisent douze fréquences pour la M.T. et une pour le V.L.F., permettent de décomposer les profils d'altération latéritiques en trois niveaux : un ensemble "cuirasse et argiles tachetées", une lithomarge kaolinique et une roche-mère. Ils mettent en évidence des différences entre les plateaux et les vallées d'après leurs caractéristiques électriques ( $\rho_a$ ) : les profils sur les plateaux sont en général plus résistants et plus épais que dans les vallées, surtout pour l'ensemble "cuirasse et argiles tachetées". Ils permettent aussi d'analyser le substratum jusqu'à plus de 700m de profondeur. La réalisation de mesures EW et NS met en évidence deux secteurs électriquement différents : le premier, occidental, est isotrope et le second, oriental, est anisotrope. Il y a donc, sur le secteur de Banankoro, deux types de roches-mères : à l'Ouest, il s'agit très probablement de granites, et à l'Est, de schistes surmontant un socle granitique et traversés par une shear zone à minéralisation aurifère.

En sélectionnant des fréquences plus adaptées à de telles conditions de surface en M.T. et en V.L.F., c'est-à-dire des fréquences plus grandes, on peut obtenir une meilleure définition de la courbe de résistivité apparente et donc une meilleure décomposition du profil d'altération. La M.T. et le V.L.F. nécessitent un dispositif plus simple à manoeuvrer que le S.E., il n'y a pas de grandes longueurs de ligne entre les électrodes à tirer, ni de batteries à entretenir ; mais les mesures, étant donné la faiblesse du signal, sont certainement plus délicates à effectuer qu'avec le S.E..

## VII. Conclusions

Les propriétés électriques d'un sous-sol dépendent de nombreux facteurs : composition minéralogique, taille et assemblage des cristaux, quantité et qualité de l'eau contenue, fracturation, perméabilité... En utilisant la méthode du sondage électrique, un appareillage léger suffit, sur le terrain, pour mesurer des résistivités apparentes jusqu'à une centaine de mètres en profondeur. L'étude d'un secteur peut se faire à différentes échelles, selon la taille de la maille du réseau d'implantation des stations et la profondeur d'investigation désirée.

A cause des principes d'équivalence et de suppression, lors de l'interprétation des courbes de résistivités apparentes à l'aide d'un traitement informatique, il y a un grand nombre de solutions théoriques. Pour obtenir la solution la plus proche de la réalité, il faut déjà avoir des données sur la nature du sous-sol et ses propriétés électriques, c'est-à-dire pour un profil d'altération non seulement sur sa composition minéralogique, mais aussi sur son état hydrique.

Les différentes études par sondages électriques sur des couvertures latéritiques sont peu nombreuses et très variées dans leurs approches. De plus elles sont très dispersées géographiquement. Une revue de la littérature sur ce sujet fait ressortir les points suivants :

- 1- Les courbes des SE ont l'allure d'un fond de bateau, c'est à dire soit en V, soit en U.
- 2- Elles sont généralement du type 3 couches avec  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ , avec des niveaux intermédiaires entre  $\rho_1$  et  $\rho_2$  de résistivités variables et aussi parfois avec un premier niveau avant  $\rho_1$  de résistivité plus faible.
- 3- Les différentes couches ont des épaisseurs et des résistivités qui varient énormément d'un cas à l'autre.
- 4- Le niveau le plus conducteur semble le plus caractéristique avec des valeurs de résistivité vraie de l'ordre de la dizaine d'ohm-mètre ; ces valeurs sont souvent comprises entre 5 et 30 $\Omega$ m . L'épaisseur moyenne de ce niveau est d'environ 20m, dans tous les cas elle est nettement supérieure à celle des couches supérieures résistantes.
- 5- Les niveaux supérieurs résistants ont toujours des résistivités supérieures à 100 $\Omega$ m ; les maxima atteints sont de l'ordre de 10000 $\Omega$ m ; la moyenne se situe vers les 300 $\Omega$ m.
- 6- La résistivité vraie de la roche saine est toujours supérieure à 200 $\Omega$ m.
- 7- Sans étalonnage, les estimations des épaisseurs sont peu précises ; sur l'épaisseur totale du profil il y a alors souvent une surestimation.
- 8- A cause du principe de suppression, la zone de transition entre la base du profil et la roche saine est invisible sur les SE.
- 9- La terminologie employée pour qualifier les différents horizons trouvés par les SE est variée. Généralement les descriptions macroscopiques et les analyses minéralogiques sont omises.
- 10- Certains auteurs localisent sans problème la nappe phréatique, alors que pour d'autres elle reste invisible. Ceci est certainement dû au principe de suppression à cause des dimensions de la nappe par rapport à l'épaisseur du profil, ainsi qu'à un défaut de résolution des abaques pour les études anciennes qui n'avaient pas encore accès au calcul informatique.
- 11- Les auteurs ne donnent pratiquement jamais les dates des mesures, ni aucun repère par rapport à la saison, alors que les niveaux superficiels ont certainement des teneurs en eau qui varient beaucoup d'une saison à l'autre, ce qui se traduit par des changements de résistivité. On peut toutefois penser que les mesures ont été prises pendant la saison sèche pour des raisons de facilité d'accès sur le terrain.

Finaleme<sup>nt</sup> pour entreprendre une étude de terrain la plus complète possible, le mieux serait de pouvoir effectuer des mesures de résistivités directement dans des puits ou des forages de références par des diagraphies électriques, ou encore sur des échantillons en laboratoire. Malheureusement pour notre travail, cela n'a pas été possible. Pour étalonner nos mesures, nous disposons de données sur la géochimie et la minéralogie du profil d'après de nombreux puits superficiels et une toposéquence, ainsi que de données axées sur la minéralisation du sous-sol grâce à sept forages réalisés sur le secteur par le BRGM, qui atteignent une centaine de mètre de profondeur.



## CHAPITRE III

### LES RESISTIVITES APPARENTES

### DES PROFILS LATERITIQUES

Dans ce chapitre, on décrit d'abord l'ensemble des courbes "brutes" des sondages électriques du secteur de Banankoro d'un point de vue statistique en examinant la distribution de ces valeurs pour chaque AB/2. La réalisation de cartes de résistivité apparente pour chaque AB/2 met en évidence des groupes de stations qui présentent des évolutions de résistivité apparente similaires d'une carte à l'autre. On montre qu'il existe quatre familles de sondage électrique sur le secteur de Banankoro, qui permettent de distinguer quatre types de profil d'altération latéritique. Finalement on compare les SE de Banankoro à ceux réalisés sur des latérites dans diverses régions d'Afrique.

#### I. LES STATIONS DE SONDAGE ELECTRIQUE

Le secteur du plateau de Banankoro a été couvert par 127 sondages électriques, notés en abrégé SE. Les mesures ont été réalisées en milieu de saison sèche, entre les mois de janvier et de mars, au cours de deux années consécutives : du 16/01/88 au 07/03/88 (52 jours) et du 31/01/89 au 17/03/89 (47 jours). Pendant ces deux périodes, l'équipe de géophysique a réalisé respectivement 67 et 60 SE. Cela fait entre une et deux stations de mesure par jour, comprenant au minimum onze écartements différents avec des AB/2 compris entre 2m et 300m. Ce rendement est faible car, dans d'autres régions, on peut aisément réaliser le double de SE par jour. Ceci est dû principalement à la difficulté de pouvoir établir de bons contacts entre les électrodes et les horizons qui affleurent, car, d'une part l'induration des horizons cuirassés empêche souvent l'implantation directe des électrodes dans le sol et impose l'emploi de plaques métalliques pénibles à manipuler, et d'autre part leurs très fortes résistivités en milieu de saison sèche gênent l'injection du courant dans le sol. Il en résulte donc, à chaque changement de configuration des électrodes, un temps d'installation assez long.

##### A. L'implantation des stations

Les stations de SE sont réparties le long de dix layons de direction N-S par rapport au Nord magnétique. Cette orientation a été choisie au cours de la première campagne de géophysique, de façon à recouper transversalement l'axe d'allongement E-W du plateau du Banankoro et de la vallée du Kokoyon, sur la partie est du secteur (Figure 46). Les coupes géoélectriques réalisées suivant ces transects montrent bien les différenciations latérales existant entre les profils d'altération des vallées et ceux des plateaux. Bien que vers l'Ouest, les reliefs s'orientent NW-SE, on a conservé la même direction N-S pour les layons, qui les recoupent alors plutôt en biais.

L'emplacement des stations de SE est le même que celui des stations de sondage magnéto-tellurique installées par l'équipe de PHAM en 1987-88-89, aux erreurs de repérage sur le terrain près. Il diffère parfois volontairement de 50m au maximum, afin de faciliter l'écartement des lignes électriques en évitant les zones boisées trop denses et donc difficilement pénétrables, et les accidents du relief, car les lignes électriques des SE sont beaucoup plus longues que celles des sondages magnéto-telluriques.

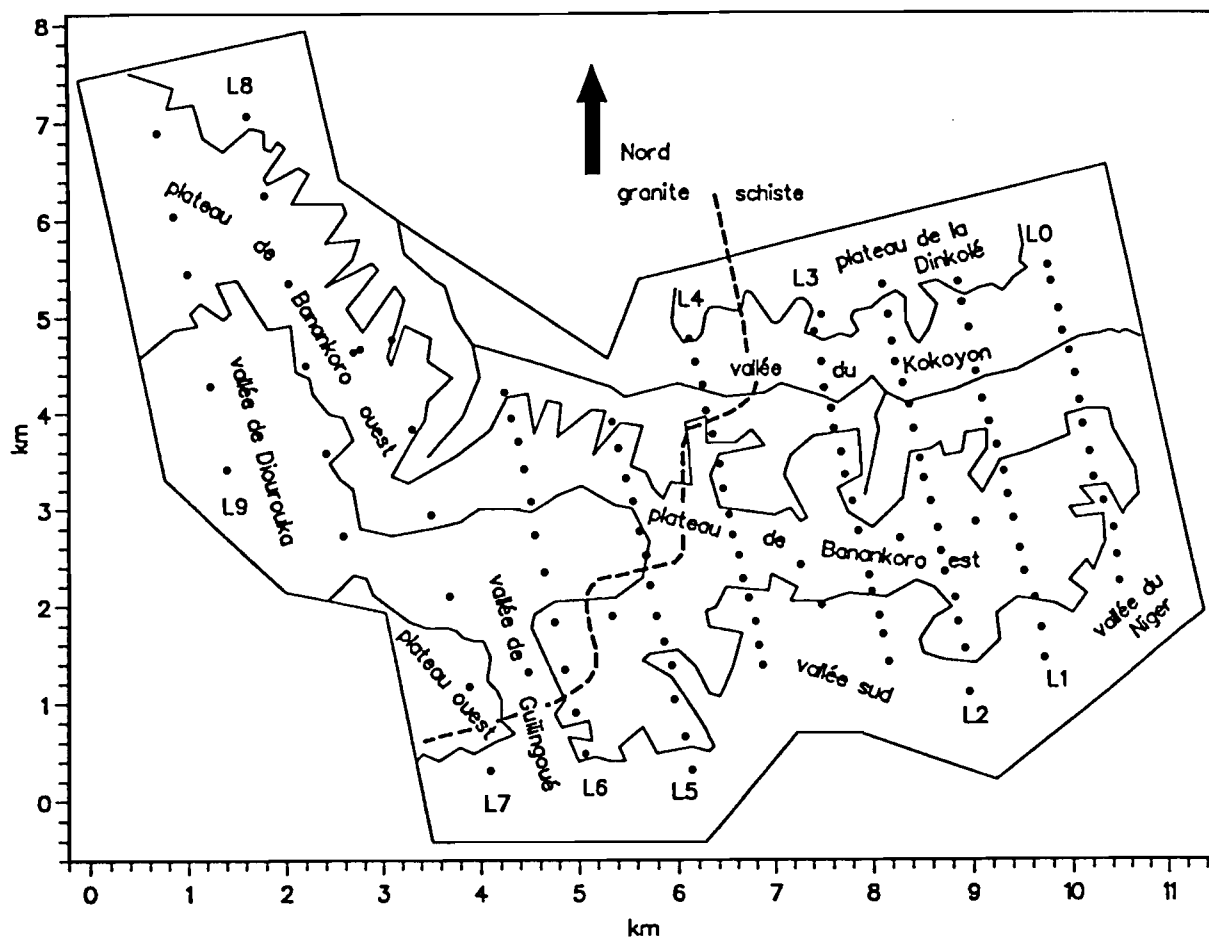


Figure 46 : Carte de localisation des layons et des stations sur le secteur de Banankoro.

Les dix layons N-S sont codés de L0 à L9, d'Est en Ouest. Leur longueur est d'environ 4km. La distance qui les sépare, varie de 700 à 1200m. Sur un même layon, les stations sont installées tous les 250 à 300m pour les layons L0 à L6 et tous les 900m pour les layons L7 à L9. Donc la partie est du secteur, couverte par les layons L0 à L6, a une densité de station nettement supérieure à celle de la partie ouest, couverte par les layons L7 à L9 (Figure 46). Le nombre de station par layon varie entre 5 et 17 (Tableau 7). Il y a en plus, en dehors des layons, huit stations isolées réparties comme suit : une station entre L1 et L2, entre L2 et L3, entre L5 et L6, et entre L6 et L7, et deux stations entre L3 et L4, et entre L8 et L9 (Figure 46).

Les 127 stations se répartissent à peu près également entre les plateaux et les vallées, respectivement 68 et 59 stations. La majorité des stations de plateau sont sur le plateau de Banankoro (62/68), et un peu plus de la moitié des stations de vallée sont dans la vallée du Kokoyon (33/59). L'implantation des stations telle qu'elle a été réalisée, permet donc de bien détailler la partie est du plateau de Banankoro et de la vallée du Kokoyon (Figure 46). Sur ce secteur, la répartition des stations le long des layons permet de bien suivre le modelé du relief (Figure 47), tandis qu'à l'Ouest, où le nombre des stations est plus restreint, la topographie est perçue de façon moins détaillée. La limite entre ces deux zones passe entre les layons L6 et L7.

En 1988, lors de la première mission, tous les SE des layons L5, L6 et L7 ont été réalisés, et seulement un SE sur deux pour les layons L1, L2, L3 et L4, plus cinq stations isolées : soit au total 67 SE. Lors de la seconde mission en 1989, les layons L1, L2, L3 et L4 ont été complétés, et tous les SE des layons L0, L7, L8 et L9, plus trois stations isolées ont été effectués : soit au total 60 SE.

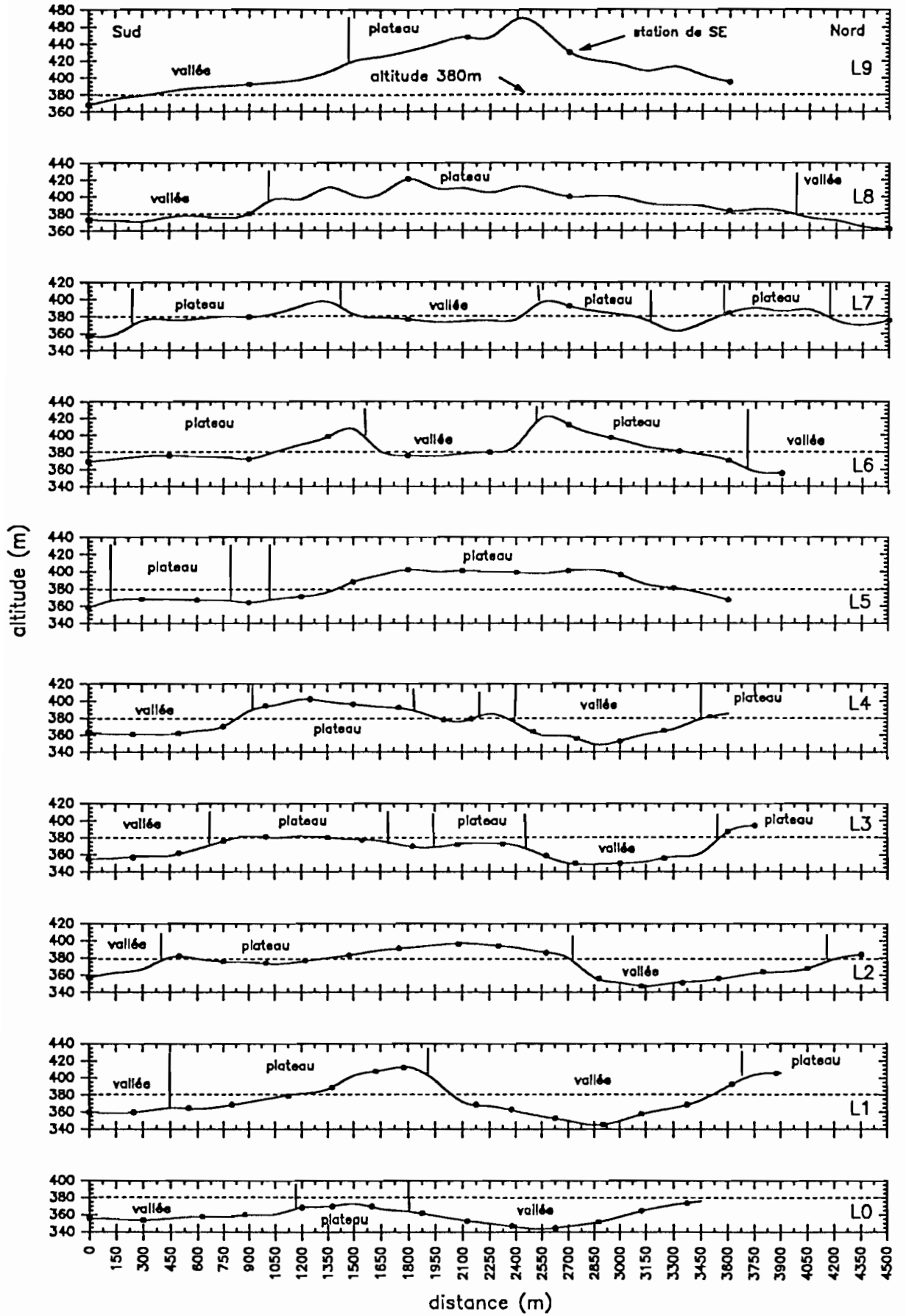


Figure 47 : Répartition des stations de SE sur les dix layons avec la topographie du secteur de Banankoro.



Tableau 7 : Répartition des stations de SE par layon en fonction du relief.

station	plateau			vallée					total
	BNK	DNK	W	KKN	NGR	SUD	DRK	GLG	
L0	3	.	.	7	4	.	.	.	14
L1	6	1	.	7	2	.	.	.	16
L2	9	1	.	6	.	1	.	.	17
L3	6	2	.	5	.	3	.	.	16
L4	4	1	.	6	.	4	.	.	15
L5	11	.	.	.	.	2	.	.	13
L6	8	.	.	1	.	.	.	2	11
L7	3	.	1	.	.	.	.	2	6
L8	3	.	.	1	.	.	2	.	6
L9	3	.	.	.	.	.	2	.	5
isolée	6	.	.	.	.	1	.	1	8
total	62	5	1	33	6	11	4	5	127
	total : 68			total : 59					

BNK : plateau de Banankoro  
 DNK : plateau de la Dinkolé  
 W : plateau ouest  
 KKN : vallée du Kokoyon

NGR : vallées du Niger  
 SUD : vallée sud  
 DRK : vallée de Diourouka  
 GLG : vallée de Guilingoué

## B. La numérotation des stations

On a numéroté chaque station de géophysique par un code, qui permet de les repérer directement sur le terrain. Ce code est composé de deux parties, formant un système de coordonnées.

Pour les stations situées sur un layon, la première partie du code donne l'équivalent d'une abscisse par le nom du layon auquel elles appartiennent ; la seconde partie du code donne l'équivalent d'une ordonnée par la distance métrique séparant la station de la ligne de base de direction E-W, placée dans la vallée du Kokoyon, plus la lettre S ou N pour indiquer si la station est située respectivement au Sud ou au Nord de cet axe. Ainsi la station L4-600S correspond à la station du layon L4 située à 600m au Sud de la ligne de base (Figure 48). L'axe des ordonnées de ce système est parallèle à la direction du Nord magnétique, l'axe des abscisses lui est perpendiculaire.

Pour les huit stations isolées, la première partie du code donne l'équivalent d'une abscisse par la distance métrique séparant la station de l'axe du layon L2, plus la lettre E ou W pour indiquer si elles sont respectivement à l'Est ou à l'Ouest de ce layon ; la seconde partie du code donne l'équivalent d'une ordonnée par la distance métrique séparant la station de la ligne de base, plus la lettre S ou N, comme pour les stations des layons. Ainsi la station 3500W-1600S correspond à la station isolée située à 3500m à l'Ouest du layon L2 et à 1600m au Sud de la ligne de base (Figure 49).



### C. La configuration des électrodes

La configuration adoptée pour les électrodes est du type Schlumberger, c'est-à-dire quatre électrodes alignées avec les électrodes d'émission A et B qui encadrent les électrodes de réception M et N, et l'écartement entre M et N est au maximum dix fois plus petit que l'écartement entre A et B. Ce dispositif a été choisi pour des raisons pratiques de mise en place sur le terrain. Etant donné la grande épaisseur du profil d'altération (> 50m) indiquée par les sondages magnéto-telluriques (PHAM *et al.*, 1988), il fallait un dispositif capable d'atteindre une grande profondeur, tout en restant le plus pratique possible à manoeuvrer en surface. En effet pour changer la profondeur d'investigation avec un dispositif Schlumberger, il suffit de déplacer les électrodes d'émission A et B d'une façon symétrique par rapport au centre du dispositif. Par contre, avec d'autres dispositifs tel que celui de Wenner, il faudrait en déplacer quatre. De plus, en travaillant en Schlumberger, on effectue les mesures en restant au centre du dispositif à proximité des électrodes de réception M et N : on peut donc intervenir rapidement soi-même sur ces électrodes, en particulier quand le signal reçu devient trop faible pour passer à un écartement supérieur. Avec un dispositif Schlumberger et pour un rendement optimum, l'équipe du SE est réduite à six hommes sur le terrain : deux personnes pour diriger les mesures et s'occuper des électrodes M et N, et deux autres personnes par électrode d'émission A et B.

La direction des lignes électriques est orientée E-W pour chaque sondage. Ce choix facilite l'interprétation des SE avec un modèle du type tabulaire, puisque, étant donné l'allongement E-W du relief, les lignes électriques se déploient ainsi sur des secteurs aux dénivelées les plus faibles possibles. On n'a pas toujours pu éviter le fait que des stations de vallée aient des lignes d'émission A ou B qui remontent sur le plateau, et inversement pour des stations de plateau avec des lignes qui descendent dans les vallées, puisqu'on voulait conserver les mêmes stations que celles du sondage magnéto-tellurique, qui lui n'a pas besoin de beaucoup écarter les électrodes des lignes telluriques.

Tableau 8 : Les configurations d'électrode les plus utilisées.

AB/2 (m)	MN/2 (m)
2	0,25
4	0,25
7	0,25 et 0,50
10	0,25, 0,50 et 1
15	0,25
20	0,25, 0,50 et 1
30	0,50 et 2
50	0,50, 2 et 4
70	2, 4 et 7
100	4, 7 et 10
150	7 et 10
200	10, 15 et 20
300	15, 20 et 30

Pour toutes les stations, on a mesuré la résistivité apparente au minimum pour onze écartements différents de  $AB/2=2m$  à  $AB/2=300m$  (Tableau 8). Les écartements en  $AB/2$  de 15m et 150m ont été rarement utilisés lors de la première mission, mais ils l'ont été systématiquement lors de la seconde mission, afin de mieux définir la courbe des résistivités apparentes. Pour certaines stations, quand la remontée finale de la courbe des résistivités apparentes n'apparaît pas ou s'amorce tout juste pour  $AB/2=300m$ , l'écartement des électrodes d'émission est porté jusqu'à 400m, 450m ou 500m afin d'obtenir la remontée finale ou de préciser cette extrémité de la courbe. Ce cas est rare. Aucune mesure n'a été faite au-delà de  $AB/2=500m$ , car la manipulation des lignes électriques devient beaucoup trop contraignante, et les câbles commencent à mal supporter la traction de mise en place. Pour de très rares stations, des écartements intermédiaires en  $AB/2=3, 25, 40$  et 60m ont été ajoutés pour compléter les mesures défectueuses des écartements voisins.

## II. LES COURBES DE RESISTIVITE APPARENTE

Les courbes de résistivité apparente du secteur de Banankoro, montrent d'abord une très forte décroissance des valeurs mesurées quand l'écartement entre les électrodes d'émission A et B augmente, puis l'amorce d'une remontée pour les plus grands écartements. Cette décroissance peut se faire sur quatre ordres de grandeur, depuis la dizaine de milliers d'ohm-mètres jusqu'à la dizaine d'ohm-mètres. D'une façon très générale pour l'ensemble des SE, on observe en surface des terrains résistants, en profondeur des terrains conducteurs, et à plus grande profondeur des terrains à nouveau résistants.

On retrouve donc l'allure très générale en V des SE réalisés sur des profils d'altération latéritique dans d'autres régions tropicales (MATHIEZ et HUOT, 1968 ; ALBOUY *et al.*, 1970 ; BOULANGE et CARN, 1971 ; DORBATH *et al.*, 1975 ; ENGALENC, 1978 ; BERNARDI et MOUTON, 1980 ; PERIC, 1981 ; PALACKY *et al.*, 1981). On retrouve aussi l'allure des débuts des courbes de résistivité apparente des sondages magnéto-telluriques réalisés par l'équipe de PHAM sur le même secteur (PHAM *et al.*, 1988).

### A. Les caractéristiques globales des 127 SE

Le nombre total de SE réalisés sur le secteur de Banankoro est important : on obtient ainsi 127 valeurs de résistivité apparente pour les écartements en AB/2 de 2, 4, 10, 20, 30, 50, 70, 100 et 200m ; 126 valeurs pour l'écartement en AB/2 de 300m ; 125 valeurs pour l'écartement en AB/2 de 7m ; 86 valeurs pour l'écartement en AB/2 de 150m ; 72 valeurs pour l'écartement en AB/2 de 400m ; 64 valeurs pour l'écartement en AB/2 de 15m ; pour les plus grands écartements en AB/2 de 450 et 500m, il n'y a eu respectivement que 3 et 8 valeurs de réaliser.

La description des courbes de résistivité apparente est donc basée sur l'étude des paramètres statistiques tels que la moyenne, l'écart-type et l'étendue de la variation pour chaque AB/2.

#### 1. Les maxima et les minima des résistivités apparentes

Les courbes des maxima et des minima des résistivités apparentes donnent respectivement les limites supérieure et inférieure qui bornent toutes les valeurs obtenues (Figure 50). Les maxima décroissent plus ou moins régulièrement quand AB/2 augmente, depuis 47534Ωm pour AB/2=2m et jusqu'à 237Ωm pour AB/2=300m, et finalement la valeur 331Ωm est atteinte pour AB/2=400. Les minima croissent légèrement de AB/2=2m à AB/2=4m, en passant de 286Ωm à 325Ωm, puis ils décroissent jusqu'à 21Ωm pour AB/2=50m, et finalement ils augmentent irrégulièrement jusqu'à 37Ωm pour AB/2=400m.

L'étendue de la gamme des résistivités apparentes mesurées, c'est-à-dire la différence entre les maxima et les minima pour chaque AB/2, diminue régulièrement depuis 47248Ωm pour AB/2=2m jusqu'à 204Ωm pour AB/2=300m (Tableau 9) ; elle augmente ensuite légèrement à 294Ωm pour AB/2=400m. Les résistivités apparentes du profil d'altération deviennent donc de plus en plus homogènes avec la profondeur.

Les maxima appartiennent tous à des stations situées sur le plateau de Banankoro, sauf celui de AB/2=70m qui provient de la station L1-1000N située sur le plateau nord de la Dinkolé (Tableau 10). Ces stations changent pratiquement à chaque AB/2, sauf pour les AB/2 de 4, 7, 10 et 15m où ils appartiennent tous à la station L3-1600S, et pour les AB/2 de 150 et 200m où ils appartiennent à la station L4-1100S.

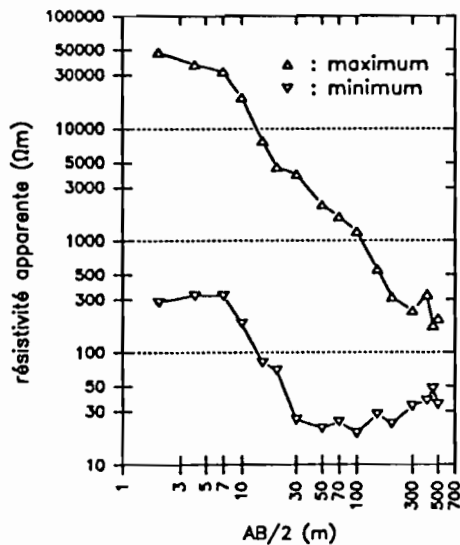


Figure 50 : Courbes des maxima et des minima des résistivités apparentes de Banankoro.

Tableau 9 : Etendue de la gamme des résistivités apparentes mesurées.

AB/2 (m)	2	4	7	10	15	20	30
maxima (Ωm) (1)	47534	37037	31924	19008	7757	4541	3922
minima (Ωm) (2)	286	325	324	182	81	69	25
étendue (1)-(2)	47248	36712	31600	18826	7676	4472	3897
AB/2 (m)	50	70	100	150	200	300	400
maxima (Ωm) (3)	2097	1635	1207	558	315	237	331
minima (Ωm) (4)	21	24	19	28	23	33	37
étendue (3)-(4)	2076	1611	1188	530	292	204	294
AB/2 (m)	450	500					
maxima (Ωm) (5)	174	201					
minima (Ωm) (6)	47	34					
étendue (5)-(6)	127	167					

Tableau 10 : Noms des stations des maxima et leurs situations en fonction du modelé du paysage.

AB/2 (m)	2	4	7	10	15	20
station	L1-2075S	L3-1600S	L3-1600S	L3-1600S	L3-1600S	L7-700N
localis.	plat.BNK	plat.BNK	plat.BNK	plat.BNK	plat.BNK	plat.BNK
AB/2 (m)	30	50	70	100	150	200
station	L6-200S	L2-1050S	L1-1000N	L1-1000S	L4-1100S	L4-1100S
localis.	plat.BNK	plat.BNK	plat.DNK	plat.BNK	plat.BNK	plat.BNK
AB/2 (m)	300	400	450	500		
station	L5-400N	L6-430N	L1-1250S	L6-1550S		
localis.	plat.BNK	plat.BNK	plat.BNK	plat.BNK		

localis. : localisation  
 plat.BNK : plateau de Banankoro  
 plat.DNK : plateau de la Dinkolé

Dans le premier cas, la courbe du SE L3-1600S forme une bosse ayant comme sommet la valeur 37037 $\Omega$ m en AB/2=4m (Figure 51), et les résistivités suivantes, tout en décroissant, restent très élevées jusqu'à 7757 $\Omega$ m en AB/2=15m, puis elles chutent.

Dans le second cas, la courbe du SE L4-1100S forme aussi une bosse dont le sommet est à 7980 $\Omega$ m pour AB/2=7m (Figure 51), puis les valeurs restent élevées jusqu'à la fin de la courbe en AB/2=300m où il n'y a pas de remontée finale.

On peut partager les maxima en deux groupes :

- Jusqu'en AB/2=200m, les maxima appartiennent à la partie décroissante des courbes de résistivité apparente.
- A partir de AB/2=300m, ils appartiennent à la remontée finale des courbes.

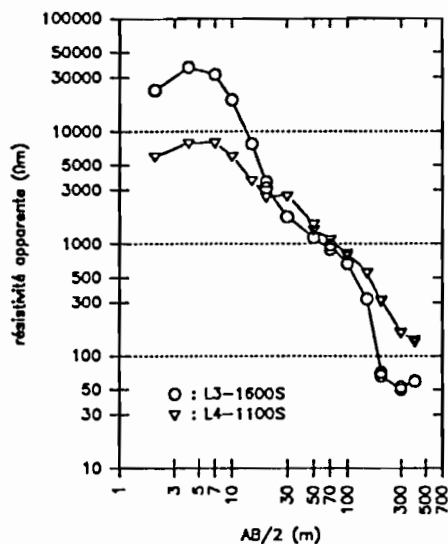


Figure 51 : Courbes des résistivités apparentes du SE L3-1600S qui présente des maxima de AB/2=4m à AB/2=15m, et du SE L4-1100S qui présente des maxima pour AB/2=150m et AB/2=200m.

Les stations correspondant à la courbe des minima des résistivités apparentes mesurées sont toutes situées dans les vallées, principalement celle du Kokoyon, tant que AB/2 ne dépasse pas 100m. Par contre à partir de AB/2=150m, les stations des minima appartiennent au plateau de Banankoro, et sont principalement situées sur le layon L2 ou à proximité (Tableau 11 et figures 48 et 49).

Tableau 11 : Noms des stations des minima et leurs situations en fonction du modelé du paysage.

AB/2 (m)	2	4	7	10	15	20
station	L2-250S	L2-250S	L2-250S	L2-250S	L2-250S	L2-250S
localis.	val.KOK	val.KOK	val.KOK	val.KOK	val.KOK	val.KOK
AB/2 (m)	30	50	70	70	70	100
station	L3-150N	L0-500N	L0-500NN	L2-750N	L9-1600N	L2-750N
localis.	val.KOK	val.KOK	val.KOK	val.KOK	val.DRK	val.KOK
AB/2 (m)	150	200	300	400	400	400
station	L2-2300S	400E-1600S	400E-1600S	400E-1600S	L2-2800S	L3-850S
localis.	plat.BNK	plat.BNK	plat.BNK	plat.BNK	plat.BNK	plat.BNK
AB/2 (m)	450	500				
station	L2-2050S	L2-2550S				
localis.	plat.BNK	plat.BNK				

localis. : localisation  
 plat.BNK : plateau de Banankoro  
 val.KOK : vallée du Kokoyon  
 val.DRK : vallée de Diourouka

De  $AB/2=2m$  à  $AB/2=20m$ , les minima appartiennent tous à la station L2-250S. Cette station a la particularité d'être située dans le lit à sec du Kokoyon, c'est la seule station de tout le secteur de Banankoro à se localiser ainsi. Les résistivités apparentes de cette station sont faibles : elles augmentent depuis  $286\Omega m$  pour  $AB/2=2m$  jusqu'à  $325\Omega m$  pour  $AB/2=4m$ , puis elles diminuent jusqu'à atteindre leur minimum à  $45\Omega m$  pour  $AB/2=100m$ , et finalement elles augmentent à nouveau jusqu'à  $71\Omega m$  pour  $AB/2=300m$ .

De  $AB/2=30m$  à  $AB/2=100m$ , les minima appartiennent à quatre stations qui présentent des courbes très semblables (Figure 52). Ce sont les stations : L0-500N, L2-750N, L3-150N et L9-1600N. Les trois premières sont situées en rive gauche du Kokoyon, et la dernière fait partie de la vallée de Diourouka. Les minima atteints entre  $AB/2=30m$  et  $AB/2=100m$  sont proches de  $20\Omega m$ . Pour les petits écartements ( $AB/2 < 20m$ ), les résistivités apparentes du SE L9-1600N sont inférieures à celles des trois SE de la vallées du Kokoyon. De  $AB/2=100m$  à  $AB/2=300m$ , les résistivités apparentes de la station L2-750N sont inférieures à celles des autres stations.

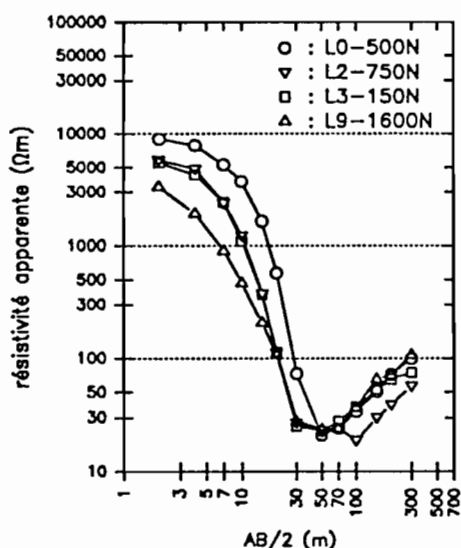


Figure 52 : Courbes des résistivités apparentes des SE L0-500N, L2-750N, L3-150N et L9-1600N qui possèdent les minima de  $AB/2=30m$  à  $AB/2=100m$ .

Pour  $AB/2=150m$  et  $AB/2=200m$ , les minima correspondent avec le minimum des courbes de résistivité apparente des stations L2-2300S et 400E-1600S, soit respectivement  $28\Omega m$  et  $23\Omega m$  (Figure 53). D'après la forme de la courbe de la station 400E-1600S, si il y avait eu une mesure de résistivité apparente pour  $AB/2=150m$ , elle aurait dû être un minimum avec une valeur à environ  $23\Omega m$ . Pour  $AB/2=300m$ , le minimum appartient à la remontée finale de la courbe des résistivités apparentes de la station 400E-1600S. Pour  $AB/2=400m$ , trois stations ont la même valeur minimale de  $37\Omega m$  : pour les stations L3-850S et 400E-1600S, cette valeur appartient à la remontée finale de la courbe, mais pour la station L2-2800S, cette valeur correspond au minimum de la courbe de résistivités apparentes sans qu'il y ait de remontée finale (Figures 53 et 54). Pour  $AB/2=450m$  et  $AB/2=500m$ , les minima correspondent avec le minimum des courbes des stations L2-2050S et L2-2550S, qui ne présentent pas non plus de remontée finale (Figure 54).

On peut partager les courbes de ces minima, de  $AB/2=150m$  à  $AB/2=500m$ , en deux groupes d'après la forme générale des courbes : le premier est constitué par les courbes des stations L2-2300S et 400E-1600S, elles ont des valeurs de résistivité apparente nettement inférieures à celles du second groupe, constitué par les stations L2-2050S, L2-2550S, L2-2800S et L3-850S, pour les  $AB/2$  compris entre 30 et 200m.

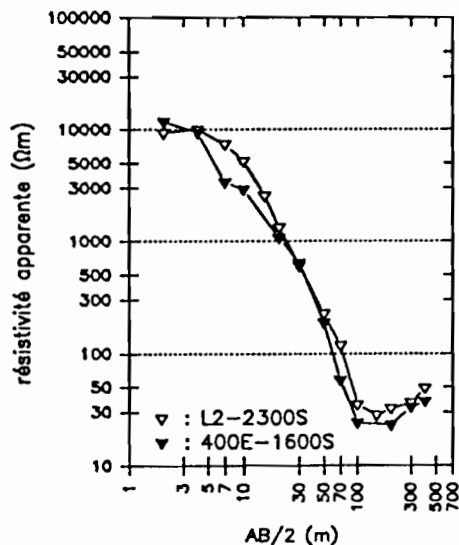


Figure 53 : Courbes des résistivités apparentes des stations L2-2300S et 400E-1600S qui possèdent les minima pour  $AB/2=150, 200, 300$  et  $400m$ .

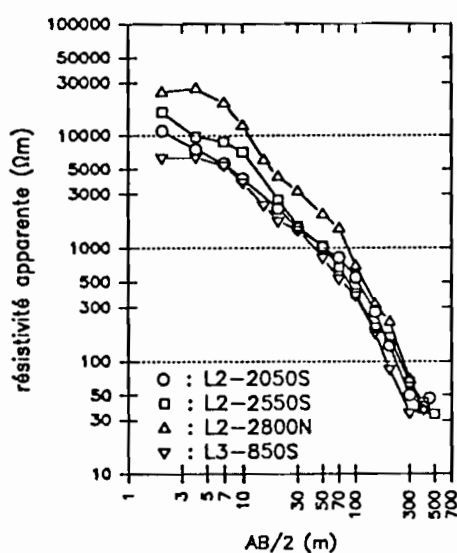


Figure 54 : Courbes des résistivités apparentes des stations L2-2050S, L2-2550S, L2-2800S et L3-850S qui possèdent les minima pour  $AB/2=400, 450$  et  $500m$ .

En conclusion, alors que les maxima des SE appartiennent tous à des stations situées sur des plateaux, les minima sont obtenus d'abord pour les plus faibles écartements sur des stations situées en vallée jusqu'à  $AB/2=100m$ , puis sur des stations situées sur des plateaux pour les plus grands  $AB/2$ . Sur le secteur de Banankoro, les SE de plateau peuvent donc avoir en profondeur des résistivités apparentes aussi bien maximales que minimales, alors que celles de vallée n'ont aucune valeur maximale.

## 2. Les résistivités apparentes moyennes et leurs écarts-types

La courbe des moyennes des résistivités apparentes en fonction de  $AB/2$ , calculée sur l'ensemble des SE, décroît régulièrement depuis  $11122\Omega m$  pour  $AB/2=2m$  jusqu'à  $124\Omega m$  pour  $AB/2=150m$  (Tableau 12 et figure 55). Puis elle présente un palier à environ  $107\Omega m$  entre  $AB/2=200m$  et  $AB/2=300m$ . Finalement, elle amorce une remontée à  $115\Omega m$  pour  $AB/2=400m$ . Il y a donc un facteur 100 entre les valeurs extrêmes des résistivités apparentes moyennes à Banankoro.

Les écarts-types de ces moyennes diminuent régulièrement, en valeur absolue, depuis  $7579\Omega m$  pour  $AB/2=2m$  jusqu'à  $47\Omega m$  pour  $AB/2=300m$  (Tableau 12). Ensuite, ils augmentent en atteignant  $64\Omega m$  pour  $AB/2=400m$ .



Tableau 12 : Données sur les moyennes et les écarts-types des résistivités apparentes pour l'ensemble des stations, en fonction de AB/2.

AB/2 (m)	M ( $\Omega$ m)	N	$\sigma$ ( $\Omega$ m)	M + $\sigma$ ( $\Omega$ m)	M - $\sigma$ ( $\Omega$ m)	$\sigma/M$ (%)
2	11122	127	7579	18701	3543	68
4	8357	127	5795	14152	2562	69
7	5092	125	3882	8974	1210	76
10	3562	127	2463	6025	1099	69
15	2251	64	1598	3849	653	71
20	1538	127	1026	2564	512	67
30	913	127	753	1666	160	83
50	525	127	530	1055	-5	101
70	347	127	391	738	-44	113
100	220	127	255	475	-35	116
150	124	86	116	240	8	94
200	106	127	57	163	49	54
300	108	126	47	155	61	44
400	115	72	64	179	51	56
450	125	3	69	174	56	55
500	95	8	62	157	33	65

M : moyenne ; N : effectif ;  $\sigma$  : écart-type.

En comparant les moyennes et les écarts-types, on note que les résistivités apparentes sont très dispersées pour chaque AB/2. Les valeurs obtenues pour la courbe des moyennes moins les écarts-types sont d'abord positives de AB/2=2m jusqu'à AB/2=30m (Tableau 12), puis elles deviennent négatives de AB/2=50m à AB/2=100m, et finalement elles sont à nouveau positives à partir de AB/2=150m.

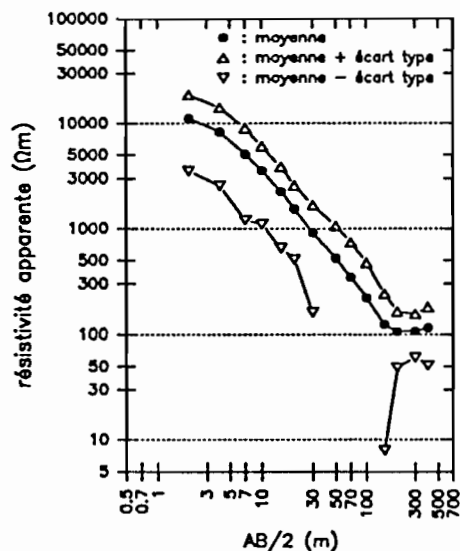


Figure 55 : Les courbes de résistivités apparentes moyennes et les intervalles de dispersion pour l'ensemble des stations, en fonction de AB/2.

Le coefficient de variation (rapport "écart-type / moyenne"), exprimé en pourcent pour chaque AB/2, est toujours élevé (Tableau 12) : il est de 77% en moyenne pour les AB/2 compris entre 2 et 400m. De AB/2=2m à AB/2=20m, il est en moyenne de 70% (Figure 56), puis il augmente à partir de AB/2=30m et dépasse les 100% pour AB/2=50, 70 et 100m en atteignant la valeur maximale de 116%, ensuite ce rapport baisse jusqu'à la valeur minimale de 44% pour AB/2=300m, et il augmente finalement à 56% pour AB/2=450m. Le fait que ce rapport dépasse les 100% pour trois AB/2 consécutifs, indique que la distribution des résistivités apparentes sur le secteur de Banankoro ne suit pas une loi de type normal et change avec la profondeur.

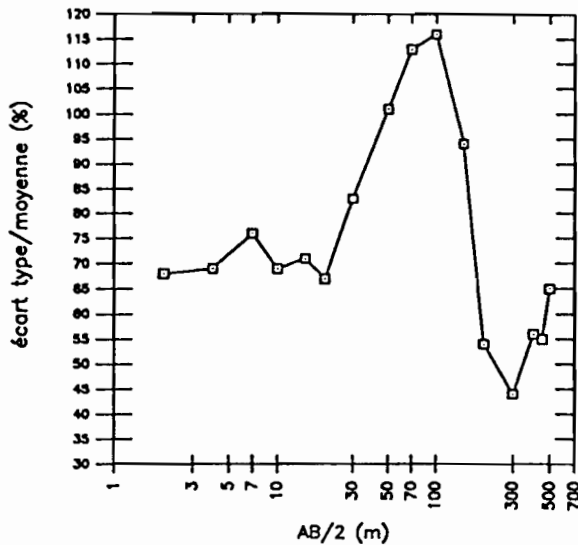


Figure 56 : Valeurs du coefficient de variation (rapport "écart-type/moyenne") pour l'ensemble des stations, en fonction de AB/2.

En conclusion, les moyennes de l'ensemble des résistivités apparentes obtenues sur le secteur de Banankoro sont élevées. Elles diminuent régulièrement depuis la dizaine de milliers d'ohm-mètres, pour  $AB/2=2m$ , jusqu'à la centaine d'ohm-mètres, pour  $AB/2=150m$ . Les écarts-types diminuent eux aussi régulièrement depuis le millier d'ohm-mètres, pour  $AB/2=2m$ , jusqu'à la dizaine d'ohm-mètres, pour  $AB/2=200m$ . Le fait que le rapport "écart-type / moyenne" soit élevé, et qu'il dépasse les 100% de  $AB/2=50m$  à  $AB/2=100m$ , met en évidence la forte dispersion des mesures. Les SE de Banankoro ne forment donc certainement pas une population homogène.

### 3. La distribution des résistivités apparentes pour chaque écartement

Pour étudier la distribution des résistivités apparentes, on a choisi comme mode de représentation les fréquences cumulées pour chaque AB/2 (Figure 57). L'échelle des abscisses pour les résistivités apparentes est logarithmique, celle des ordonnées est une échelle de probabilité. Avec un tel repère, si les valeurs de résistivités apparentes sont distribuées selon une loi de type log-normale, elles doivent s'aligner sur une droite, appelée droite de Henri (MORICE et CHARTIER, 1954). La valeur des ordonnées correspondant à la probabilité de 50% donne une estimation de la moyenne géométrique égale à la médiane. La valeur de la pente de cette droite est une estimation de la déviation géométrique de la loi log-normale : plus la pente est forte, plus la dispersion des valeurs est faible.

Sur la figure 57, les courbes de fréquence cumulée se décalent progressivement de la droite vers la gauche, c'est-à-dire des fortes valeurs de résistivité apparente vers les faibles valeurs, lorsque AB/2 augmente. Suivant la forme des courbes et l'importance du décalage, on distingue trois types de distribution des résistivités apparentes. Le premier type regroupe les courbes A, B, C et D, il concerne les écartements de  $AB/2=2m$  à  $AB/2=10m$ . Ces quatre courbes présentent le même type de distribution des résistivités apparentes (Figure 57) : pour les plus petites fréquences cumulées, jusqu'à 30%, la pente de la courbe est plus faible que pour les plus fortes fréquences, la dispersion des résistivités apparentes est donc plus forte ; après 30%, les valeurs s'alignent presque selon une droite : les résistivités apparentes ont donc tendance à être distribuées selon une loi de type log-normale, elles forment alors une population relativement homogène. Ces courbes sont parallèles, et elles se déplacent vers de plus faibles résistivités apparentes quand AB/2 augmente. Les SE sont donc majoritairement très résistants à faible profondeur, mais un certain nombre d'entre eux sont nettement plus conducteurs avec une dispersion des résistivités apparentes importante.

Le deuxième type de distribution correspond aux cinq courbes de fréquences cumulées, E, F, G, H et I, obtenues pour des écartements compris entre  $AB/2=20m$  et  $AB/2=100m$  (Figure 57). Ces cinq courbes présentent deux segments rectilignes séparés par un point d'inflexion. Les deux segments extrêmes, très redressés, dénotent une fréquence relativement élevée des résistivités apparentes fortes (500 à

4000 $\Omega$ m) et faibles (20 à 100 $\Omega$ m) par rapport aux résistivités intermédiaires. Ce type de courbe reflète l'existence de deux catégories de SE qui se distinguent par des résistivités apparentes assez contrastées à moyenne profondeur. La proportion de SE "conducteurs" augmente nettement par rapport à celle des SE résistants, lorsque AB/2 augmente entre 20m et 100m.

Un troisième type de distribution des résistivités apparentes apparaît à plus grande profondeur, pour les écartements AB/2=200m et AB/2=300m (courbes J et K, Figure 57). Ces deux courbes de fréquence cumulée sont très proches et pratiquement rectilignes. Ceci montre qu'à grande profondeur, les résistivités apparentes comprises entre 20 et 300 $\Omega$ m sont relativement homogènes et suivent une loi de distribution de type log-normal.

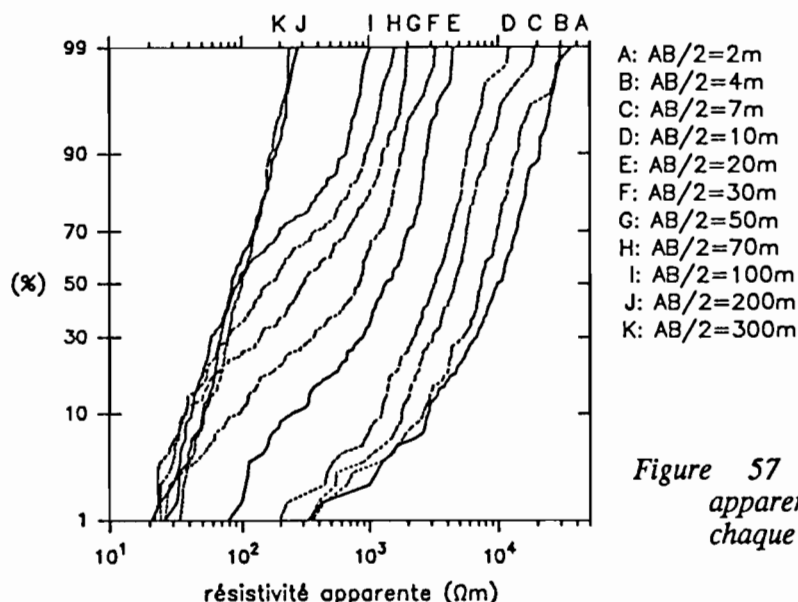


Figure 57 : Distribution des résistivités apparentes de l'ensemble des SE, pour chaque AB/2.

La distinction de deux groupes de SE "résistants" et "conducteurs" à moyenne profondeur, ne correspond pas simplement à une différence vallée-plateau, qui est la première hypothèse à laquelle on pense après avoir fait les mesures sur le terrain. En effet, si on réalise le même type de représentation en distinguant les SE des vallées et des plateaux, on observe à nouveau les trois types de courbe (Figures 58 et 59). Cependant, pour un même AB/2, la proportion de SE de type "conducteur" est nettement plus importante pour les stations de vallée que pour celles de plateau.

Cela se voit déjà à faible profondeur pour les courbes A, B, C et D (AB/2=2m à AB/2=10m), dont les valeurs de résistivité apparente ne descendent pas au-dessous de 1000 $\Omega$ m sous les plateaux, alors qu'elles descendent jusqu'à 200 ou 300 $\Omega$ m sous les vallées.

À moyenne profondeur, la proportion de SE "conducteurs" restent très faible sous les plateaux (<5%) pour AB/2=20m et AB/2=30m (Figure 59, courbes E et F), alors qu'elle est déjà relativement importante sous les vallées (20 à 30%) (Figure 58, courbes E et F).

Pour AB/2=100m, la courbe I suit les courbes rectilignes J et K pour les SE de vallée (Figure 58), alors qu'elle montre encore une forte proportion (50%) de SE de type "résistant" sous les plateaux (Figure 59).

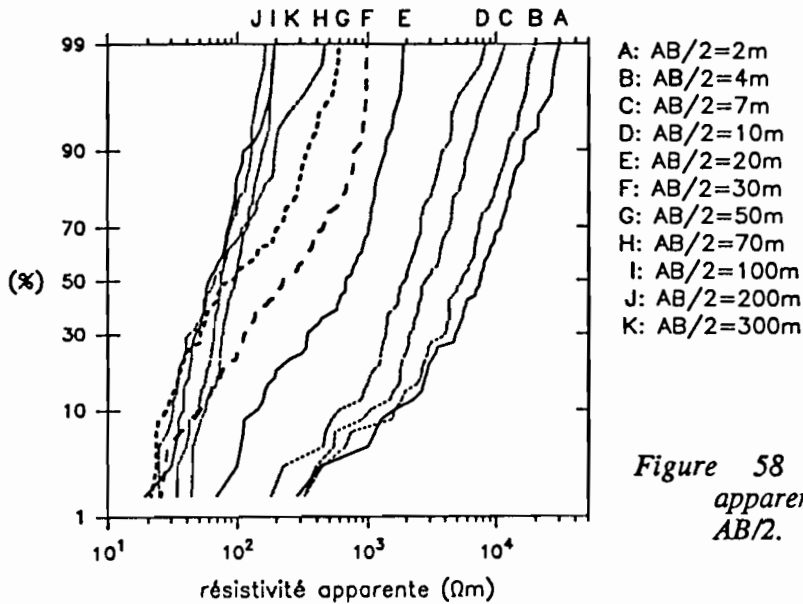


Figure 58 : Distribution des résistivités apparentes des SE de vallée pour chaque AB/2.

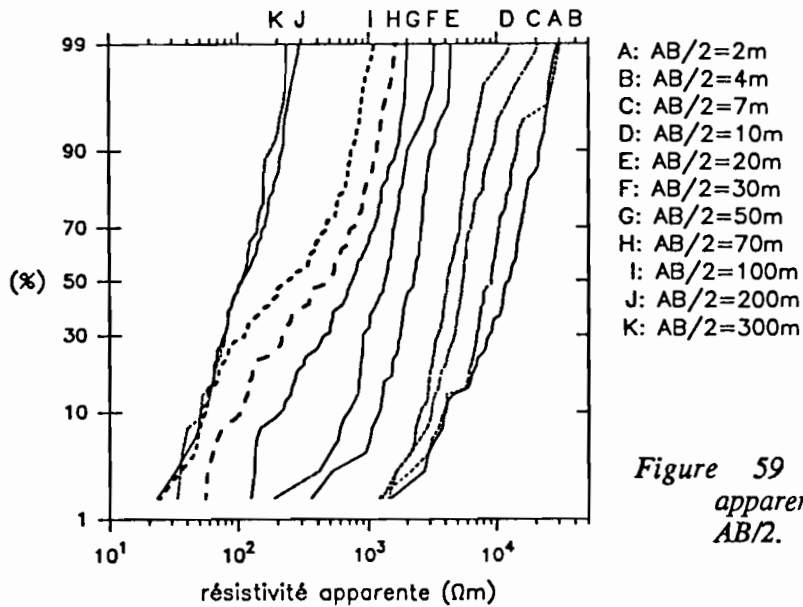


Figure 59 : Distribution des résistivités apparentes des SE de plateau pour chaque AB/2.

En conclusion, on peut donc dire que l'ensemble des SE de Banankoro ne forme pas une population homogène : les plus fortes hétérogénéités sont observées à moyenne profondeur, car aussi bien sous les vallées que sous les plateaux, il existe alors deux types de profil : ceux à fortes résistivités apparentes et ceux à faibles résistivités apparentes. Par contre à grande profondeur, quand la roche-mère commence à apparaître sur les SE, les profils d'altération présentent des résistivités homogènes.

#### 4. Les sondages électriques anormalement résistants

Pour mieux caractériser le groupe des stations qui ont les résistivités apparentes les plus fortes, pour chaque AB/2, on identifie les stations qui présentent des résistivités apparentes supérieures à la valeur



Tableau 13 : Liste des stations de type "très résistant" dont les résistivités apparentes dépassent au moins cinq fois la valeur " $M + \sigma$ " en fonction de  $AB/2$ .

AB/2 = 2m 18701Ωm	AB/2 = 4m 14152Ωm	AB/2 = 7m 8974Ωm	AB/2 = 10m 6025Ωm	AB/2 = 15m 3849Ωm	AB/2 = 20m 2564Ωm	AB/2 = 30m 1666Ωm	AB/2 = 50m 1055Ωm	AB/2 = 70m 738Ωm	AB/2 = 100m 475Ωm	AB/2 = 150m 240Ωm	AB/2 = 200m 163Ωm	AB/2 = 300m 155Ωm	AB/2 = 400m 179Ωm	N	
L1-1000S	L1-1000S		L1-1000S	L1-1000S	L1-1000S	L1-1000S	L1-1000S	L1-1000S	L1-1000S	L1-1000S	L1-1000S	L1-1000S	L1-1000S	13	
L2-2800S	L2-2800S	L2-2800S	L2-2800S	L2-2800S	L2-2800S	L2-2800S	L2-2800S	L2-2800S	L2-2800S	L2-2800S	L2-2800S	L2-2800S	L2-2800S	12	
L3-1600S	L3-1600S	L3-1600S	L3-1600S	L3-1600S	L3-1600S	L3-1600S	L3-1600S	L3-1600S	L3-1600S	L3-1600S	L3-1600S	L3-1600S	L3-1600S	11	
	L1-1500S	L1-1500S	L1-1500S	L1-1500S		L1-1500S	L1-1500S	L1-1500S	L1-1500S	L1-1500S	L1-1500S	L1-1500S		10	
L2-1050S	L2-1050S	L2-1050S	L2-1050S		L2-1050S	L2-1050S	L2-1050S	L2-1050S	L2-1050S	L2-1050S	L2-1050S	L2-1050S		10	
			L4-1100S	L4-1100S		L4-1100S	L4-1100S	L4-1100S	L4-1100S	L4-1100S	L4-1100S	L4-1100S	L4-1100S	9	
					L1-1250S	L1-1250S	L1-1250S	L1-1250S	L1-1250S	L1-1250S	L1-1250S	L1-1250S		7	
						L1-1000N	L1-1000N	L1-1000N	L1-1000N	L1-1000N	L1-1000N	L1-1000N		6	
						L2-800S	L2-800S	L2-800S	L2-800S	L2-800S	L2-800S	L2-800S		6	
					L2-1300S	L2-1300S	L2-1300S	L2-1300S	L2-1300S	L2-1300S	L2-1300S	L2-1300S		6	
						L2-1550S	L2-1550S	L2-1550S	L2-1550S	L2-1550S	L2-1550S	L2-1550S		6	
		L3-2100S	L3-2100S	L3-2100S	L3-2100S	L3-2100S	L3-2100S							6	
		L5-200S	L5-200S			L5-200S	L5-200S	L5-200S			L5-200S			6	
						L5-500S	L5-500S	L5-500S	L5-500S	L5-500S	L5-500S	L5-500S	L5-500S	6	
L6-430N						L5-1100S	L5-1100S	L5-1100S	L5-1100S	L5-1100S	L5-1100S	L5-1100S	L5-500S	6	
					L6-430N	L6-430N	L6-430N	L6-430N	L6-430N	L6-430N	L6-430N	L6-430N	L6-430N	6	
							L6-1550S	L6-1550S	L6-1550S	L6-1550S	L6-1550S	L6-1550S	L6-1550S	6	
					L6-2450S	L6-2450S	L6-2450S	L6-2450S	L6-2450S	L6-2450S	L6-2450S	L6-2450S	L6-1550S	6	
400W-1600S						L6-2450S	L6-2450S	L6-2450S	L6-2450S	L6-2450S	L6-2450S	L6-2450S	L6-2450S	6	
		L2-2550S	L2-2550S		L2-2550S	400W-1600S	400W-1600S	400W-1600S	400W-1600S	400W-1600S	400W-1600S	400W-1600S	400W-1600S	6	
L3-900N	L3-900N				L2-2550S	L2-2550S	L2-2550S						L2-2550S	5	
L4-400N	L4-400N	L4-400N	L4-400N		L3-900N				L3-900N	L3-900N				5	
												L4-400N	L6-200S	5	
L8-4300N	L8-4300N	L8-4300N	L8-4300N	L8-4300N	L6-200S	L6-200S	L6-200S						L6-200S	5	
														5	
						1550W-1600S	1550W-1600S	1550W-1600S	1550W-1600S	1550W-1600S	1550W-1600S	1550W-1600S		5	
N	9	8	9	11	7	11	20	20	18	18	11	18	9	5	174

N : effectif par ligne ou par colonne

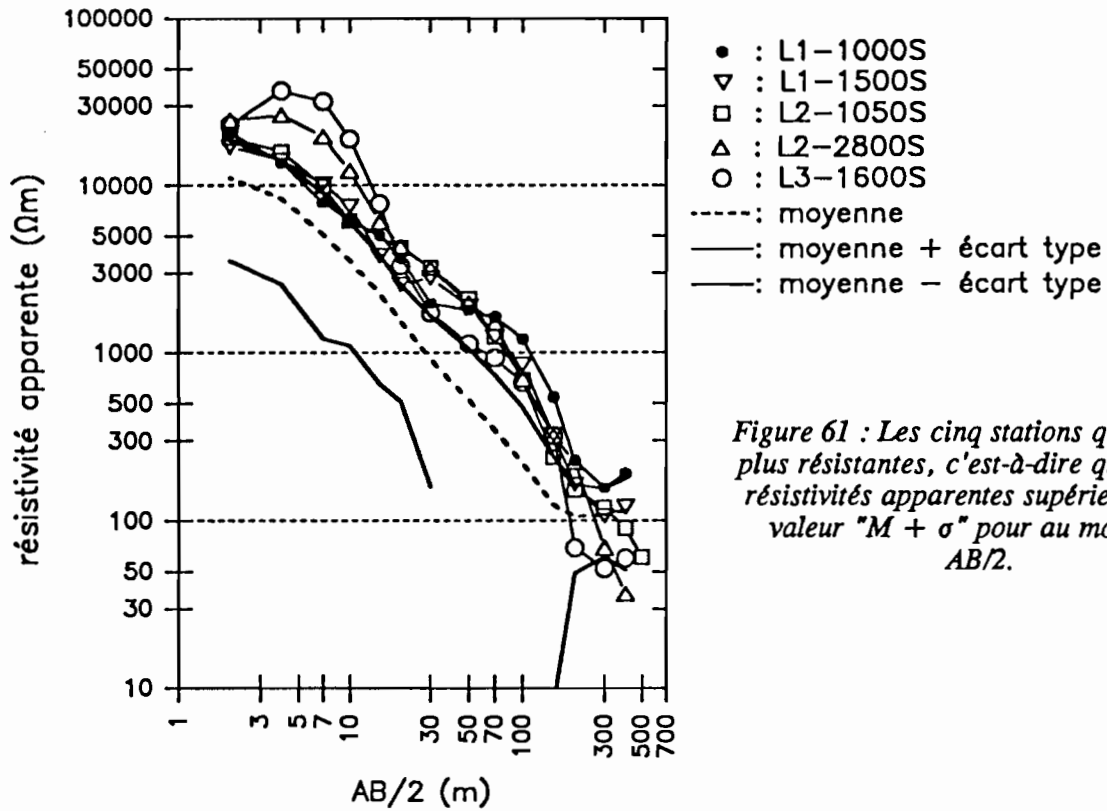


Figure 61 : Les cinq stations qui sont les plus résistantes, c'est-à-dire qui ont des résistivités apparentes supérieures à la valeur " $M + \sigma$ " pour au moins dix AB/2.

Les deux stations de vallée de type "très résistant", L4-400N et L8-4300N, présentent une courbe de résistivité apparente très contrastée (Figure 62). Elles sont très résistantes à faible profondeur, pour les écartements en AB/2 inférieurs à 20m, puis elles deviennent peu résistantes à plus grande profondeur (AB/2 > 20m). Leurs minima sont atteints pour AB/2=50m à 57Ωm (L4-400N) et 38Ωm (L8-4300N). Ces deux stations sont situées dans la vallée du Kokoyon à proximité du marigot (Figure 60).

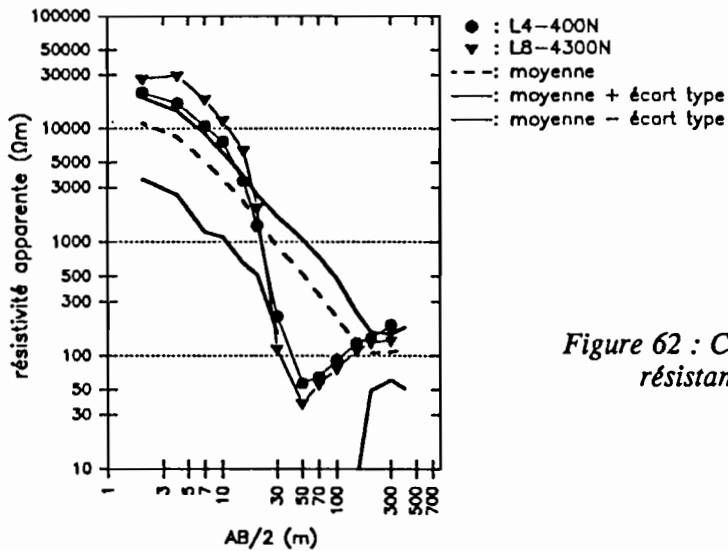


Figure 62 : Courbes des deux SE de vallée de type "très résistant".

Parmi les vingt trois stations de plateau, on distingue deux types de courbe "très résistante" d'après la position de leur minimum. Pour le premier type, le minimum est atteint entre AB/2=200m et AB/2=300m, et il y a ensuite une amorce de remontée finale de la courbe, ce minimum est supérieur à 100Ωm sauf pour trois SE, L2-800S, L3-1600S et L3-2100S, où il est respectivement de 84, 50 et 83Ωm (Figure 63).

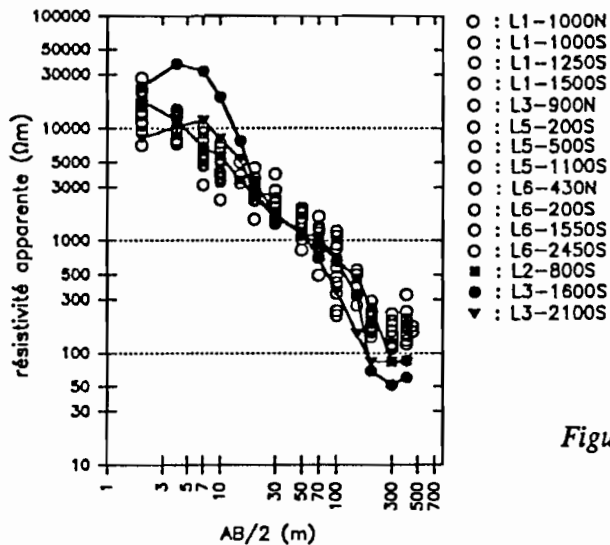


Figure 63 : Les quinze SE résistants du plateau de Banankoro, qui présentent une remontée finale à partir de  $AB/2=200m$ .

Pour le second type, il n'y a pas de remontée finale même pour des  $AB/2$  compris entre 400 et 500m, le minimum est inférieur à  $100\Omega m$ , sauf pour le SE L4-1100S, où il est de  $137\Omega m$  (Figure 64). Le premier type de courbe compte quinze SE : L1-1000N, L1-1000S, L1-1250S, L1-1500S, L2-800S, L3-900N, L3-1600S, L3-2100S, L5-200S, L5-500S, L5-1100S, L6-430N, L6-200S, L6-1550S, L6-2450S. Le second en compte huit : L2-1050S, L2-1300S, L2-1550S, L2-2550S, L2-2800S, L4-1100S, 400W-1600S, 1550W-1600S. Les SE du second type sont tous localisés sur le plateau de Banankoro, sur le layon L2 ou juste à proximité, sauf les stations 1550W-1600S et L4-1100S qui sont décalées vers l'Ouest.

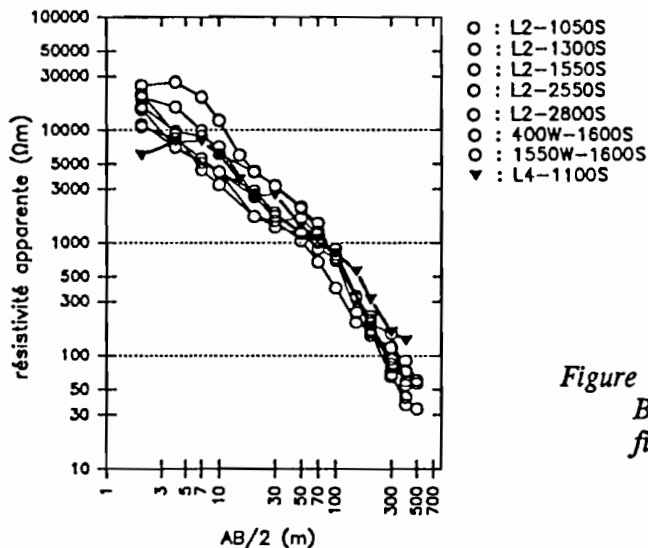


Figure 64 : Les huit SE résistants du plateau de Banankoro, qui ne présentent pas de remontée finale jusqu'à  $AB/2=450$  et  $500m$ .

On remarque que les courbes des stations L2-800S, L3-1600S et L3-2100S, par leurs minima inférieurs à  $100\Omega m$ , pourraient être des équivalents des courbes du second type mais avec des horizons moins épais puisqu'il y a un début de remontée finale de la courbe à partir de  $AB/2=300m$ . De plus, ces trois stations sont proches du layon L2. Par contre, la courbe de la station L4-1100S pourrait appartenir au premier groupe, avec un minimum supérieur à  $100\Omega m$ , mais son profil serait plus épais.



En conclusion, on met en évidence sur le secteur de Banankoro vingt cinq stations que l'on peut qualifier d'anormalement résistantes puisqu'elles ont des résistivités apparentes supérieures à la valeur "moyenne + écart-type" pour au moins cinq AB/2 sur quatorze. Ces stations sont principalement des stations de plateau. On distingue très facilement les stations de plateau de celles de vallée : les premières ont des courbes qui n'atteignent leurs minima qu'à partir de AB/2=300m, alors que, pour les secondes, elles l'atteignent dès AB/2=50m. De plus, parmi les stations de plateau, on distingue encore deux types de courbe : celles qui amorcent leur remontée finale à partir de AB/2=200m et AB/2=300m et qui ont un minimum supérieur à 100Ωm, et celles qui n'amorcent pas de remontée finale même pour AB/2=400, 450 et 500m et qui ont pour ces AB/2 des résistivités apparentes inférieures à 100Ωm. La plupart de ces stations sont situées sur le layon L2 ou à proximité ; elles correspondent à un profil d'altération plus épais avec un niveau certainement plus conducteur en profondeur que celui des autres stations du plateau. Ces stations tout à fait particulières se localisent à proximité d'une importante anomalie superficielle en or et arsenic liée à un stockwerk quartzeux ferruginisé de type "shear-zone", mise en évidence par le B.R.G.M. (COTTARD *et al.*, 1981 ; VERNET *et al.*, 1988). Il y aurait donc une relation entre ces stations et le couloir de fracturation minéralisée.

## B. Les cartes de résistivité apparente

Les cartes de résistivité apparente réalisées pour les différents AB/2, mettent en évidence l'organisation spatiale des résistivités apparentes à différentes profondeurs. On présente dans ce paragraphe onze cartes de résistivité correspondant aux AB/2 suivants : 2m, 4m, 7m, 10m, 20m, 30m, 50m, 70m, 100m, 200m et 300m (Annexe cartes 4 à 14). Pour chaque AB/2, ces cartes représentent les variations de résistivité apparente d'un SE à l'autre pour une épaisseur de terrain donnée. Plus AB/2 augmente, et plus la profondeur des terrains concernés augmente.

Quand pour un même AB/2, il y a plusieurs valeurs de résistivité apparente, correspondant aux changements des électrodes M et N, on calcule leur moyenne. Si par contre, il manque une valeur, on l'estime d'après les résistivités apparentes des AB/2 les plus proches de manière à éviter les trous dans le réseau des stations. Ce dernier cas reste très rare.

Les cartes ainsi obtenues peuvent être regrouper en trois grandes familles d'après l'organisation des courbes de résistivité apparente. Ces trois familles apparaissent successivement, par ordre d'écartement croissant des électrodes. La première contient les cartes dites de faible profondeur avec AB/2=2m, 4m et 7m, la deuxième les cartes dites de moyenne profondeur avec AB/2=10m, 20m, 30m, 40m, 50m, 70m et 100m, la troisième les cartes dites de grande profondeur avec AB/2=200m et 300m.

### 1. Les cartes de résistivité apparente de faible profondeur

Les cartes de résistivité apparente, pour AB/2=2m, 4m et 7m, présentent le même type d'organisation (Annexe cartes 4, 5 et 6). Elles se caractérisent par une forte hétérogénéité spatiale des résistivités apparentes d'une station à l'autre : il n'y a pas de grande zone où les stations présentent des valeurs proches. Les courbes d'iso-valeur ont donc des formes concentriques, centrées sur un faible nombre de station, seulement une à trois.

Pour la première carte de résistivité apparente, AB/2=2m, on met en évidence dix neuf stations qualifiées de très conductrices, parce qu'elles ont des résistivités apparentes inférieures à la valeur "moyenne - écart-type" de l'ensemble des SE ( $\rho_a < M - \sigma$ ). Les vallées ont nettement plus de stations très conductrices que les plateaux, respectivement quinze et quatre (Tableau 14). Ces stations sont dispersées sur le secteur, sauf les stations L0-2075S et L0-2375S, L2-0 et L2-250S pour les vallées, et les stations L5-400N et L5-100N pour les plateaux qui sont voisines. De la même façon, en prenant les stations qui ont des résistivités apparentes supérieures à la valeur "moyenne + écart-type" ( $\rho_a > M + \sigma$ ), on met en évidence seize stations très résistantes. Les plateaux ont plus de stations très résistantes que les vallées, respectivement onze et cinq (Tableau 15). Ces stations sont dispersées sur le secteur, sauf les stations L3-1600S et L3-1850S, L6-430N et L6-100N pour le plateau qui sont voisines.

On garde le même type de distribution pour les cartes suivantes de AB/2=4m et 7m. D'une carte à l'autre, les stations résistantes ont tendance à rester résistantes (Tableau 15), et les stations conductrices ont tendance à rester conductrices (Tableau 14).

Tableau 14 : Répartition des stations très conductrices ( $\rho_a < M - \sigma$ ) pour les cartes de résistivité apparente en AB/2 de 2m, 4m, 7m et 10m, en distinguant les vallées et les plateaux.

station	AB/2 = 2m résistivité (Ωm) < 3543 (M-σ)	station	AB/2 = 4m résistivité (Ωm) < 2562 (M-σ)	station	AB/2 = 7m résistivité (Ωm) < 1210 (M-σ)	station	AB/2 = 10m résistivité (Ωm) < 1099 (M-σ)
<b>VALLÉES</b>							
L0-250N	2585	L0-250N	2548			L0-250N	923
L0-2075S	424	L0-2075S	440	L0-2075S	541	L0-1500S	1026
L0-2375S	1134	L0-2375S	664	L0-2375S	547	L0-2075S	605
L1-750N	3427					L0-2375S	518
L1-750S	2764	L1-2625S	1822	L1-2625S	1066	L1-2625S	444
L1-2625S	2225					L1-2875S	885
L2-0	1267	L2-0	1542			L2-250S	182
L2-250S	286	L2-250S	325	L2-250S	324	L3-150N	1103
L3-2850S	998	L3-2850S	734	L3-2850S	392	L3-2850S	224
L4-100S	1643	L4-100S	1487				
L4-600S	2688						
L4-1850S	3136	L5-2300S	2382				
L5-2300S	2884	L5-3200S	3744				
L9-1600N	3360	L9-1600N	1935	L9-1600N	905	L7-1100S	994
4500W-2000S (effectif)	2944 (15)		(11)		(6)	L9-1600N	469
							(11)
<b>PLATEAUX</b>							
L4-1350S	1503	L4-1350S	1220				
L5-400N	2719	L5-400N	2142				
L5-100N	2895						
L5-1700S	3351						
(effectif)	(4)		(2)				

Tableau 15 : Répartition des stations très résistantes ( $\rho_a > M + \sigma$ ) pour les cartes de résistivité apparente en AB/2 de 2m, 4m, 7m et 10m, en distinguant les vallées et les plateaux.

station	AB/2 = 2m résistivité (Ωm) > 18701 (M+σ)	station	AB/2 = 4m résistivité (Ωm) > 14152 (M+σ)	station	AB/2 = 7m résistivité (Ωm) > 8974 (M+σ)	station	AB/2 = 10m résistivité (Ωm) > 6025 (M+σ)
<b>VALLÉES</b>							
L1-250S	20917						
L2-3300S	25907	L2-3300S	15007				
L4-400N	20647	L4-400N	16699	L4-400N	10455	L4-400N	7615
L4-2350S	34570						
L8-4300N	27489	L7-2900S	17818	L8-4300N	18143	L8-4300N	11761
(effectif)	(5)	L8-4300N	29429		(2)		(2)
		L8-700N	14398				
		(effectif)	(5)				
<b>PLATEAUX</b>							
L1-1000S	20617	L1-1500S	14202	L1-1500S	10250	L1-1000S	6153
L1-2075S	47534	L1-2075S	24558	L1-2075S	9810	L1-1500S	7493
L2-1050S	19347	L2-1050S	15976	L2-1050S	9927	L2-1050S	6127
L2-2800S	24715	L2-2800S	26481	L2-2800S	19596	L2-2550S	7130
L3-900N	27678	L3-900N	14615	L3-1600S	31924	L2-2800S	12216
L3-1600S	23181	L3-1600S	37037	L3-2100S	11813	L3-1600S	19008
L3-1850S	20869	L3-1850S	14444	L5-200S	9210	L3-1850S	6520
				L6-700N	13987	L3-2100S	8168
L6-430N	21716	L6-700N	29757			L4-1100S	6037
L6-100N	23283					L5-200S	6772
L9-4300N	24567						
400W-1600S	20809						
(effectif)	(11)		(8)		(8)		(10)

Cependant quand  $AB/2$  augmente, le nombre de station très conductrice sur plateau diminue très rapidement, et dès  $AB/2=7m$ , ce type de station n'existe plus. Par contre, le nombre de station très conductrice pour les vallées reste stable à une dizaine de stations.

C'est l'inverse pour les stations très résistantes : leur nombre reste stable à une dizaine pour le plateau, par contre il diminue à deux pour les vallées. Ces deux stations ont déjà été mises en évidence comme étant anormalement résistantes sur l'ensemble des  $AB/2$ , il s'agit des stations L4-400N et L8-4300N de la vallée du Kokoyon.

Cette hétérogénéité spatiale des résistivités apparentes mesurées s'explique par le fait que les différents types d'horizon qui affluent, comme les cuirasses, le recouvrement argilo-quartzeux, les gravillons et les blocs ferrugineux, se rencontrent aussi bien sur les plateaux que dans les vallées et un horizon de même nature ne couvre pas de surface importante à l'échelle du réseau des stations de géophysique, qui est hectométrique.

## 2. Les cartes de résistivité apparente de moyenne profondeur

A partir de  $AB/2=10m$ , la tendance pour les stations très conductrices ( $\rho_a < M-\sigma$ ) à être situées dans les vallées et celle pour les stations très résistantes ( $\rho_a > M+\sigma$ ) à être situées sur les plateaux se renforce (Tableaux 14 et 15). Si bien qu'à partir de  $AB/2=20m$ , l'organisation des courbes d'iso-résistivité apparente changent : elles s'organisent en fonction de la morphologie de la surface, c'est-à-dire en fonction des vallées et des plateaux. Donc, de  $AB/2=20m$  à  $AB/2=100m$ , on peut dire que les vallées sont conductrices et les plateaux sont résistants (Annexe cartes 8, 9, 10, 11 et 12).

Pour ces écartements, il n'y a plus de station très résistante dans les vallées. Par contre sur les plateaux, certaines stations sont nettement plus résistantes que d'autres : les courbes d'iso-valeur sont très resserrées autour de certaines stations comme L1-1000N sur le plateau de la Dinkolé, et L1-1000S, L1-1250S, L1-1500S, L2-1050S, L2-1300S, L2-2800S, 400W-1600S, L4-1100S, L5-200S, L5-500S, L6-200S, L6-1550S, L6-2450S et L9-2500N sur le plateau de Banankoro. Parmi ces stations, celles qui sont situées sur le plateau de Banankoro, entre les layons L2 et L5, forment un axe résistant étroit sur environ 500m de large pour 3km de long. Cet axe est parallèle à l'allongement du plateau, et il en constitue la partie centrale. Il se termine à l'Ouest au niveau de la vallée de la Guilingoué, et il s'oriente vers le Nord-Est au niveau du layon L2. Cet axe correspond en surface à des altitudes relativement élevées le long d'une arête. De même, les autres stations résistantes et isolées ont tendance à se placer sur les sommets topographiques.

Il existe aussi sur les plateaux des stations qui ont des résistivités apparentes semblables à celles des stations de vallée. Elles se situent préférentiellement sur les bords des plateaux, comme les stations L0-750S, L0-1000S, L0-1250S, L1-2375S, L2-2300S, L5-2000S, L5-2600S, L5-2900S, L6-2000S, L6-2900S, L7-200S et L9-4300N. La partie occidentale du plateau de Banankoro, située à l'Ouest du layon L6, est beaucoup moins résistante que celle située à l'Est de ce layon, et qui se marque par l'axe résistant. A partir de  $AB/2=70m$ , les stations de cette partie ouest ont les mêmes résistivités apparentes que certaines stations de vallées, sauf les stations L9-3400N et L9-2900N qui restent résistantes. On remarque que ces deux dernières stations sont situées de part et d'autre d'un sommet qui culmine à près de 470m, le Koro Nidjan, avec respectivement des altitudes de 430m et 450m, alors que les autres stations de cette partie ouest sont toutes à moins de 420m d'altitude.

La station 400E-1600S, située entre les layons L1 et L2 en plein milieu du plateau de Banankoro, juste à l'extrémité est de l'axe résistant du plateau, apparaît anormalement conductrice. C'est sans doute lié au fait qu'elle se trouve juste sur un axe de drainage, en aval d'un petit cirque d'érosion, qui entaille les niveaux indurés superficiels du profil sur un des sommets topographiques du plateau.

Pour les cartes de  $AB/2=20m$  à  $AB/2=100m$ , on peut essayer de trouver la courbe d'iso-résistivité apparente qui délimite les plateaux et les vallées. Mais en fait, les intervalles de variation des résistivités apparentes sur ces deux unités morphologiques ne sont jamais complètement disjoints, quel que soit l'écartement  $AB/2$ . On a toujours une zone de recouvrement entre les faibles valeurs de résistivité mesurées sur les plateaux et les fortes valeurs des vallées. Il y a donc toujours, sur le plateau, des stations qui ont des résistivités apparentes comparables à celles des vallées. Cette frange intermédiaire de résistivité diminue avec la profondeur lorsque l'on passe de  $AB/2=20m$  à  $AB/2=100m$  (Tableau 16) : du point de vue résistivité électrique, la limite entre plateau et vallée

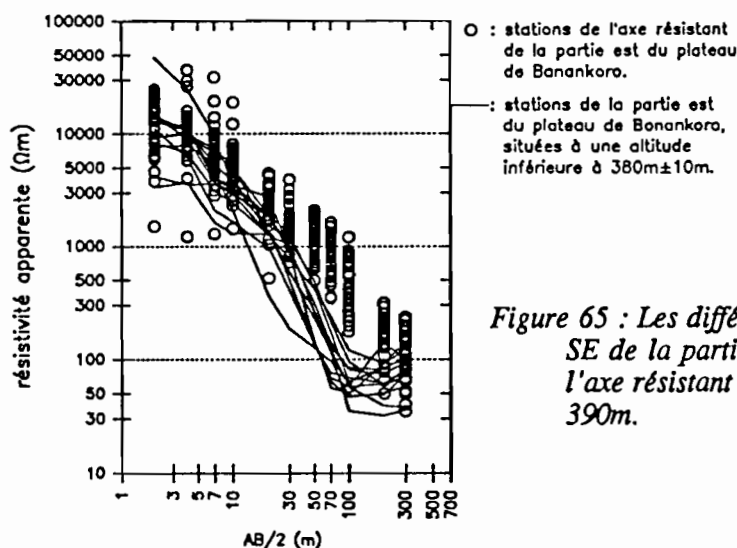
devient donc de plus en plus nette en profondeur jusqu'à celle atteinte pour  $AB/2 = 100m$ .

**Tableau 16 : Valeurs supérieures et inférieures des résistivités apparentes qui délimitent les SE des plateaux de ceux des vallées, pour les  $AB/2$  de 20m à 100m.**

résistivité apparentes ( $\Omega m$ )	AB/2				
	20m	30m	50m	70m	100m
limite supérieure	1750	750	800	525	300
limite inférieure	1250	450	450	300	200

Le trait commun à toutes ces stations de plateau, relativement conductrices par rapport aux stations de l'axe résistant du plateau de Banankoro, est qu'elles sont situées sur des points topographiques bas. Plus précisément, sur la partie orientale du plateau de Banankoro, elles sont situées en-dessous de la cote 380m pour les zones où la carte topographique a été établie avec une équidistance de 5m (OUOLOGUEM *et al.*, 1991), ailleurs la limite reste aux environs de  $380m \pm 10m$  (Figure 65). Sur cette partie, les points hauts sont alignés au centre du plateau parallèlement à son allongement, et donc les stations conductrices de plateau sont à proximité des rebords de plateau. C'est le cas pour l'extrémité orientale du plateau de Banankoro, au niveau du layon L0, au Sud du layon L1, au Nord et Sud du layon L5, avec les stations L0-750S, L0-1000S, L0-1250S, L1-1750S, L1-2075S, L1-2375S, L5-400N, L5-100N, L5-1700S, L5-2000S, L5-2600S et L5-2900S. D'autres stations de plateau relativement conductrices, L2-2300S et L6-2000S, sont situées dans une légère dépression topographique encadrée par deux sommets.

Dans la partie occidentale du plateau de Banankoro, le nombre des stations relativement conductrices est plus important que sur la partie orientale, surtout sur les layons L7 et L8. On remarque que sur cette zone, à l'exception du sommet du Koro Nidjan situé à l'extrémité ouest du plateau, il n'y a pas de bombement topographique majeur : la surface du plateau est très légèrement ondulée, avec une inclinaison générale faible en direction de la vallée du Kokoyon.



**Figure 65 : Les différences de résistivités apparentes entre les SE de la partie est du plateau de Banankoro situés sur l'axe résistant et les SE situés à une altitude inférieure à 390m.**

Les meilleures corrélations qui existent entre les résistivités apparentes et les altitudes des stations sont pour les  $AB/2$  compris entre 20m et 100m (Figure 66). Pour ces écartements, le coefficient de corrélation par rapport à la droite de régression est supérieur à 0,50, et il atteint la valeur maximale de 0,75 pour  $AB/2 = 50m$ . A moyenne profondeur, il y a donc une relation entre les résistivités apparentes mesurées et les altitudes des stations, aussi bien pour les vallées que pour les plateaux : les points élevés ont tendance à avoir de fortes résistivités apparentes, et inversement pour les points bas.

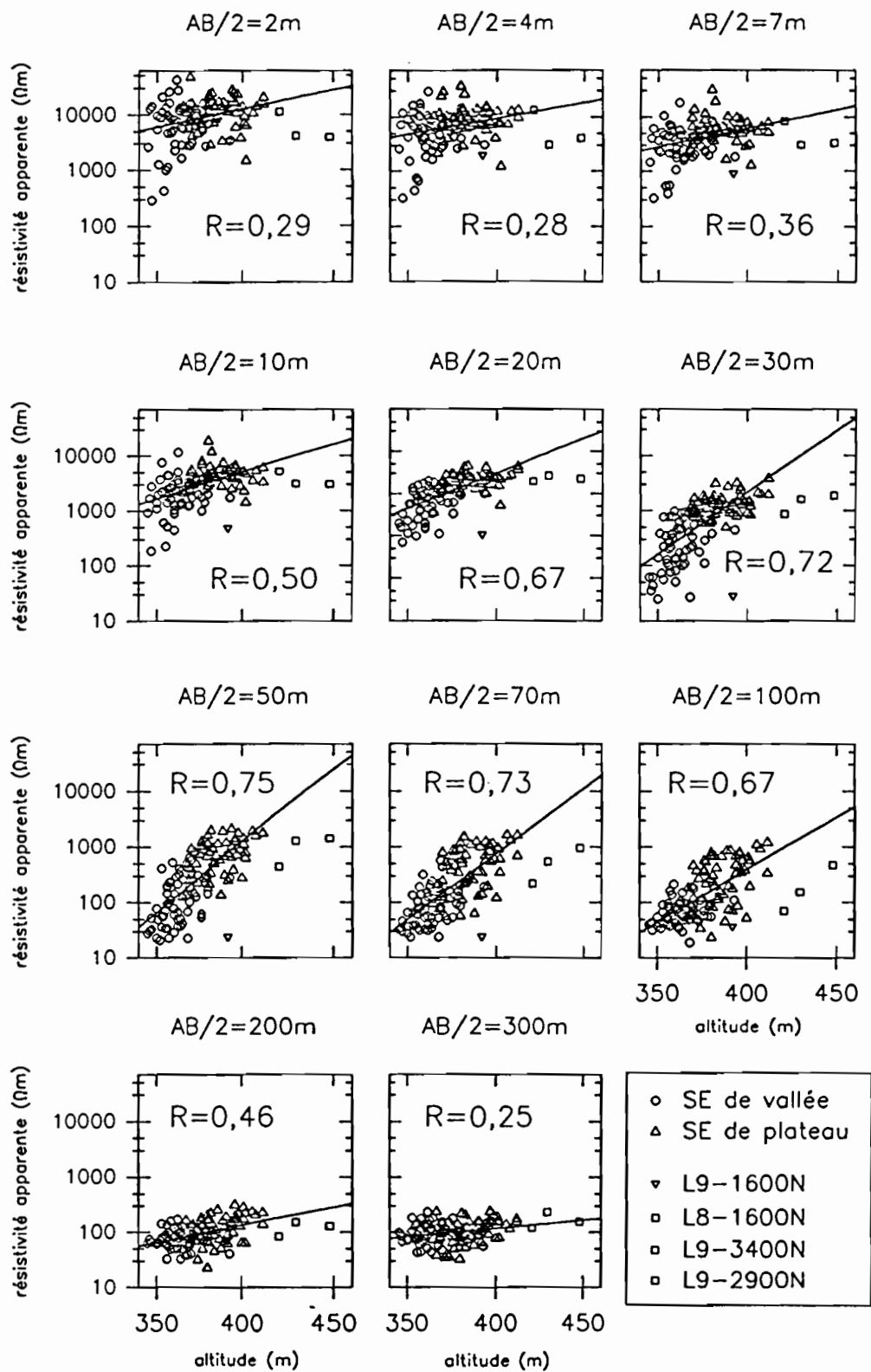


Figure 66 : Corrélations entre les résistivités apparentes et les altitudes des stations, pour chaque  $AB/2$ , en distinguant les vallées et les plateaux.

Pour le calcul de la droite de régression, quatre stations voisines n'ont pas été prises en compte : ce sont les stations L9-1600N de la vallée de Diourouka, L8-1600N, L9-3400N et L9-2900N sur l'extrémité ouest du plateau de Banankoro. La station L9-1600N a une altitude nettement supérieure à celles des autres stations de vallée ; il en est de même pour les trois autres stations de plateau. Par contre, leurs résistivités ne sont jamais supérieures à celles des autres stations (Figure 66), elles sont dans les mêmes domaines de valeur que les autres SE. Ces quatre stations ne suivent donc pas la tendance générale qui associe fortes altitudes et fortes résistivités apparentes. Elles pourraient être caractéristiques d'un profil d'altération différent de celui du reste du secteur, localisé aux plus fortes altitudes autour du sommet du Koro Nidjan.

Finalement, on met bien en évidence ici des changements du profil d'altération à moyenne profondeur en relation avec la position topographique des stations : les profils d'altération de basse altitude sont plus conducteurs que ceux d'altitude plus élevée, sous les plateaux comme sous les vallées. Ceci peut s'expliquer par le fait que les horizons du profil d'altération qui sont situés entre les niveaux résistants de surface et le niveau conducteur profond et qui ont des résistivités intermédiaires, sont plus développés sous les zones élevées que sous les zones basses.

### 3. Les cartes de résistivité apparente de grande profondeur

A partir de  $AB/2=200m$  et par rapport aux plus petits  $AB/2$ , l'organisation des courbes de résistivité apparente changent à nouveau. Les courbes dans les vallées se perturbent, elles ne sont plus parallèles à leurs axes d'allongement (Annexe cartes 13 et 14). Certaines stations deviennent relativement résistantes comme les stations L4-650N, L4-400N, L4-100N et L0-500S pour la vallée du Kokoyon, comme les stations L4-1850S et L4-2600S pour la vallée sud et la station L7-1100S pour la vallée de Guilingoué. Inversement, des stations de plateaux deviennent relativement conductrices comme les stations L3-600S, L3-1350S et L3-1600S. Ces changements sont dus au fait que les courbes des stations des vallées amorcent déjà leur remontée finale pour  $AB/2=200m$  et  $AB/2=300m$ , elles atteignent donc des résistivités apparentes supérieures à celles des courbes des stations des plateaux qui n'ont pas encore atteint leur minimum ou qui l'atteignent tout juste (Figure 67). Cela est d'autant plus vrai que le minimum des courbes des vallées a une forte résistivité apparente pour un faible  $AB/2$ .

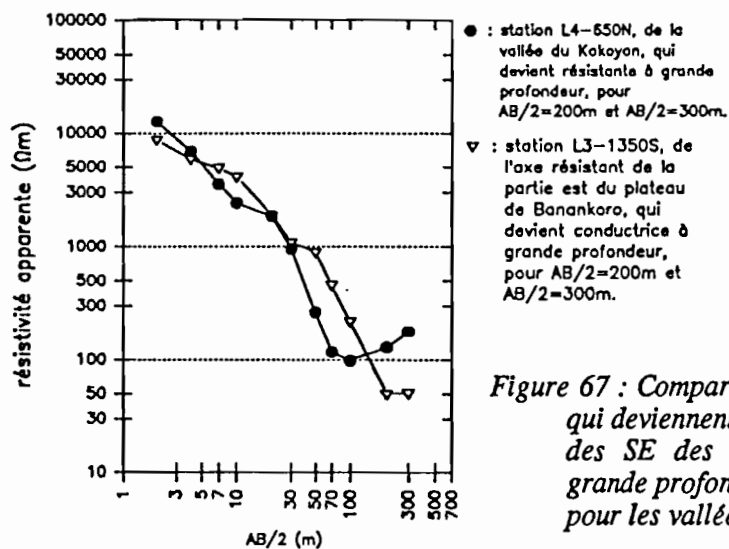


Figure 67 : Comparaison entre les courbes des SE des vallées qui deviennent résistantes à grande profondeur, et celles des SE des plateaux qui deviennent conductrices à grande profondeur, avec l'exemple des stations L4-650N pour les vallées et L3-1350S pour les plateaux.

A grande profondeur, l'axe résistant du plateau de Banankoro devient conducteur au niveau du layon L3 : en  $AB/2=200m$ , les stations L3-1350S, L3-1600S, L3-1850S et L3-2100S deviennent aussi conductrices que celles des vallées. En  $AB/2=300m$ , on observe le même phénomène avec en plus les stations 400W-1600S, L2-800S, L2-1300S, L2-1800S, L2-2050S et 1500W-1600S. Cette zone conductrice du plateau a donc tendance à s'élargir avec la profondeur. En comparant les courbes des stations de l'axe résistant qui restent résistantes à grande profondeur avec celles des stations qui

deviennent conductrices, on n'observe pas de différences significatives entre ces courbes jusqu'à  $AB/2=200\text{m}$  (Figure 68). A partir de  $AB/2=200\text{m}$ , on distingue nettement trois groupes de stations (Figure 69) :

- le premier groupe, constitué par des stations du layon L3 (L3-1350S, L3-1600S, L3-1850S, L3-2100S), atteint des résistivités apparentes inférieures à  $100\Omega\text{m}$  dès  $AB/2=200\text{m}$  ;
- le deuxième groupe, constitué par des stations du layon L2 (L2-800S, L2-1300S, L2-1800S, L2-2050S) et des stations isolées (400W-1600S, 1500W-1600S), atteint des résistivités apparentes inférieures à  $100\Omega\text{m}$  seulement pour  $AB/2=300\text{m}$  ;
- le troisième groupe est constitué par des stations qui gardent des résistivités apparentes supérieures à  $100\Omega\text{m}$  et restent donc relativement résistantes jusqu'à  $AB/2=300\text{m}$  (L2-1050S, L2-1550S, L4-1100S, L4-1350S, L4-1600S, L5-500S, L5-800S et L5-1100S).

Il est difficile d'interpréter plus précisément ces différences car la plupart des mesures s'arrêtent en  $AB/2=300\text{m}$ , et les stations de l'axe résistant du plateau qui deviennent conductrices à grande profondeur n'ont pas toutes des courbes de SE identiques : certaines correspondent à un profil d'altération moins épais que d'autres, et certaines ont un conducteur profond moins résistant que d'autres.

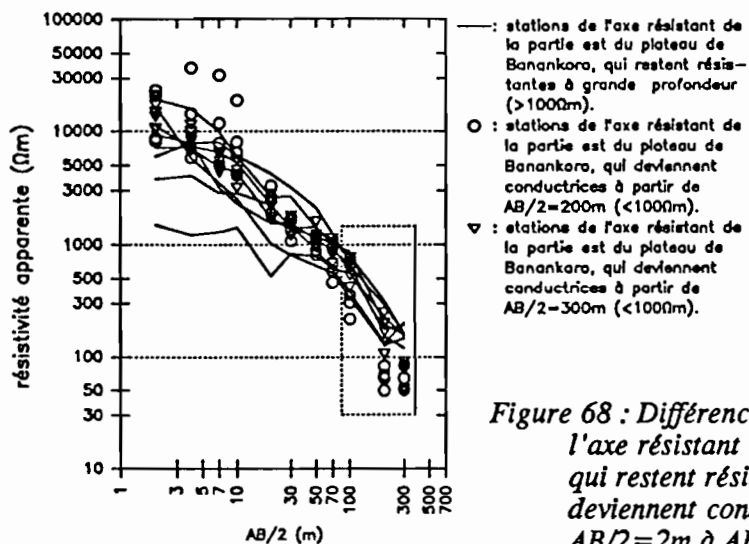


Figure 68 : Différences entre les courbes de SE des stations de l'axe résistant de la partie est du plateau de Banankoro qui restent résistantes à grande profondeur, et celles qui deviennent conductrices, en représentant les courbes de  $AB/2=2\text{m}$  à  $AB/2=300\text{m}$ .

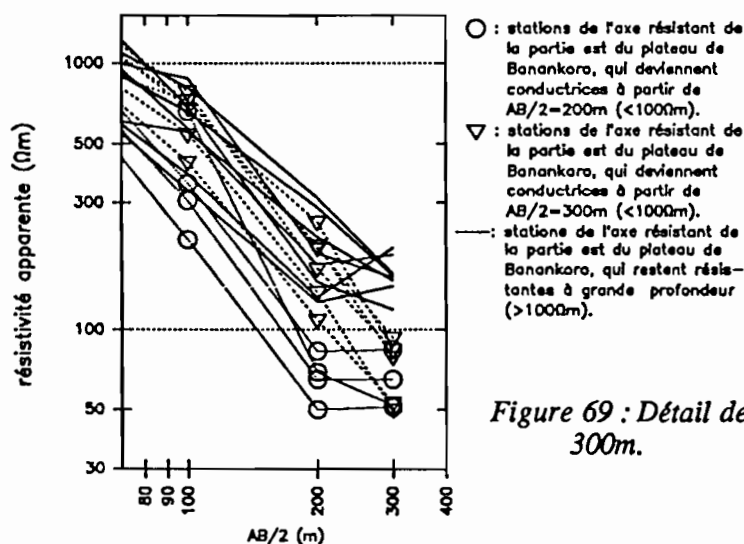


Figure 69 : Détail de la figure 68 pour les  $AB/2$  de 100, 200 et 300m.



Donc au niveau de l'axe résistant du plateau de Banankoro, c'est à la base du profil d'altération qu'apparaissent des hétérogénéités avec l'individualisation d'une zone nettement conductrice ( $< 100\Omega\text{m}$ ), centrée sur le layon L3 dès  $AB/2=200\text{m}$ , et qui s'étend à six stations situées sur le layon L2 ou à proximité pour  $AB/2=300\text{m}$ . Par rapport à l'ensemble du secteur de Banankoro, cette zone anormalement conductrice semble se resserrer autour du layon L2 à plus grande profondeur, puisque les stations du layon L2 n'ont pas encore leur minimum pour  $AB/2=300\text{m}$  et que la plupart d'entre elles ont déjà des résistivités apparentes inférieures à  $100\Omega\text{m}$ . Cette zone semble correspondre à un épaissement des niveaux résistants intermédiaires placés entre les résistants de surface et le conducteur profond ainsi qu'à une diminution de résistivité conducteur profond pour les stations situées à proximité du layon L2 par rapport à celles du layon L3. Comme cela a déjà été écrit précédemment, cette zone pourrait être en relation avec un large couloir de stockwerk de type "shear-zone", porteur d'une minéralisation aurifère mise en évidence sur le rebord nord du plateau de Banankoro à l'Ouest du layon L2 (COTTARD *et al.*, 1981 ; VERNET *et al.*, 1988)).

#### 4. Conclusion

Les cartes de résistivité apparente mettent en évidence trois grands types de zonalité géoélectrique en fonction de la profondeur d'investigation. D'une manière générale, on observe :

- d'abord, de  $AB/2=2\text{m}$  à  $AB/2=7\text{m}$ , c'est-à-dire à faible profondeur, une forte hétérogénéité des résistivités apparentes d'une station à l'autre ;
- puis, de  $AB/2=10\text{m}$  à  $AB/2=100\text{m}$ , c'est-à-dire à moyenne profondeur, une localisation préférentielle des fortes résistivités apparentes sous les plateaux et des faibles résistivités apparentes sous les vallées ;
- enfin, pour  $AB/2=200\text{m}$  et  $AB/2=300\text{m}$ , c'est-à-dire à grande profondeur, l'individualisation de zone conductrice et de zone résistante qui recourent les plateaux et les vallées.

A faible profondeur, la forte hétérogénéité des résistivités apparentes observée d'une station à l'autre, est due au fait que les horizons, qui affleurent, sont de natures très variées. Ce sont tantôt des cuirasses nues et compactes, tantôt des matériaux issus du démantèlement des niveaux indurés, allant des blocs au gravillons ferrugineux, ou bien des matériaux argilo-silteux remontés par les termites. Ces différents horizons affleurent sur de petites surfaces, généralement inférieures à la maille du réseau des stations de mesure.

A moyenne profondeur, la distribution des résistivités apparentes s'organise clairement en fonction de la morphologie du paysage. Les courbes des SE sont nettement plus résistantes sous les plateaux que sous les vallées. Il existe, sur la partie est du plateau de Banankoro, un axe très résistant, parallèle à son allongement et passant par ses points topographiques hauts. Cependant il existe aussi, sur les plateaux, des stations qui présentent des résistivités apparentes proches de celles des stations de vallées. Elles se localisent alors préférentiellement dans les zones topographiques basses, qui sont souvent situées en rebord de plateau pour la partie est du plateau de Banankoro, et aussi sur tout un secteur de la partie ouest, qui ne présente pas de bombement topographique important.

A grande profondeur, l'apparition de zones conductrices et résistantes qui recourent aussi bien les plateaux que les vallées, dépend de l'emplacement du minimum sur les courbes des SE. On observe de fortes inversions de résistivité apparente : certaines stations conductrices dans les vallées deviennent résistantes et inversement pour des stations résistantes sur les plateaux. Cela traduit des différences importantes pour l'épaisseur du profil d'altération sous les plateaux et sous les vallées. Ainsi une zone anormalement conductrice semble se dessiner sous le plateau de Banankoro au niveau des layons L3 et L2 à proximité d'une anomalie de surface en or et arsenic lié à un système filonien quartzeux ferruginisé.



### C. Les principales familles de SE

Les 127 SE ont des courbes de résistivités apparentes dont l'aspect général se ressemble beaucoup, avec la même forme en V, mais elles peuvent être très différentes dans leurs détails. Il est impossible de décrire chaque courbe individuellement et de les comparer les unes aux autres : elles sont trop nombreuses. On cherche donc à les regrouper par famille de courbe semblable. Si les maxima, les minima, les moyennes, les écarts-types et les distributions des résistivités apparentes montrent bien la diversité des SE, les cartes d'iso-résistivités apparentes permettent d'effectuer des regroupements en suivant l'évolution de l'organisation spatiale de ce paramètre pour des écartements croissants.

La mise en évidence de trois types d'organisation pour les cartes d'iso-valeur est à la base de la constitution des différentes familles de SE. Etant donné le manque de références pour ce genre d'étude, ces cartes se sont révélées d'un apport considérable pour pouvoir caractériser les SE de Banankoro. En fait, ce sont les cartes dites de moyennes et de grande profondeur qui sont les plus exploitables, puisque celles de faible profondeur montrent trop de disparités d'une station à l'autre et une gamme de valeurs très étendue. D'après les observations faites à partir de ces cartes, on rassemble les stations qui ont des caractéristiques communes, c'est-à-dire qui montrent des évolutions similaires de résistivité apparente d'une carte à l'autre. Une famille de SE est caractérisée par une courbe de résistivité apparente moyenne, encadrée par deux courbes enveloppes représentant l'intervalle de confiance ; celui-ci est calculé suivant la formule de Student (MARSAL, 1987 ; REUCHLIN, 1987) :

$$l = t_{(\%) } \sigma_c / (N_c - 1)^{1/2}.$$

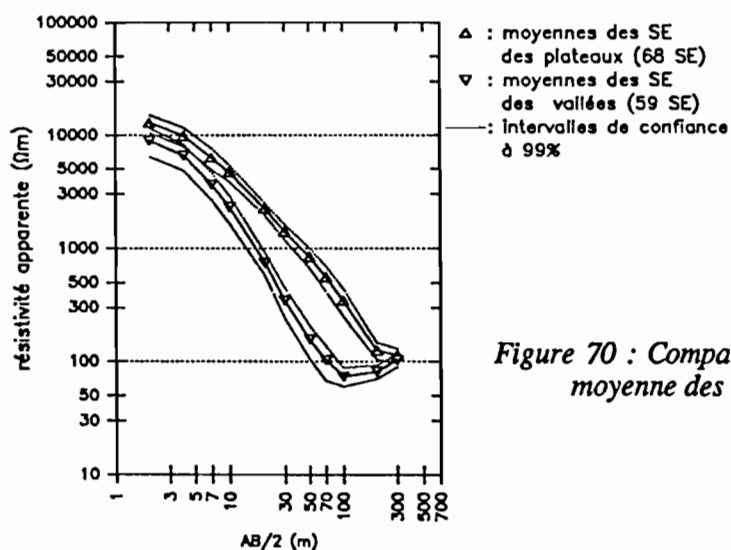
Le paramètre  $t_{(\%)}$  est fourni par la table de student en fonction du nombre de degré de liberté ( $N_c - 1$ ) et du seuil de confiance, fixé ici à 99%. La largeur de cet intervalle de confiance dépend donc du nombre de mesure  $N_c$  et de l'écart-type  $\sigma_c$  des résistivités apparentes pour chaque AB/2.

Cette représentation facilite la comparaison visuelle des courbes de résistivité apparente moyenne, correspondant à différentes familles de SE.

#### 1. Comparaison des SE de plateau et de vallée

La classification la plus simple pour les SE du secteur de Banankoro, est celle qui sépare les SE des plateaux de ceux des vallées, puisque ce sont les deux unités morphologiques principales qui composent le paysage. On s'en rend compte très rapidement sur le terrain en effectuant les mesures, mais c'est sur les cartes de résistivité apparente à moyenne profondeur que la distinction entre ces deux familles de SE est la plus évidente : les SE des plateaux sont plus résistants que ceux des vallées à moyenne profondeur.

Cela se voit aussi très clairement sur la figure 70 où l'on a représenté les courbes de résistivité apparente moyenne des 68 SE de plateau et des 59 SE de vallée avec leur enveloppe de dispersion.



Les valeurs des résistivités apparentes moyennes des SE des plateaux sont toujours supérieures à celles des SE des vallées, sauf en  $AB/2=300m$ , où elles sont presque égales. De  $AB/2=2m$  à  $AB/2=4m$ , les deux courbes de moyenne sont proches. De  $AB/2=7m$  à  $AB/2=100m$ , l'écartement qui les sépare augmente régulièrement. Finalement, elles se rapprochent pour  $AB/2=200m$ . Dès  $AB/2=7m$ , on peut donc dire que les SE des plateaux sont nettement plus résistants que ceux des vallées, et cela jusqu'à  $AB/2=200m$ . Le recouplement des deux courbes en  $AB/2=300m$ , est dû au fait que la courbe des moyennes des SE des vallées atteint son minimum à  $74\Omega m$  dès  $AB/2=100m$ , avant celle des SE des plateaux, qui l'atteint à  $114\Omega m$  seulement pour  $AB/2=300m$ .

Ces remarques indiquent que, sous les plateaux, les horizons situés entre les résistants de surface et le conducteur profond et ayant des résistivités intermédiaires, sont nettement plus développés que sous les vallées. Ce sont eux qui sont responsables du décalage existant entre les minima des deux types de SE. Les épaisseurs des profils d'altération sous les plateaux semblent donc nettement supérieures à celles des profils d'altération sous les vallées.

## 2. Comparaison entre les SE de plateau "résistants" et "conducteurs" à moyenne profondeur

D'après les cartes de résistivité apparente de  $AB/2=20m$  à  $AB/2=100m$ , certaines stations de plateau sont toujours résistantes par rapport aux stations les plus résistantes des vallées alors que d'autres deviennent aussi conductrices que des stations de vallées.

Comme cela a déjà été montré précédemment, les stations résistantes des plateaux sont situées à proximité des sommets topographiques, les stations conductrices sont situées dans des zones basses. On compare ces deux types de SE de plateau en calculant leurs résistivités apparentes moyennes pour chaque  $AB/2$  (Figure 71). Sur les 68 SE de plateau, il y a 39 SE qui restent résistants sur les cartes de résistivité apparente de moyenne profondeur (Figure 72), et 29 qui deviennent conducteurs (Figure 73).

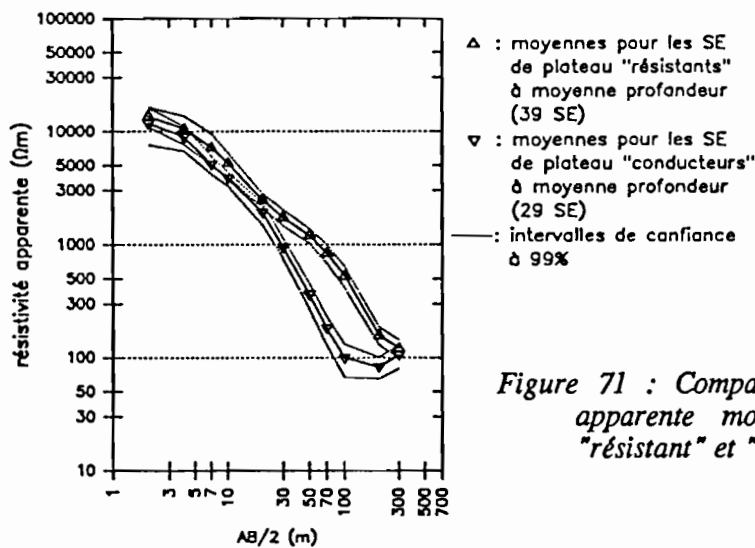


Figure 71 : Comparaison entre les courbes de résistivité apparente moyenne des SE de plateau de type "résistant" et "conducteur" à moyenne profondeur.

Les valeurs des résistivités apparentes moyennes des SE de plateau qui restent résistants à moyenne profondeur sont toujours supérieures à celles des SE de plateau qui deviennent conducteurs à moyenne profondeur, sauf en  $AB/2=300m$ . De  $AB/2=2m$  à  $AB/2=20m$ , les deux types de moyennes sont très proches. De  $AB/2=30m$  à  $AB/2=100m$ , les valeurs diffèrent, leur écartement est maximum pour  $AB/2=100m$ . En  $AB/2=200m$ , elles se rapprochent, et en  $AB/2=300m$ , elles sont presque identiques. La proximité des valeurs moyennes entre elles, de  $AB/2=2m$  à  $AB/2=20m$ , montrent sans doute que, pour les deux types de stations, les horizons du profil d'altération proches de la surface sont certainement comparables dans leurs diversités.

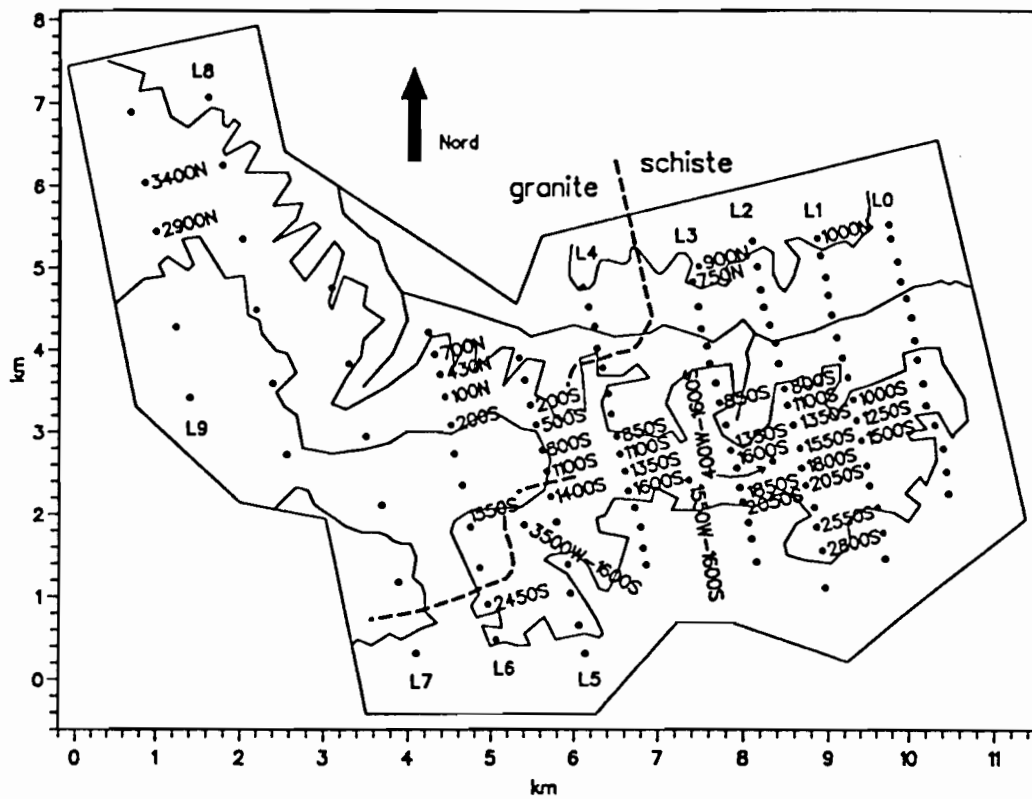


Figure 72 : Localisation des 39 stations de plateau résistantes à moyenne profondeur.

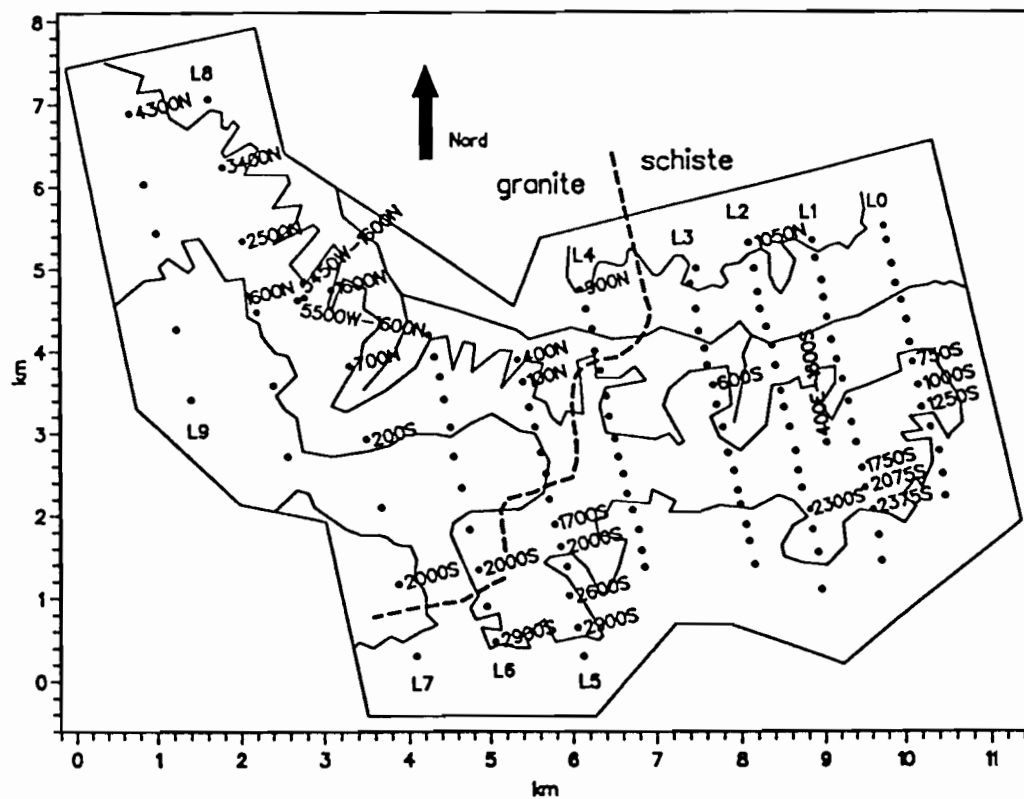
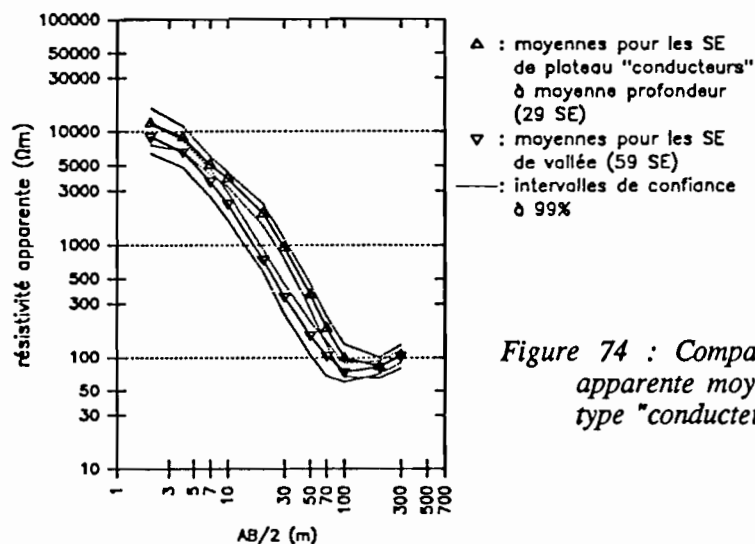


Figure 73 : Localisation des 29 stations de plateau conductrices à moyenne profondeur.

Le recouplement des deux types de courbes en  $AB/2=300m$ , est dû au fait que la courbe des moyennes des SE de plateau conducteurs à moyenne profondeur atteint son minimum en  $AB/2=200m$  à  $83\Omega m$ , avant celle des SE résistants à moyenne profondeur, qui amorce juste le palier du minimum en  $AB/2=300m$  à  $121\Omega m$ .

Ces observations montrent que, sous les zones hautes des plateaux, les horizons de résistivités intermédiaires, situés entre les résistants de surface et le conducteur profond, sont plus développés que sous les zones basses. Ce sont eux qui sont responsables du décalage existant entre les minima des deux types de SE. On retrouve donc dans ce cas, des différences analogues à celles observées entre les SE des plateaux et ceux des vallées, mais à un moindre degré. Il convient alors de comparer, de la même façon, les SE de plateau de type "conducteur" à moyenne profondeur et ceux de vallée (Figure 74).



Les valeurs des résistivités apparentes moyennes des SE de plateau "conducteurs" à moyenne profondeur sont toujours supérieures à celles des SE des vallées, sauf en  $AB/2=200m$  et en  $AB/2=300m$  où elles sont égales. Les deux courbes de moyennes sont proches, sauf de  $AB/2=20m$  à  $AB/2=50m$  où elles s'écartent distinctement. Pour ces écartements, les SE de plateau, "conducteurs" à moyenne profondeur, restent donc nettement plus résistants que ceux des vallées. La courbe de résistivité apparente moyenne des vallées atteint son minimum en  $AB/2=100m$  à  $74\Omega m$  avant celle des SE de plateau qui l'atteint en  $AB/2=200m$  à  $83\Omega m$ .

La courbe de résistivité apparente moyenne des SE de plateau "conducteurs" à moyenne profondeur occupe donc une position intermédiaire entre celle des SE de plateau "résistants" à moyenne profondeur et celle des SE de vallée. Or d'un point de vue topographique, les stations des SE de plateau "conducteurs" à moyenne profondeur occupent aussi une position intermédiaire entre celle des stations de SE de plateau "résistants" à moyenne profondeur et celle des stations de SE de vallée : elles sont situées dans les zones basses des plateaux, donc au-dessus des stations de vallée et en-dessous des stations proches des sommets.

On peut donc mettre en évidence une évolution des SE, et par conséquent des profils d'altération, depuis les sommets des plateaux jusque dans les vallées en passant par les zones basses des plateaux : les profils d'altération proches des sommets des plateaux ont tendance à avoir les résistivités et les épaisseurs les plus grandes du secteur de Banankoro ; inversement les profils des vallées ont tendance à avoir les résistivités et les épaisseurs les plus faibles ; les profils des zones basses des plateaux occupent une position intermédiaire, mais ils sont plus proches de ceux des vallées. Cette évolution se fait principalement entre les horizons résistants de surface et l'horizon conducteur en profondeur : l'épaisseur des horizons situés à moyenne profondeur augmente fortement depuis les vallées jusqu'aux

sommets des plateaux, et la résistivité de ces horizons a aussi tendance à augmenter.

En conclusion, il y a sur les plateaux du secteur de Banankoro deux familles de SE : les SE de plateau "résistants" à moyenne profondeur et ceux "conducteurs" à moyenne profondeur, qui sont eux-mêmes plus résistants à moyenne profondeur que les SE des vallées.

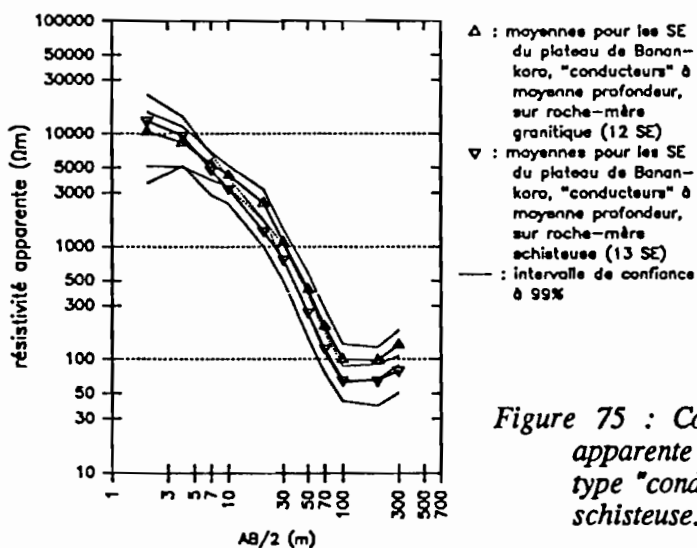
### 3. Comparaison des SE du plateau de Banankoro de type "conducteur" sur les deux roches-mères

On sait d'après les sondages magnéto-telluriques (PHAM *et al.*, 1989), que le terrain se partage en deux zones d'après la nature de la roche-mère : une zone ouest où on a reconnu une roche isotrope et très résistante de type granitique, et une zone est où la roche est plus anisotrope et moins résistante, de type schisteux. Or sur les cartes d'iso-résistivités apparentes des SE, quelque soit la profondeur d'investigation de  $AB/2=2m$  à  $AB/2=300m$ , ces deux zones n'apparaissent pas clairement.

On a quand même voulu comparer les courbes de résistivité apparente moyenne des stations du plateau de Banankoro situées sur la zone granitique et sur la zone schisteuse. Pour étudier ces stations de plateau, on respecte la distinction faite entre les stations "conductrices" à moyenne profondeur et celles "résistantes". On compare donc d'abord les stations de la zone granitique du plateau de Banankoro "conductrices" à moyenne profondeur avec celles de la zone schisteuse aussi "conductrices" à moyenne profondeur.

La famille des SE du plateau de Banankoro, "conducteurs" à moyenne profondeur, est représentée par douze stations sur la zone granitique et treize stations sur la zone schisteuse (Figure 73). La station L3-600S n'est pas retenue pour cette comparaison, sa courbe est nettement différente de celle des autres SE "conducteurs" de la zone schisteuse, elle est beaucoup plus résistante entre  $AB/2=70m$  et  $AB/2=100m$  et elle ne présente pas de remontée finale jusqu'à  $AB/2=300m$ .

Les résistivités apparentes moyennes des SE du plateau de type "conducteur" à moyenne profondeur sont légèrement plus élevées sur roche-mère granitique que sur roche-mère schisteuse pour tous les écartements, sauf en  $AB/2=2m$  et  $AB/2=4m$  où elles sont égales (Figure 75). Les deux courbes sont très proches entre  $AB/2=2m$  et  $AB/2=100m$ , et les différences de résistivité apparente entre ces deux familles de courbe sont peu significatives.



En conclusion, la comparaison des SE du plateau de Banankoro, "conducteurs" à moyenne profondeur, selon la roche-mère ne permet pas de distinguer clairement deux types de SE. Cependant on note que les résistivités apparentes moyennes des SE sur schiste sont systématiquement inférieures à celles des SE sur granite pour  $AB/2 > 4m$ .

#### 4. Comparaison des SE du plateau de Banankoro de type "résistant" sur les deux roches-mères

La famille des SE du plateau de Banankoro, de type "résistant" à moyenne profondeur, est représentée par onze SE sur roche-mère granitique et vingt-cinq SE sur roche-mère schisteuse (Figure 72).

Les valeurs des résistivités apparentes moyennes de ces deux types de SE sont très proches pour chaque  $AB/2$ , sauf en  $AB/2=300\text{m}$  où celle des SE sur granites est nettement supérieure à celle des SE sur schistes (Figure 76). La position relative de ces valeurs moyennes entre elles changent à plusieurs reprises. On peut donc dire que ces deux familles de SE ne sont pas différentes, sauf en  $AB/2=300\text{m}$ . La courbe des SE du plateau "résistants" à moyenne profondeur, situés sur la zone granitique, atteint son minimum en  $AB/2=200\text{m}$  à  $167\Omega\text{m}$ , et remonte ensuite en  $AB/2=300\text{m}$  à  $181\Omega\text{m}$ . Par contre, celle des SE sur schistes n'atteint pas de minimum jusqu'à  $AB/2=300\text{m}$  : elle passe de  $153\Omega\text{m}$  pour  $AB/2=200\text{m}$  à  $95\Omega\text{m}$  pour  $AB/2=300\text{m}$ . C'est la seule différence importante qui existe entre ces deux types de SE. Elle montre que l'épaisseur totale du profil d'altération est moins importante sur granite que sur schiste. Mais il manque les valeurs de résistivités apparentes moyennes pour de plus grands  $AB/2$ , pour percevoir la remontée des résistivités apparentes sur roche-mère schisteuse.

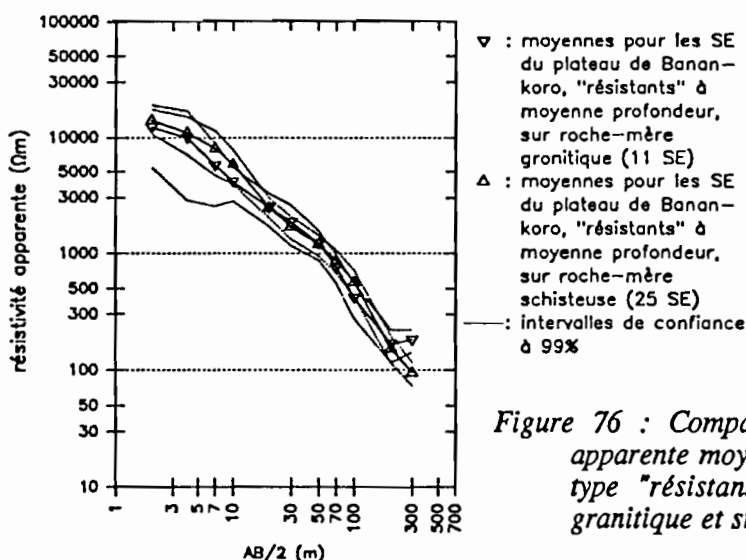


Figure 76 : Comparaison entre les courbes de résistivité apparente moyenne des SE du plateau de Banankoro de type "résistant" à moyenne profondeur, sur la zone granitique et sur la zone schisteuse.

En conclusion, ces deux types de SE ne sont pas significativement différents jusqu'à  $AB/2=200\text{m}$ . Mais les profils d'altération sur granite paraissent moins épais que ceux sur schiste, à cause de l'amorce de la remontée finale à partir de  $AB/2=200\text{m}$  pour les valeurs moyennes des SE sur granite, alors que les valeurs moyennes des SE sur schiste n'atteignent pas de minimum jusqu'à  $AB/2=300\text{m}$ .

#### 5. Comparaison des SE de la vallée du Kokoyon de type "résistant" et "conducteur" à moyenne profondeur

A priori, la vallée du Kokoyon est différente des autres vallées qui entourent le plateau de Banankoro au Sud et à l'Ouest : elle représente un trait majeur à l'échelle du paysage du secteur de Banankoro, avec une longueur de plusieurs dizaines de kilomètres, et elle longe tout le rebord nord du plateau, avant de déboucher sur la plaine alluviale du Niger à l'Est; par contre les autres vallées sont de dimensions plus restreintes, car elles correspondent plutôt aux entailles du réseau hydrographique secondaire. On étudie donc séparément les SE de ces deux types de vallées. Pour commencer, on étudie les trente-trois SE de la vallée du Kokoyon, puis on les comparera ensuite aux vingt-six SE situés dans les autres vallées.

Les SE de la vallée du Kokoyon présentent des courbes de résistivités apparentes qui, tout en ayant la même forme globale en V, présentent des différences importantes par la position des minima qui varie fortement aussi bien en  $AB/2$  qu'en résistivité apparente (Figure 77). Les premiers minima sont atteints dès  $AB/2=50\text{m}$ , et les derniers ne sont atteints que pour  $AB/2=200\text{m}$  ; pour la station L3-350S, il

n'est même pas encore atteint pour  $AB/2=300m$ . Les valeurs de résistivité apparente de ces minima varient de  $19\Omega m$  à  $110\Omega m$ .

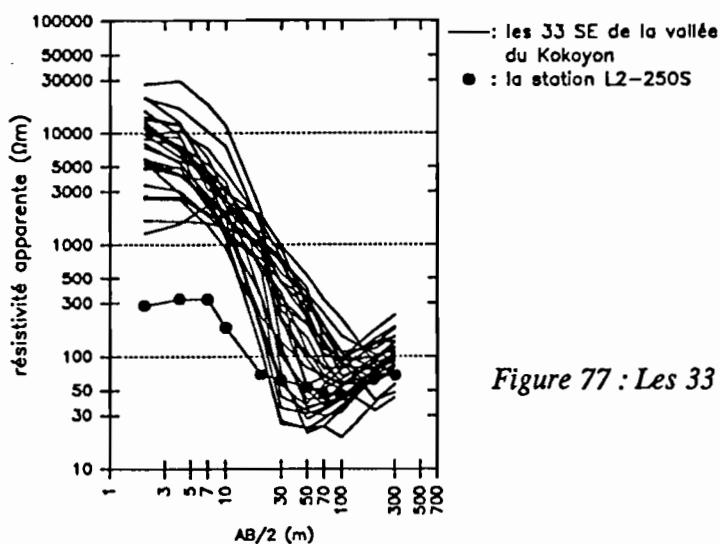


Figure 77 : Les 33 SE de la vallée du Kokoyon.

On note la tendance de l'association des plus faibles valeurs en  $AB/2$  et en résistivité, et des plus fortes valeurs en  $AB/2$  et en résistivité (Figure 77). Les minima de résistivité apparente les plus faibles ont tendance à apparaître plus tôt sur la courbe des SE, dès  $AB/2=50m$ , tandis que les minima plus élevés apparaissent pour des écartements plus importants,  $AB/2=100$  ou  $200m$ . Les trente-trois SE de la vallée se partagent donc assez nettement en deux familles suivant la position du minimum de résistivité apparente (Figure 77). Pour séparer ces deux catégories de sondage, on a choisi la limite de  $100\Omega m$  pour  $AB/2=50m$ . Les seize SE de la vallée de type "conducteur" à moyenne profondeur, dont le minimum est généralement atteint dès  $AB/2=50m$  (Figure 78), sont ainsi distingués des dix-sept SE de type "résistant", dont le minimum est atteint pour  $AB/2=100$  ou  $200m$  (Figure 79).

Le SE de la station L2-250S, qui est le seul à être implanté dans le lit à sec du marigot, est très différent des autres SE de la vallée. Les résistivités apparentes de ce SE sont relativement faibles ( $< 400\Omega m$ ) en haut de profil ( $AB/2 < 10m$ ) (Figure 77), et elles forment un palier très ouvert pour le minimum. Ce SE est également reporté sur les diagrammes des deux familles de SE de la vallée.

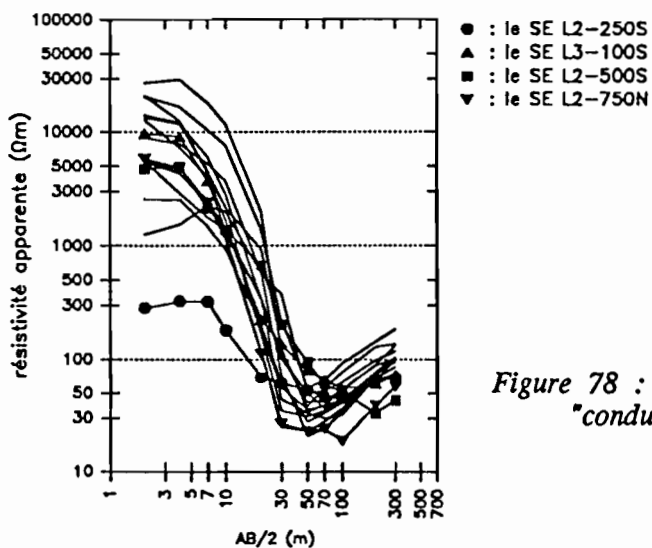


Figure 78 : Les 16 SE de la vallée du Kokoyon de type "conducteur".

Pour la famille des SE de type "conducteur" (Figure 78), certains SE ont des courbes légèrement différentes de celles de l'ensemble. Le SE de la station L3-100S a une fin de courbe pour les grands

AB/2, au niveau du minimum, beaucoup plus ouverte que celles des autres SE : pour AB/2=50m, la résistivité apparente est élevée avec 79Ωm, et le minimum est atteint pour AB/2=100m à 55Ωm. La station L2-500S a aussi une courbe particulière : le minimum n'est atteint que pour AB/2=200m avec 33Ωm. Les caractéristiques de ces deux SE les rapprochent donc de l'autre famille de SE, de type "résistant" à moyenne profondeur. La courbe du SE L2-750N présente un à-coup de prise pour AB/2=100m, ce qui décale toutes les valeurs suivantes vers de plus faibles résistivités apparentes.

Pour la famille des SE de type "résistant" (Figure 79), certains SE ont aussi des courbes légèrement différentes de celles de l'ensemble. Ainsi le SE de la station L3-350S a des résistivités apparentes supérieures à celles des autres SE pour les AB/2 compris entre 30m et 100m, et il ne présente pas de minimum jusqu'à AB/2=300m. Les SE des stations L1-750N et L3-1100S ont des minima pratiquement identiques pour AB/2=200m, nettement inférieurs en résistivité apparente à ceux des autres stations.

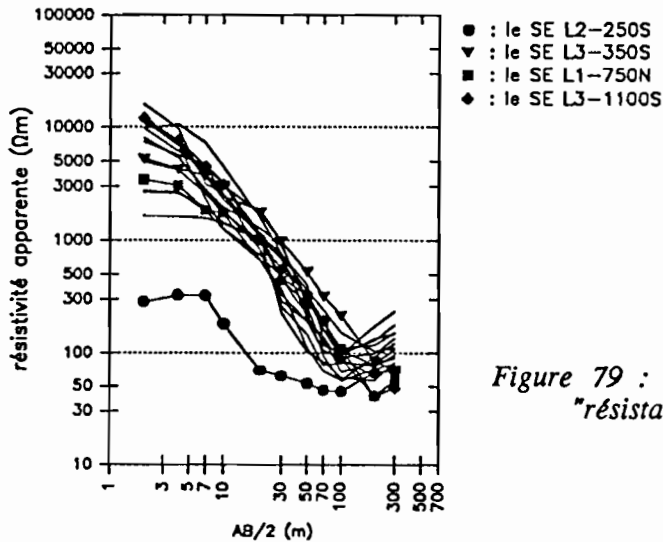


Figure 79 : Les 17 SE de la vallée du Kokoyon de type "résistant", plus celui de la station L2-250S.

Pour comparer ces deux familles de SE, "conductrice" et "résistante" à moyenne profondeur, les moyennes ont été calculées en ne tenant pas compte des SE des stations L2-250S, L3-100S, L2-500S, L3-350S, L1-750N et L3-1100S, qui ont des courbes légèrement différentes par rapport aux autres stations de leurs familles respectives (Figure 80).

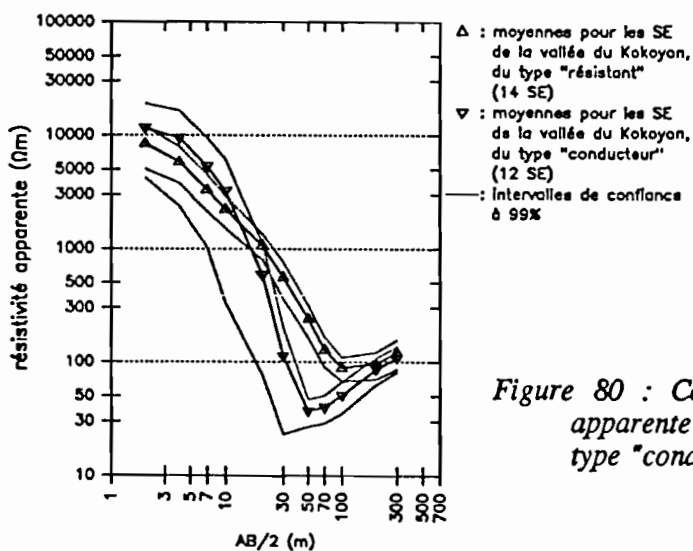


Figure 80 : Comparaison entre les courbes de résistivité apparente moyenne des SE de la vallée du Kokoyon de type "conducteur" et de type "résistant".



De  $AB/2=2m$  à  $AB/2=10m$ , les résistivités apparentes moyennes des SE du type "conducteur" sont supérieures à celles des SE du type "résistant" (Figure 80). Puis de  $AB/2=20m$  à  $AB/2=100m$ , elles sont nettement inférieures. Finalement pour  $AB/2=200m$  et  $AB/2=300m$ , les deux courbes de valeurs moyennes se rejoignent vers une résistivité apparente moyenne de  $100\Omega m$ . On observe donc un croisement des deux types de courbe : les SE "conducteurs" à moyenne profondeur apparaissent plus résistants en moyenne près de la surface ( $AB/2 < 10m$ ) que les SE "résistants" à moyenne profondeur. Mais ces deux familles de SE restent très différentes entre  $AB/2=30m$  et  $AB/2=70m$ .

On retrouve donc pour les SE de la vallée, la même différenciation que celle observée sur plateau entre les SE "résistants" et "conducteurs" à moyenne profondeur. Cette différenciation est liée au développement plus ou moins important des horizons intermédiaires situés entre les niveaux résistants de surface et le niveau conducteur profond de la base du profil d'altération.

Quand on regarde, sur une carte (Figure 81), la localisation des stations de ces deux familles, on remarque que les stations de la vallée du Kokoyon qui ont un SE du type "conducteur" à moyenne profondeur, se situent préférentiellement à proximité de l'axe de drainage majeure de la vallée, c'est-à-dire celui du Kokoyon, c'est le cas des stations L0-500N, L0-250N, L0-0, L1-0, L1-250S, L2-0, L2-250S, L2-500S, L3-150N, L3-100S, L4-400N et L8-4300N, ou à proximité d'axes de drainage secondaires de la vallée comme pour les stations L2-500N et L6-1000N, ou encore à l'exutoire d'un petit cirque d'érosion situé sur le rebord du plateau de la Dinkolé pour la station L2-750N. Il arrive aussi que ces stations soient un peu plus éloignées des axes de drainage, comme pour la station L0-750N, qui est située à l'Ouest d'un affluent du Kokoyon et à une altitude proche de celle du lit de la rivière. Ces stations occupent donc une position plutôt centrale dans la vallée. Par contre les stations de la vallée qui ont un SE de type "résistant" à moyenne profondeur, se situent préférentiellement loin des axes de drainage, à proximité des talus de plateau (Figure 82). Ces stations occupent donc une position plutôt périphérique dans la vallée.

La localisation des stations de la vallée du Kokoyon par rapport aux axes de drainage se reflète donc sur l'allure des courbes de SE à moyenne profondeur par le développement des niveaux résistants intermédiaires entre les résistants proches de la surface et le conducteur profond, quand les stations sont distantes de ces axes. De plus, la partie centrale de la vallée du Kokoyon est souvent bien cuirassée, alors qu'à proximité des talus, le cuirassement est souvent absent, il s'agit alors plutôt d'une simple induration. Cette remarque expliquerait les plus fortes résistivités apparentes moyennes observées en surface ( $AB/2 < 10m$ ) pour les SE conducteurs à moyenne profondeur, qui se situent donc sur des zones plus cuirassées que ceux résistants à moyenne profondeur.

En conclusion, dans la vallée du Kokoyon, on est donc bien en présence de deux familles de SE : les SE du centre de la vallée, proches des axes de drainage, sont significativement plus conducteurs à moyenne profondeur que ceux de la périphérie de la vallée, qui sont distants des axes de drainage. Le premier type de SE correspond à des niveaux résistants à moyenne profondeur peu développés, alors que le second type se caractérise par des niveaux résistants à moyenne profondeur nettement plus épais. De plus, le premier type est en moyenne plus résistant en surface que le second, ce qui est sans doute dû au plus fort cuirassement de la partie centrale de la vallée qu'à proximité des talus.

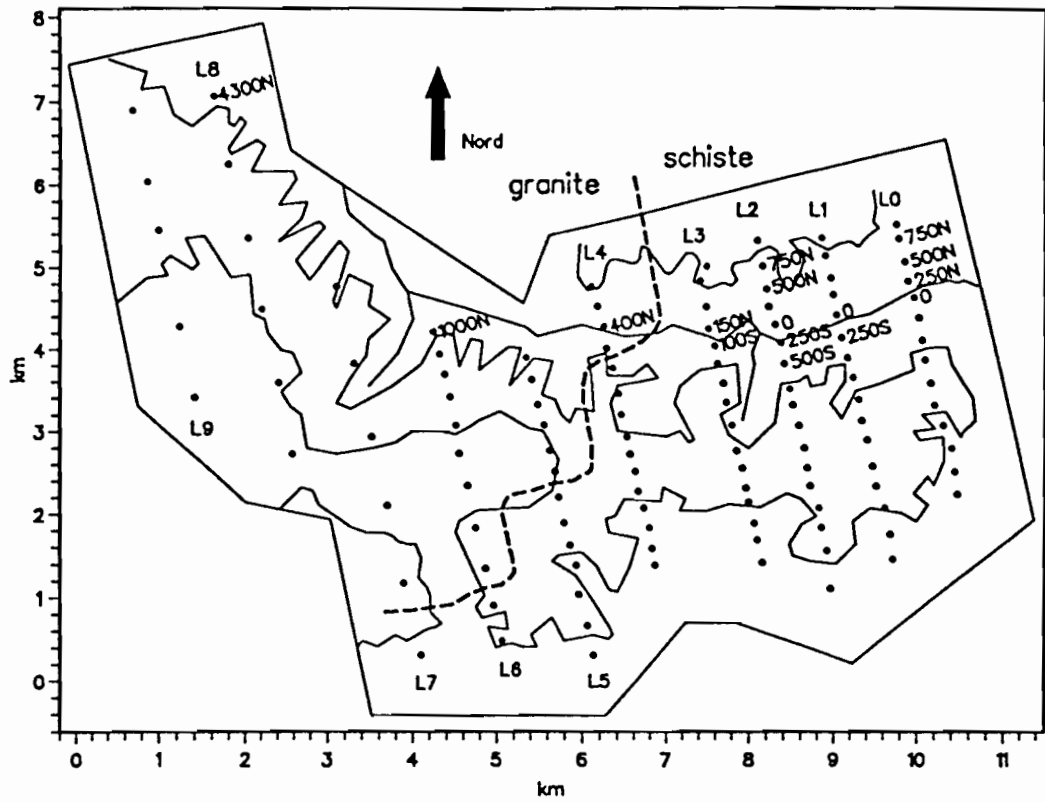


Figure 81 : Localisation des SE de la vallée du Kokoyon de type "conducteur" à moyenne profondeur.

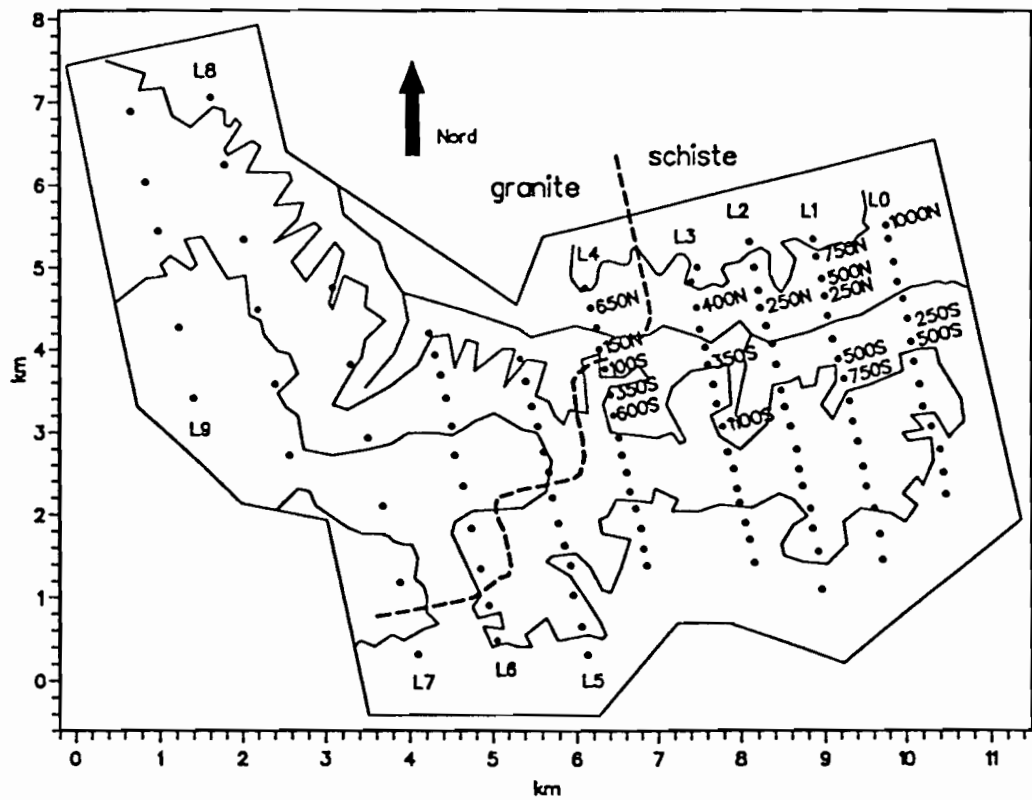


Figure 82 : Localisation des SE de la vallée du Kokoyon de type "résistant" à moyenne profondeur.

## 6. Comparaison entre les SE de la vallée du Kokoyon du type "résistant" et les SE du plateau de Banankoro du type "conducteur"

La courbe des résistivités apparentes moyennes des SE de la vallée du Kokoyon "résistants" à moyenne profondeur, c'est-à-dire qui ont une résistivité apparente supérieure à  $100\Omega\text{m}$  pour  $AB/2=50\text{m}$ , rappelle celle des SE des plateaux du secteur de Banankoro qui sont conducteurs à moyenne profondeur. On compare donc ces deux types de SE.

Les deux courbes de résistivité apparente moyenne sont proches (Figure 83). Les valeurs des résistivités apparentes moyennes des SE des plateaux de Banankoro "conducteurs" à moyenne profondeur sont toujours supérieures à celles des SE de la vallée du Kokoyon "résistants" à moyenne profondeur, sauf en  $AB/2=200\text{m}$  et en  $AB/2=300\text{m}$  où les deux courbes moyennes se croisent. Ce léger décalage entre les deux minima indique certainement des horizons résistants à moyenne profondeur plus épais pour les SE "conducteurs" du plateau. Mais on peut donc dire que ces deux types de SE ne sont pas très différents.

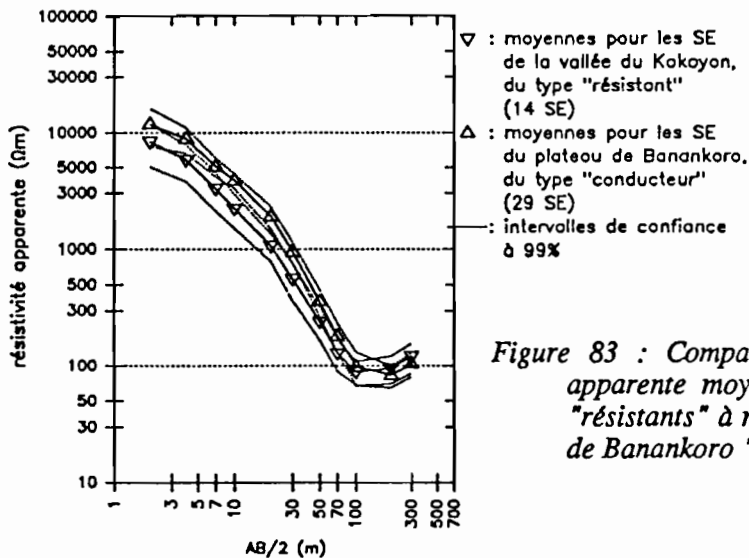


Figure 83 : Comparaison entre les courbes de résistivité apparente moyenne des SE de la vallée du Kokoyon "résistants" à moyenne profondeur et des SE du plateau de Banankoro "conducteurs" à moyenne profondeur.

La ressemblance entre les courbes moyennes de ces deux types de SE est à rapprocher du fait que les SE de la vallée du Kokoyon "résistants" à moyenne profondeur sont plutôt situés à la périphérie de la vallée, à proximité du talus des plateaux, et que les SE du plateau de Banankoro "conducteurs" à moyenne profondeur sont plutôt localisés sur les zones basses du plateau : ces SE doivent donc avoir aussi des altitudes relativement proches.

On observe à faible profondeur ( $AB/2 < 10\text{m}$ ) le même écart entre ces deux courbes moyennes qu'entre celles des SE "conducteurs" et "résistants" de la vallée du Kokoyon (Figure 80). Cette similitude peut aussi être attribuée au cuirassement qui est beaucoup plus important sur le plateau qu'au pied du talus.

## 7. Comparaison des SE de la vallée du Kokoyon sur les deux types de roche-mère

Parmi les trente trois SE de la vallée du Kokoyon, il y en a cinq qui sont sur la zone granitique, le reste étant sur la zone schisteuse. Ce sont les stations L8-4300N, L6-1000N, L4-400N, L4-650N et L4-150N. Pour comparer ces cinq stations avec les autres stations de la vallée, on tient compte du fait qu'il existe deux types de SE dans la vallée du Kokoyon, "conducteur" et "résistant", distingués par une résistivité apparente inférieure ou supérieure à  $100\Omega\text{m}$  pour  $AB/2=50\text{m}$ . Les SE des stations L8-4300N, L6-1000N et L4-400N sont du type "conducteur", les SE des stations L4-650N et L4-150N sont du type "résistant".

Pour les SE "conducteurs", les trois SE de la zone granitique ont tendance à être plus résistants sur l'ensemble de la courbe, et à avoir entre la branche descendante de la courbe et la remontée finale un

angle plus fermé que les SE de la zone schisteuse (Figure 84). Ceci est particulièrement net pour les deux SE, L6-1000N et L8-4300N, situés le plus à l'Ouest et le plus en amont dans la vallée du Kokoyon.

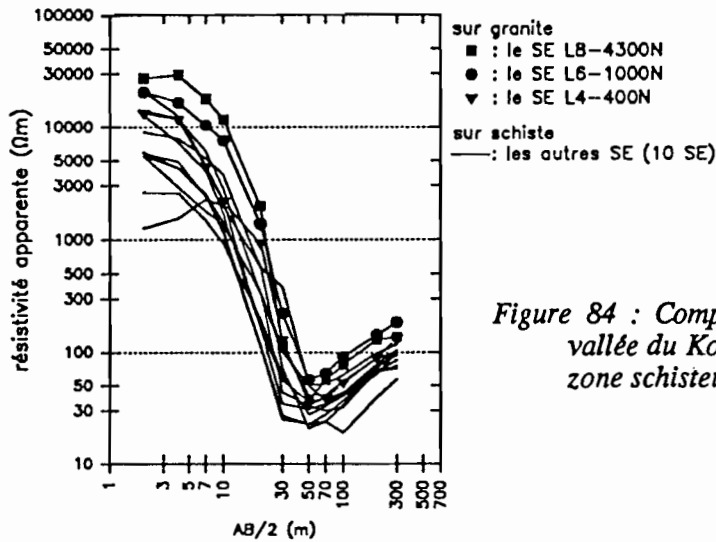


Figure 84 : Comparaison entre les SE "conducteurs" de la vallée du Kokoyon situés sur la zone granitique et sur la zone schisteuse.

Pour les SE "résistants", les deux SE de la zone granitique ne se différencient pas des SE de la zone schisteuse (Figure 85).

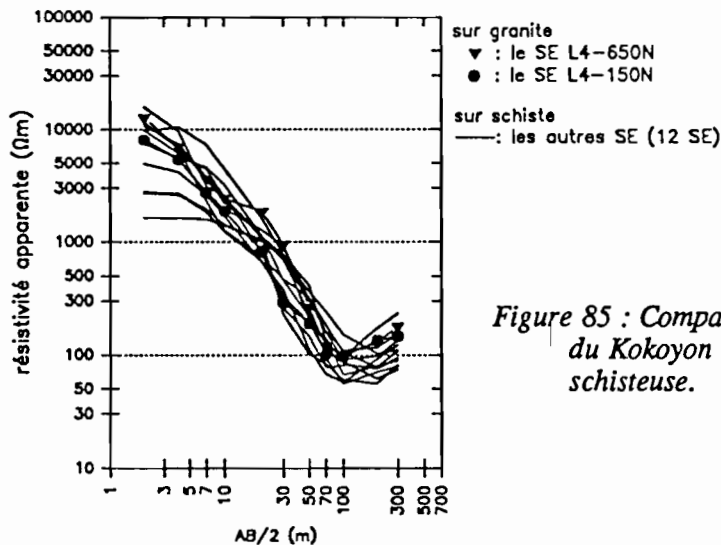


Figure 85 : Comparaison entre les SE "résistants" de la vallée du Kokoyon situés sur la zone granitique et sur la zone schisteuse.

Les SE situés sur la partie granitique de la vallée du Kokoyon sont très peu nombreux, si bien que d'après la simple allure de leurs courbes "brutes", on ne peut pas dire qu'ils soient vraiment différents de ceux de la partie schisteuse.

## 8. Comparaison entre les SE de la vallée du Kokoyon et ceux des autres vallées

On regroupe ensemble les SE des vallées autres que celle du Kokoyon, et qui appartiennent à la bordure de la vallée du Niger à l'Est, à la vallée au Sud du plateau de Banankoro, aux vallées de Guilingoué et de Diourouka à l'Ouest (Figure 46).

Comme pour la vallée du Kokoyon, on distingue les SE de type "conducteur" et les SE de type "résistant" à moyenne profondeur suivant que la résistivité apparente est inférieure ou supérieure à  $100\Omega\text{m}$  pour  $AB/2=50\text{m}$ .

Si on compare les courbes de résistivité apparente moyenne des SE du type "conducteur" situés dans la vallée du Kokoyon et ceux des autres vallées, il n'y a pas de différence significative entre ces deux familles, sauf pour les faibles écartements entre  $AB/2=2\text{m}$  et  $AB/2=7\text{m}$  : contrairement à ceux de la vallée du Kokoyon, les SE des autres vallées sont relativement peu résistants à faible profondeur ( $AB/2 < 10\text{m}$ ) (Figure 86). Les SE de type "conducteur" présentent donc le même profil quelle que soit la vallée en profondeur, mais pas en surface. C'est sans doute dû au fait que la vallée du Kokoyon présente un cuirassement plus développé que celui des autres vallées.

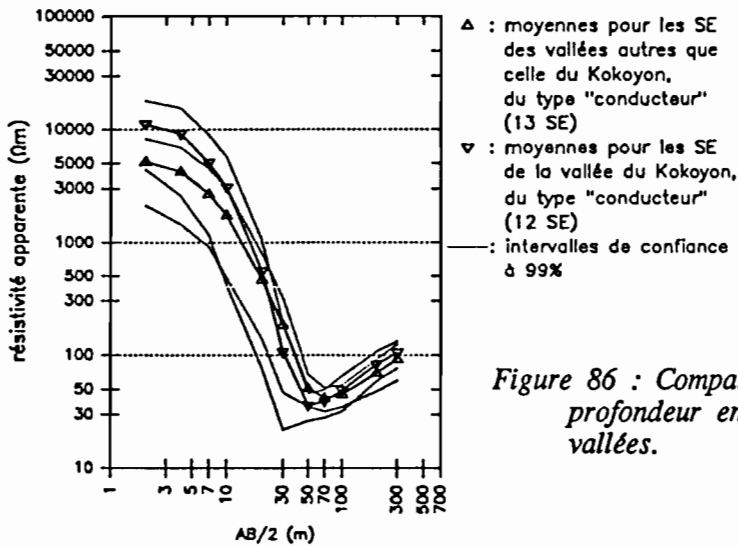


Figure 86 : Comparaison des SE "conducteurs" à moyenne profondeur entre la vallée du Kokoyon et les autres vallées.

Si on compare les courbes de résistivité apparente moyenne des SE du type "résistant" de la vallée du Kokoyon et des autres vallées, les deux courbes sont très proches pour chaque  $AB/2$  et ils se recoupent à plusieurs reprises (Figure 87). Il n'apparaît donc pas de différence significative d'une vallée à l'autre pour ce type de SE résistant à moyenne profondeur.

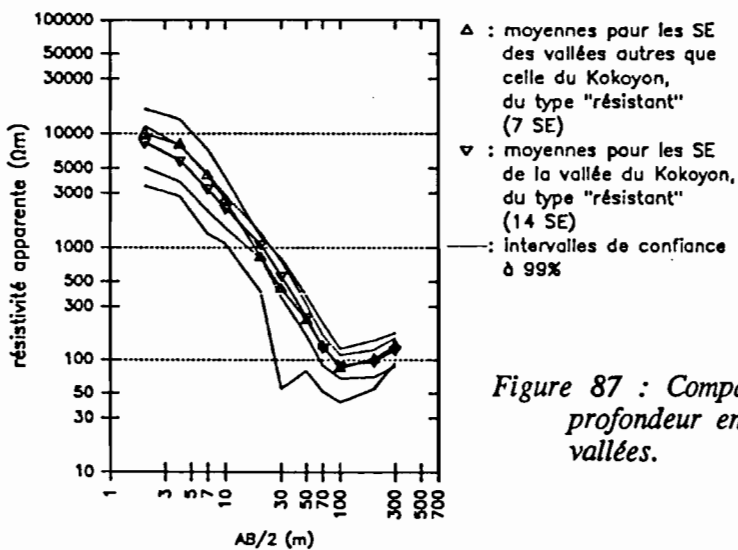


Figure 87 : Comparaison des SE "résistants" à moyenne profondeur entre la vallée du Kokoyon et les autres vallées.

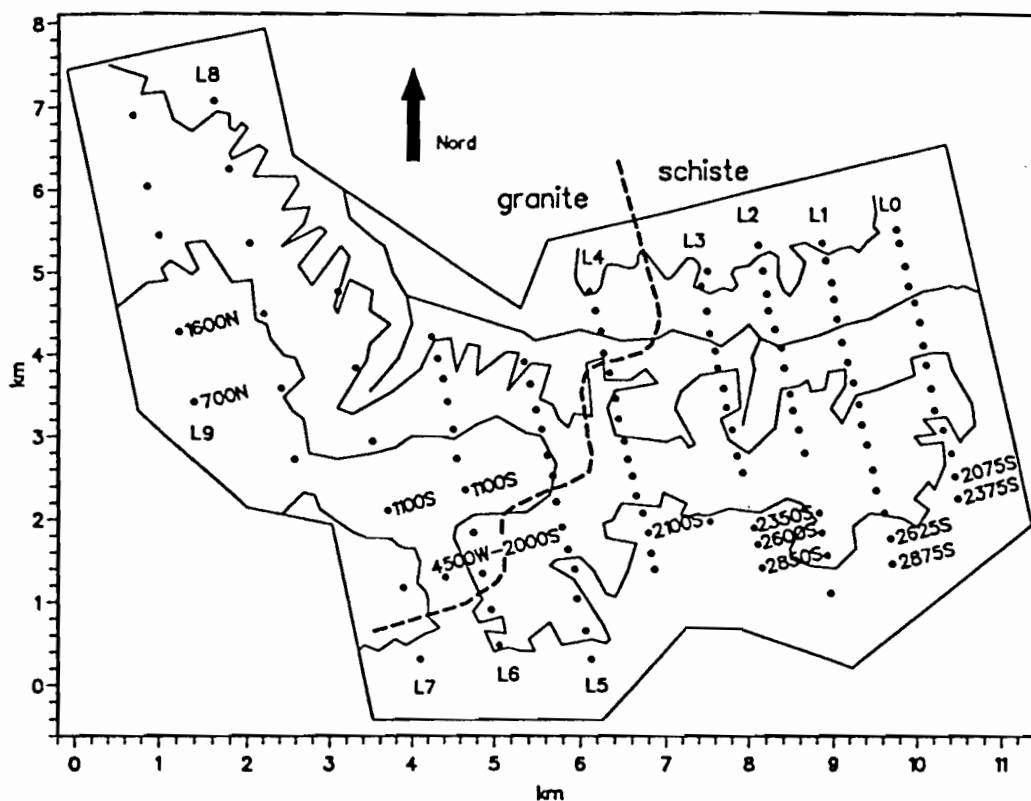


Figure 88 : Localisation des SE du type "conducteur" dans les vallées autres que celle du Kokoyon.

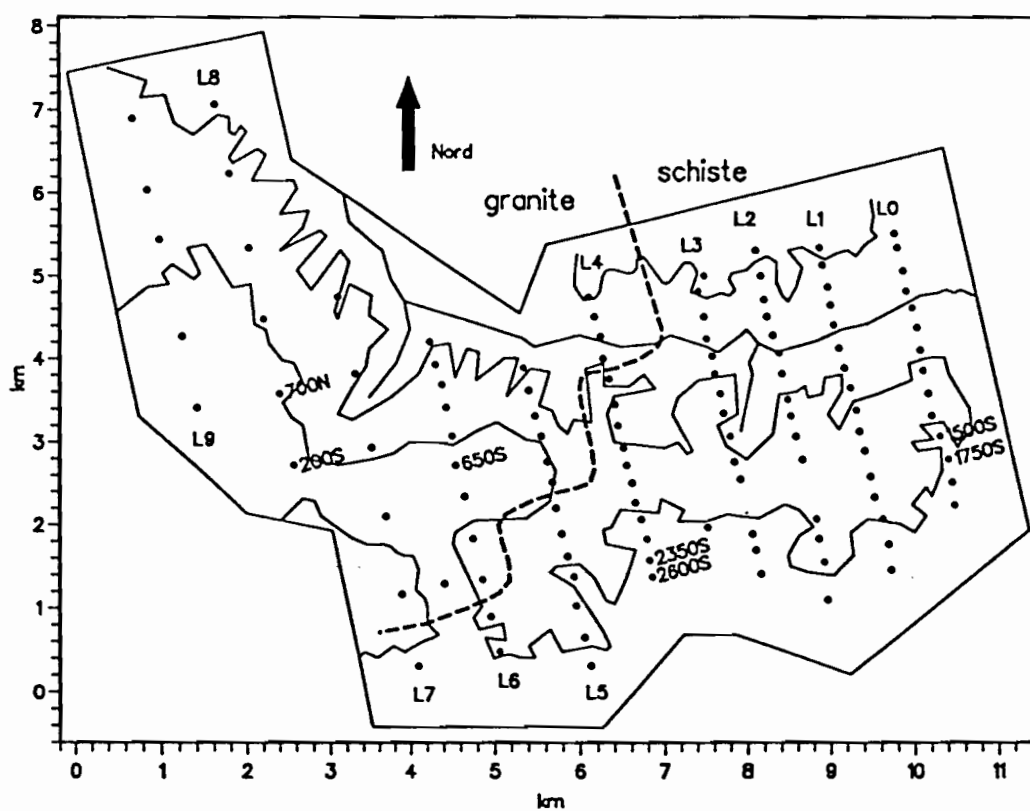


Figure 89 : Localisation des SE du type "résistant" dans les vallées autres que celle du Kokoyon.

Les distributions de ces deux types de SE, "conducteur" et "résistant" pour les vallées sud et ouest ont été représentées sur deux cartes séparées (Figures 88 et 89). Les axes de drainage pour ces vallées correspondent à un réseau hydrographique secondaire par rapport à celui du Kokoyon, et les stations sont plutôt situées sur les parties amonts de ces vallées. Leur relation avec les axes de drainage est donc moins évidente que pour la vallée du Kokoyon. Néanmoins, il apparaît que les stations qui ont des SE "conducteurs", c'est-à-dire inférieurs à  $100\Omega\text{m}$  pour  $AB/2=50\text{m}$ , sont souvent situées au milieu des vallées, ou à une certaine distance des talus des plateaux (Figure 88). Par contre celles qui ont des SE "résistants", c'est-à-dire supérieurs à  $100\Omega\text{m}$  pour  $AB/2=50\text{m}$ , se trouvent plus souvent juste à proximité des talus (Figure 89).

On retrouve donc la relation de la vallée du Kokoyon pour la localisation de ces deux types de SE : les SE "conducteurs" sont sur des zones topographiques basses et donc proches des axes de drainage, par contre les SE "résistants" sont sur des zones topographiques hautes, et plutôt distantes des axes de drainage. Il y a donc aussi, pour ces vallées, deux types de SE, qui se distinguent à moyenne profondeur par l'épaississement d'horizons situés entre les résistants de surface et le conducteur profond et ayant des résistivités intermédiaires, en fonction de la topographie de ces vallées. Par contre, les SE "conducteurs" ont en moyenne les mêmes résistivités apparentes à faible profondeur ( $AB/2 < 10\text{m}$ ) que les SE "résistants" : les formations superficielles du profil d'altération sont donc relativement homogènes dans ces vallées, il n'y a donc certainement pas de cuirassement analogue à celui de la vallée du Kokoyon en sommet de profil.

On retrouve les mêmes relations entre les SE des vallées autres que celle du kokoyon et ceux du plateau de Banankoro conducteurs à moyenne profondeur, que celles des SE de la vallée du Kokoyon avec ces mêmes SE du plateau : les courbes moyennes sont proches, et celle des SE des vallées est un peu moins résistante que celle des SE du plateau. De plus, en distinguant les roches-mères, les SE de ces vallées ne présentent pas de différence : les courbes se superposent les unes aux autres.

## 10. Conclusions sur les SE des vallées

Il existe dans les vallées du secteur de Banankoro deux principaux types de SE dits "conducteurs" et "résistants" qui diffèrent à moyenne profondeur et qui mettent donc en évidence deux types de profil latéritique. C'est l'épaisseur des niveaux situés entre les résistants de surface et le conducteur profond, qui distingue ces deux types de profil d'altération : ces niveaux résistants intermédiaires sont nettement plus développés dans le cas des SE "résistants" que pour les SE "conducteurs". De plus, les stations qui présentent des SE du type "conducteur" se localisent préférentiellement au centre des vallées, à proximité des axes de drainage ; alors que celle qui ont un SE du type "résistant" se situent plutôt sur les bordures des vallées, à une certaine distance des axes de drainage. Cette répartition géographique des deux types de SE met en relation l'épaisseur des résistants intermédiaires avec celle de la zone non saturée du profil d'altération qui augmente aussi depuis le centre des vallées vers la périphérie et en s'éloignant des axes de drainage.

On distingue en plus pour les SE "conducteurs", deux sous-familles : celle de la vallée du Kokoyon et celle des autres vallées. Cette différenciation se fait d'après le début des courbes de SE qui est nettement plus résistant pour les SE de la vallée du Kokoyon que celui des SE des autres vallées. Ces résistivités plus élevées correspondent certainement au cuirassement de la vallée du Kokoyon qui est nettement plus important au centre de cette vallée que dans les autres vallées.

## 11. Conclusions sur les principales familles de SE mises en évidence sur le secteur de Banankoro

En conclusion, on distingue quatre grandes familles de SE sur le secteur de Banankoro. Elles ont été définies en séparant deux catégories de SE "résistant" et "conducteur" à moyenne profondeur pour les plateaux et pour les vallées. Sur les plateaux, la famille des SE "résistants" correspond aux sommets topographiques ou plus simplement aux zones élevées, et celle des SE "conducteurs" aux zones topographiques basses. Dans les vallées, la famille des SE "conducteurs" correspond aux stations situées au centre, à proximité des axes de drainage, et celle des SE "résistants" aux stations qui sont à la périphérie et éloignées des axes de drainage. Si on représente ces quatre familles par des courbes moyennes et des intervalles de confiance à 99% pour caractériser la dispersion des valeurs (Figure 90), on observe que :

- Sur l'ensemble du profil d'altération, entre  $AB/2=2m$  et  $AB/2=300m$ , ces quatre familles de SE ont la forme d'un V, plus ou moins complet au niveau de la partie finale remontante de la courbe, selon la position du minimum par rapport aux  $AB/2$ , et elles ont des résistivités apparentes moyennes qui varient entre  $14000\Omega m$  et  $40\Omega m$  selon les écartements.

- En sommet de profil, de  $AB/2=2m$  à  $AB/2=10m$ , ces quatre familles de SE ont des résistivités apparentes moyennes proches ; à moyenne profondeur, de  $AB/2=20m$  à  $AB/2=100m$ , la famille des SE "résistants" de plateau et celle des SE "conducteurs" de vallée se différencient nettement des deux autres familles, qui occupent une position intermédiaire et qui restent proches ; finalement à la base du profil, pour  $AB/2=200m$  et  $AB/2=300m$ , les quatre courbes moyennes se rejoignent.

- Les minima atteints par les courbes moyennes de ces quatre familles augmentent en résistivité depuis les SE situés au centre des vallées proches des axes de drainage jusqu'à ceux proches des sommets topographiques des plateaux en passant ainsi de  $40\Omega m$  à plus de  $100\Omega m$  environ ; ils se décalent dans le même sens en fonction des écartements de  $AB/2=50m$  à plus de  $300m$  ; les profils d'altération sont donc nettement plus épais sous les sommets topographiques des plateaux qu'au centre des vallées ; ils ont des épaisseurs intermédiaires pour les zones de plateau relativement peu élevées et celles de la périphérie des vallées ; d'après l'allure de ces courbes moyennes, cette augmentation de l'épaisseur du profil est due au développement de niveaux résistants intermédiaires situés entre les résistants de surface et le conducteur profond depuis le centre des vallées vers les sommets topographiques des plateaux. En effet si on calcule, par un modèle tabulaire simple à quatre niveaux, les courbes théoriques correspondant à ce cas de figure, on obtient la même évolution des profils des courbes en augmentant l'épaisseur du résistant intermédiaire (Figure 91). Si les SE du centre des vallées sont en moyenne très différents des SE des sommets des plateaux, par contre ceux de la périphérie des vallées sont en moyenne assez proches de ceux des zones basses des plateaux, ce qui tend à montrer une certaine continuité des profils d'altération entre les vallées et les plateaux, quand la dénivelée du talus est faible.

Chacune de ces quatre grandes familles de SE peut être subdivisée en deux sous familles en fonction de la nature de la roche-mère. Mais au niveau des vallées, on ne peut pas mettre en évidence de différences nettes de SE selon le type de roche-mère : les différentes courbes de SE restent proches, et il y a trop peu de SE sur la zone granitique. Par contre, les SE résistants du plateau de Banankoro, c'est-à-dire ceux qui sont sur des zones élevées, montrent une différence en fonction de la roche-mère : les SE résistants de la zone granitique semblent caractéristiques d'un profil d'altération moins épais que celui de la zone schisteuse.



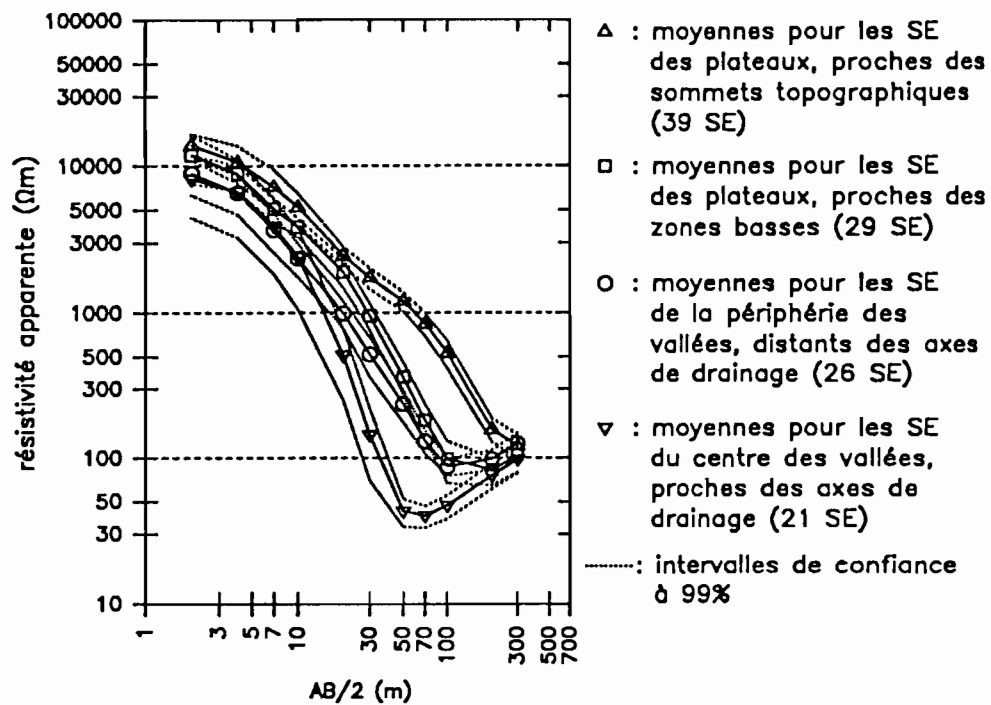


Figure 90 : Les quatre grandes familles de SE mises en évidence sur le secteur de Banankoro.

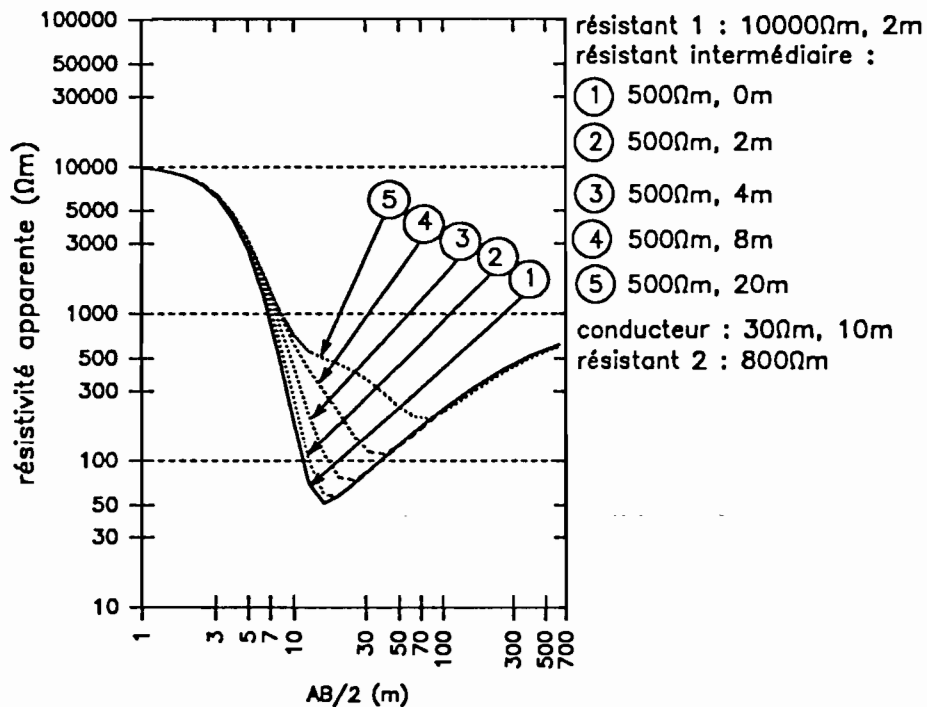


Figure 91 : Exemple d'un modèle tabulaire à quatre niveaux géoélectriques, du type résistant-conducteur-résistant, avec un niveau résistant intermédiaire dont l'épaisseur varie.

### III. COMPARAISONS AVEC D'AUTRES SE OBTENUS DANS PLUSIEURS REGIONS D'AFRIQUE

Pour comparer les SE du secteur de Banankoro avec ceux d'autres régions en Afrique, on a reporté sur un même diagramme les courbes des moyennes et des écarts-types des quatre principales familles de SE de Banankoro, et celles provenant de différentes publications. Ces exemples sont choisis d'après la forme de leur courbe de résistivité apparente en fonction de  $AB/2$ , on ne compare que celles qui sont du type en V comme celle des SE de Banankoro. Ils proviennent du Mali même, du Sénégal, du Burkina Faso, de la Côte-d'Ivoire et du Burundi. Les exemples donnés par les auteurs sont presque toujours isolés : une courbe pour un secteur, sur une même roche, à une date donnée. Or d'après les SE de Banankoro, ces courbes, pour un même secteur, peuvent être très différentes. Il s'agit, dans cette partie, de montrer la diversité des SE obtenus pour les profils d'altération latéritique, et ainsi de caractériser les SE de Banankoro par rapport aux sondages réalisés dans d'autres régions.

#### A. Les SE du secteur de Kobada au Mali

Lors de la première mission sur le terrain en 1988, nous avons effectué deux SE près du village de Kobada. Ce village est situé sur l'autre rive du Niger, en face de celui de Banankoro par rapport au fleuve. La morphologie du paysage et la nature du substratum sont les mêmes que celles de Banankoro. Le premier SE, appelé 1600S-140, a été réalisé sur un plateau couvert par une cuirasse ferrugineuse. Le second SE, appelé 1800S-0, a été réalisé à proximité du premier mais sur une zone du plateau où la cuirasse a été complètement érodée.

Les courbes de ces deux SE montrent des résistivités apparentes semblables à celles des SE du secteur de Banankoro (Figures 92 et 93). Elles ne présentent pas de remontée finale jusqu'à  $AB/2=500m$ . De  $AB/2=50m$  à  $AB/2=300m$ , les résistivités apparentes sont comprises dans l'intervalle des valeurs des SE proches des sommets des plateaux de Banankoro. Par contre de  $AB/2=2m$  à  $AB/2=30m$ , les courbes sont très différentes : pour le SE 1600S-140, situé sur une surface entièrement cuirassée, les résistivités apparentes sont très fortes, elles sont supérieures aux valeurs moyennes des SE proches des sommets des plateaux de Banankoro (Figure 92) ; pour le SE 1800S-0, situé sur une zone où la surface cuirassée a été érodée, les résistivités apparentes sont moins fortes, elles sont inférieures aux mêmes moyennes moins les écarts-types (Figure 93).

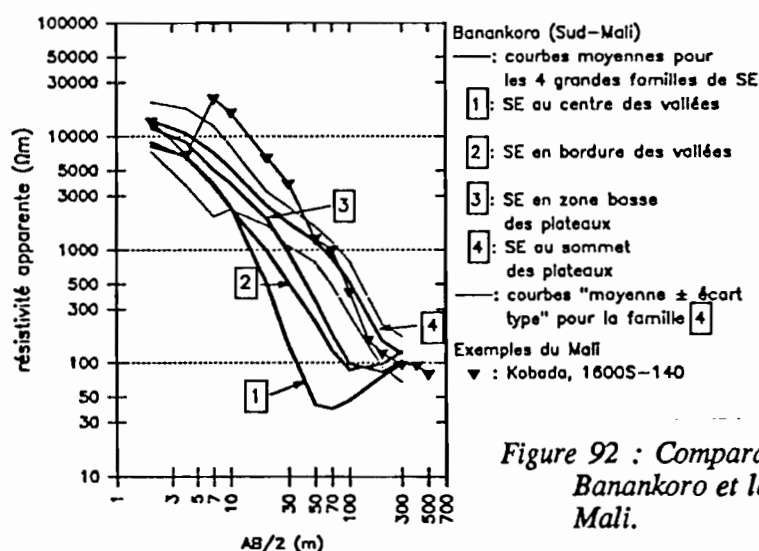


Figure 92 : Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et le SE 1600S-140 du secteur de Kobada au Mali.

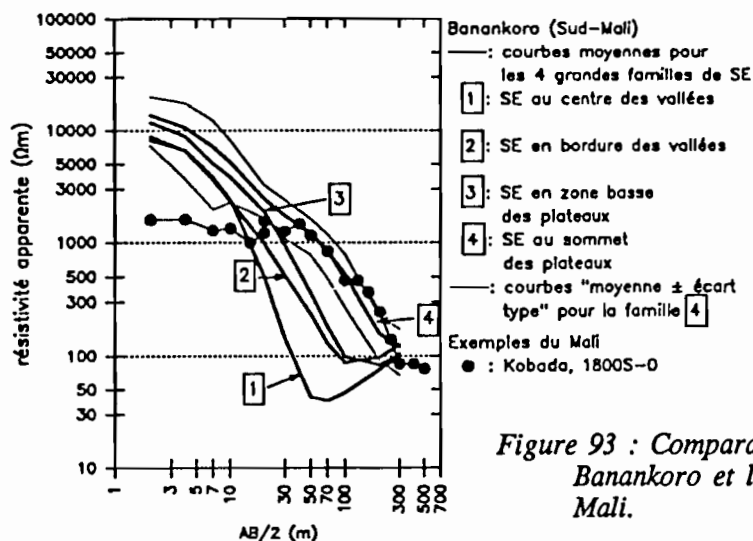


Figure 93 : Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et le SE 1800S-0 du secteur de Kobada au Mali.

Donc d'après ces deux SE, on peut dire que le profil d'altération latéritique existant sur les plateaux dans le secteur de Kobada semble tout à fait comparable à celui des zones élevées des plateaux de Banankoro : les différents horizons qui les composent doivent avoir des résistivités et des épaisseurs semblables. De plus, par l'absence, sur les courbes de SE, de remontée finale avant  $AB/2=500m$ , ces deux SE se rapprochent des SE les plus épais du layon L2, localisés sur le plateau même de Banankoro.

#### B. Les SE du secteur de Famansa au Mali

Lors de la seconde mission en 1989, nous avons encore effectué deux SE sur un autre secteur que celui de Banankoro, mais cette fois-ci dans la région des Monts Mandingues sur le plateau de Famansa, qui se situe à une quarantaine de kilomètres au Nord de Banankoro.

Cette région a une altitude moyenne nettement supérieure à celle de Banankoro, environ 700m pour la première contre 400m pour la seconde, le plateau de Famansa culminant à 798m. Ce plateau de nature bauxitique s'est développé sur une roche-mère doléritique (BOURDEAU, 1991). Le premier SE est situé non loin du centre du plateau, sur sa partie sommitale cuirassée, près d'un kerkour (point géodésique de l'I.G.N., servant de base à la triangulation de l'Afrique). Le second SE est situé au centre du plateau, dans une zone humide et boisée, en légère dépression avec un fort recouvrement argilo-quartzeux, où un puits pour l'alimentation en eau a été creusé.

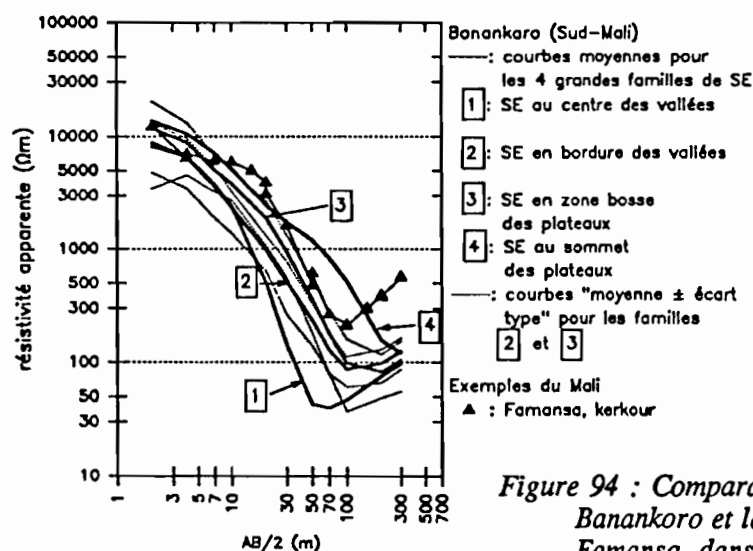


Figure 94 : Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et le SE du kerkour du plateau bauxitique de Famansa, dans les Monts Mandingues (Mali).

Le SE du Kerkour est le plus proche de ceux des familles 2 et 3 de Banankoro, avec cependant un minimum atteint pour  $AB/2=100\text{m}$  à  $2150\Omega\text{m}$  nettement supérieur à ceux de ces familles (Figure 94). On est donc en présence pour cette station, d'un conducteur profond plus résistant ou moins épais que celui de Banankoro.

Le SE du puits est très différent des SE de Banankoro (Figure 95) : la courbe atteint son minimum pour  $AB/2=70\text{m}$  à  $610\Omega\text{m}$ . Donc pour cette station, le conducteur profond doit aussi être plus résistant ou moins épais que celui de Banankoro.

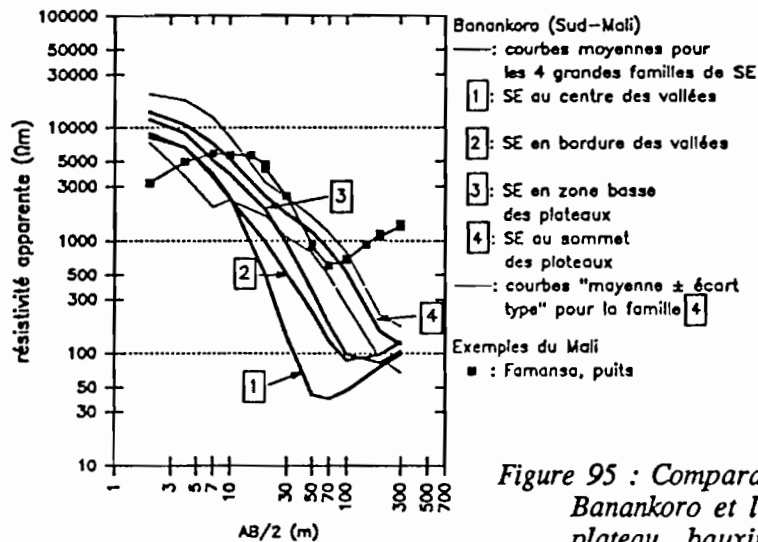


Figure 95 : Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et le SE du puits d'alimentation en eau du plateau bauxitique de Famansa dans les Monts Mandingues (Mali).

Il semblerait donc, avec les positions des deux minima, que l'on mette en évidence un conducteur profond nettement plus résistant ou moins épais à Famansa qu'à Banankoro. Cette différence peut être due à la roche-mère de Famansa, qui correspond à des dolérites. On peut encore dire que le profil d'altération développé sur le plateau de Famansa a une épaisseur du même ordre de grandeur que celle des profils de vallée ou des points bas des plateaux de Banankoro.

### C. Les SE du massif granitique de Saraya au Sénégal

Les SE de Banankoro sont comparés avec ceux provenant d'une même région au Sénégal : le massif de granites birrimiens de Saraya (DORBATH *et al.*, 1975). Les SE réalisés sont de trois types suivant la nature du substratum (Figure 96) :

- sur dolérites, les courbes présentent la forme particulière d'un V bien marqué, les résistivités apparentes minimales atteintes sont toujours inférieures à  $50\Omega\text{m}$ , et les remontées finales des courbes sont très régulières et souvent supérieures à  $45^\circ$  ;
- sur granites, les courbes sont en forme de V très ouvert et assez plat, les résistivités apparentes minimales sont de l'ordre de  $150$  à  $200\Omega\text{m}$ , et les remontées finales des courbes sont assez faibles, elles s'amorcent à peine jusqu'à  $AB/2=70\text{m}$  environ ;
- sur granites altérés, les courbes ressemblent à celles sur dolérites, la forme du V est bien marquée, mais les résistivités apparentes minimales atteintes restent supérieures à  $100\Omega\text{m}$ .

Par rapport aux courbes moyennes des quatre grandes familles de SE du secteur Banankoro, les trois courbes données en exemple pour le massif de Saraya sont différentes. Il n'y a aucune courbe, sur le secteur de Banankoro, que l'on puisse apparenter à celle sur granite, avec sa forme très plate et ses résistivités apparentes de l'ordre de la centaine d'ohm-mètres. Les courbes des deux autres exemples de SE, sur dolérites et sur granites altérés, rappellent celles de Banankoro, par leurs formes en V bien marqué et avec leurs résistivités apparentes allant du millier à la dizaine d'ohm-mètres. Néanmoins leurs minima sont atteints pour des  $AB/2$  bien inférieurs à ceux des courbes moyennes de Banankoro, c'est-à-dire aux environs de  $AB/2=15\text{m}$ , alors que celui de la courbe moyenne des SE des vallées, proches des axes de drainage, est en  $AB/2=70\text{m}$ .

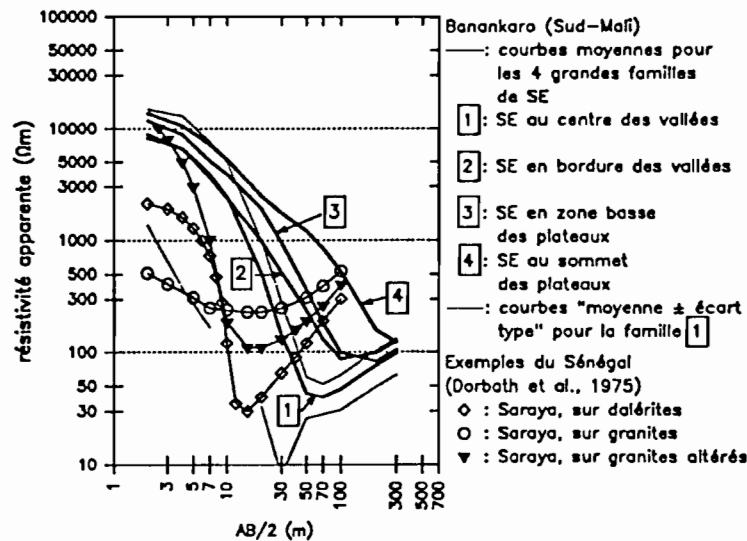


Figure 96 : Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et trois exemples de SE réalisés dans le massif de Saraya (Sénégal), sur dolérites, granites et granites altérés, d'après DORBATH et al. (1975).

Ces exemples sont donc caractéristiques de profils d'altération moins épais par rapport à ceux de Banankoro. Ce sont principalement les épaisseurs des niveaux situés entre le résistant de surface et le conducteur profond qui sont nettement inférieures à ceux des profils de Banankoro, car, pour cette partie de la courbe, la pente des SE est nettement supérieure à celle des SE de Banankoro.

#### D. Les SE du Burkina Faso

Quatre exemples de SE proviennent du Burkina Faso, il s'agit des régions de Tan Kié Dougou (ALBOUY *et al.*, 1970), Ouaga (BERNARDI et MOUTON, 1981), Rapadama et Mankarga (PALACKY *et al.*, 1981). Les roche-mères sont des granites pour les trois premiers SE, et des séries volcano-sédimentaires pour le quatrième.

Les quatre courbes ont des formes semblables : le V est bien marqué tout en étant assez ouvert (Figure 97). Les minima des courbes sont atteints avant ceux des courbes moyennes de Banankoro, celui de Ouaga, avec 600Ωm en AB/2=30m, est le plus proche en résistivité et en AB/2 de celui des SE des vallées de Banankoro, proches des axes de drainage.

Les SE donnés en exemple sont donc moins épais que ceux du secteur de Banankoro. Le SE de Rapadama sur granites et celui de Mankarga sur séries volcano-sédimentaires sont nettement moins résistants et moins épais, au niveau du profil d'altération, que ceux de Banankoro. Par contre, les SE de Tan Kié Dougou et de Ouaga sur granites, tout en étant moins épais, ont des résistivités comparables à celles de Banankoro au niveau du profil d'altération. Ces résistivités apparentes restent proches des valeurs des moyennes moins les écarts-types, depuis les plus petits AB/2 et jusqu'au minimum de la courbe. Ce sont les niveaux résistants intermédiaires, qui sont moins épais dans les deux cas, qui font que le minimum est atteint avant celui des courbes moyennes de Banankoro.

#### E. Les SE du Burundi

L'exemple de SE du Burundi provient de la région du massif de Musongati (PERIC, 1981). Il est situé sur un profil d'altération développé sur des péridotites.

La forme de la courbe est du type en V, bien marqué (Figure 98). Ses résistivités apparentes sont toujours comprises entre les valeurs des moyennes plus ou moins les écarts-types de la famille 1 des SE correspondant au centre des vallées de Banankoro.

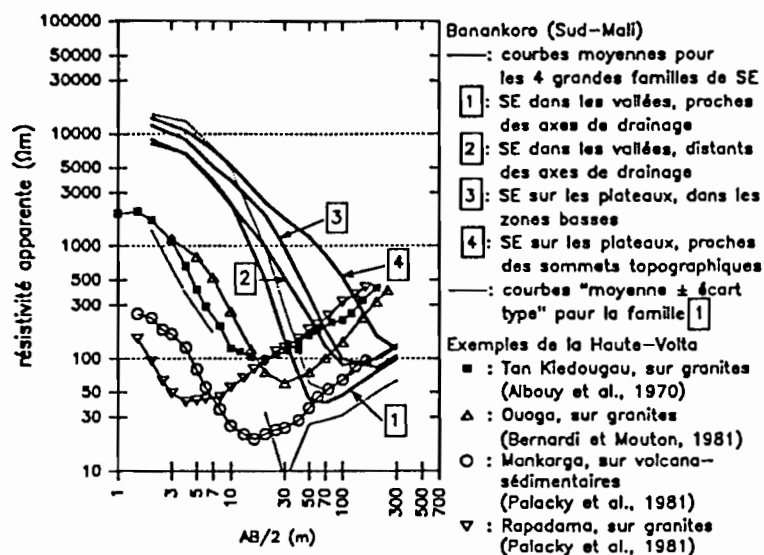


Figure 97 : Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et quatre exemples de SE réalisés au Burkina Faso sur des granites et des séries volcano-sédimentaires d'après ALBOUY et al. (1970), BERNARDI et MOUTON (1981) et PALACKY et al. (1981).

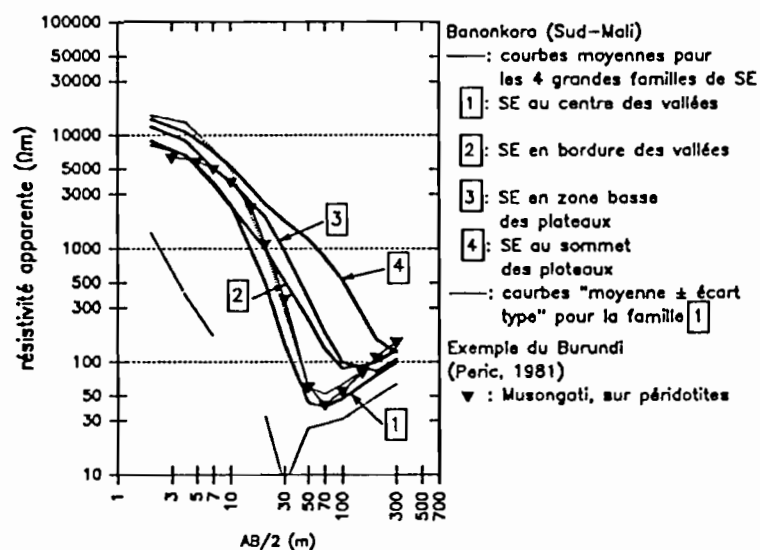


Figure 98 : Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et un exemple de SE réalisé au Burundi sur des péridotites, d'après PERIC (1981).

Jusqu'à  $AB/2=20m$ , la courbe est proche des moyennes des SE de Banankoro. Ensuite les résistivités apparentes diminuent fortement jusqu'à atteindre une valeur minimale en  $AB/2=70m$  de  $42\Omega m$ . Puis les valeurs remontent régulièrement le long d'une droite à  $45^\circ$  jusqu'en  $AB/2=300m$ .

A priori ce SE est proche de ceux réalisés sur le secteur de Banankoro. Il semble caractéristique d'un profil d'altération aussi résistant et aussi épais que ceux des vallées de Banankoro, situés à proximité des axes de drainage.

## F. Les SE de la Côte-d'Ivoire

Les trois exemples de SE provenant du site d'Akouékouadiokro, en Côte-d'Ivoire, présentent des courbes en V, semblables à celles des SE de Banankoro (BOULANGE et CARN, 1971). Ils sont tous les trois situés sur un profil d'altération développé sur des amphibolites. Le SE n°9 est situé sur un plateau

cuirassé témoin de la surface intermédiaire, un puits creusé à proximité a servi à son étalonnage. Les SE n°11 et n°10 sont en contre-bas, respectivement sur un haut-glacis et sur un moyen-glacis.

Les trois courbes ont la forme d'un V bien marqué, et elles ont, pour le profil d'altération, des résistivités apparentes comparables à celles des SE de Banankoro, car elles sont, depuis le haut du profil et jusqu'à l'amorce de la remontée finale, comprises dans l'intervalle de variation des différentes familles de SE de Banankoro (Figures 99, 100 et 101).

Le SE n°10, situé sur moyen-glacis, présente des résistivités apparentes comparables à celles de la famille 1 des SE proches des axes de drainage, mais l'épaisseur du profil d'altération est nettement moins épais que ceux de Banankoro : le minimum de 65Ωm pour ce SE est atteint pour  $AB/2=15m$ , bien avant ceux des SE de Banankoro (Figure 99).

Le SE n°11, situé sur le haut-glacis, présente une courbe de résistivité apparente intermédiaire entre les courbes moyennes des familles 1 et 2 des SE conducteurs et résistants des vallées de Banankoro (Figure 100). L'épaisseur du profil d'altération est comparable à celle de la famille 1, mais les résistivités apparentes sont proches de la famille 2. Le minimum, atteint dès  $AB/2=60m$  à 145Ωm, est supérieur à ceux de ces deux familles, le conducteur profond semble donc avoir une résistivité nettement supérieure à celui de Banankoro, ce qui pourrait correspondre à une différence de roche-mère.

Le SE n°9 du plateau occupe aussi une position intermédiaire entre les courbes moyennes des familles 1 et 2 (Figure 101). L'épaisseur du profil d'altération est relativement proche de celle de la famille 1, mais les résistivités apparentes sont aussi élevées que celles de la famille 2, ce qui marquerait encore des différences de résistivité importante entre les conducteurs profonds.

Donc ces trois SE présentent des résistivités apparentes proches de celles de SE de Banankoro. Par la position respective de leurs minima, ils montrent que :

- Le profil d'altération du moyen-glacis est nettement moins épais que les profils d'altération les moins épais du secteur de Banankoro, qui sont situés dans les vallées à proximité des axes de drainage.
- Les profils d'altération du haut-glacis et de la surface intermédiaire sont proches de ceux des vallées de Banankoro ; plus précisément ils sont aussi peu épais que les SE proches des axes de drainage des vallées et aussi résistants que ceux qui sont distants de ces axes.
- Le conducteur profond est certainement plus résistant que celui existant à Banankoro.

Donc par analogie, les profils d'altération des vallées de Banankoro ressembleraient à ceux du haut-glacis et de la surface intermédiaire du secteur d'Akouékouadiokro en Côte-d'Ivoire.

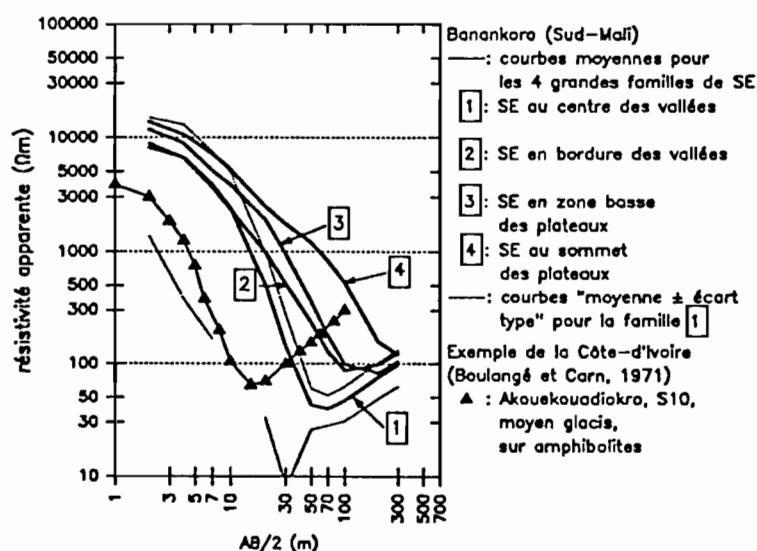


Figure 99 : Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et le SE S10 réalisé en Côte-d'Ivoire, appartenant au moyen-glacis et situé sur des amphibolites, d'après BOULANGE et CARN (1971).

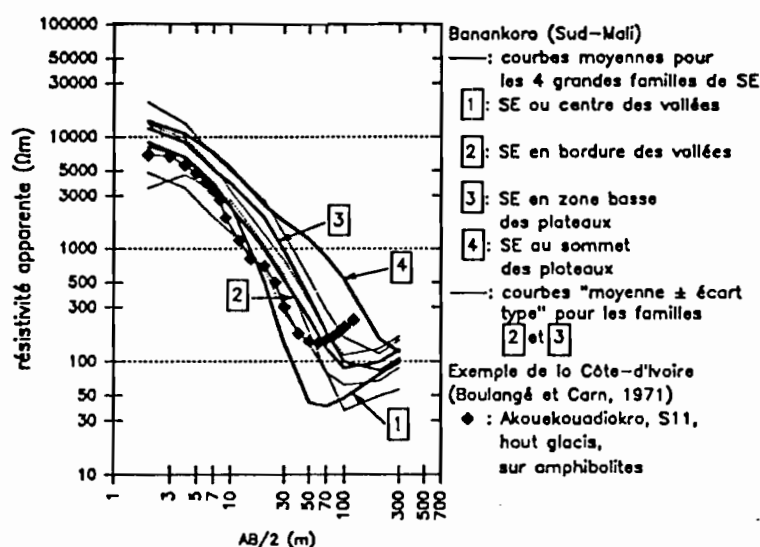


Figure 100 : Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et le SE S11 réalisé en Côte-d'Ivoire, appartenant au haut-glacis et situé sur des amphibolites, d'après BOULANGE et CARN (1971).

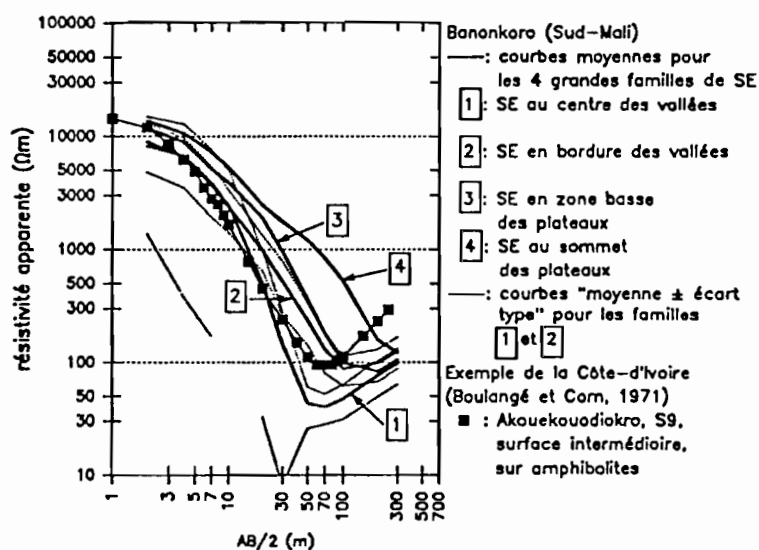


Figure 101 : Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et le SE S9 réalisé en Côte-d'Ivoire, appartenant à la surface intermédiaire et situé sur des amphibolites, d'après BOULANGE et CARN (1971).

## G. Conclusion

Par rapport aux SE de Banankoro, représentés par les courbes des moyennes des quatre grandes familles, les exemples de SE d'autres régions d'Afrique sont souvent caractéristiques de profils d'altération moins résistants et moins épais, même si ils ont aussi une forme de courbe en V.

Cependant certains SE sont proches de ceux de Banankoro. Il s'agit bien sûr des deux SE de plateau réalisés sur le secteur de Kobada, qui se situe justent sur l'autre rive du Niger par rapport à Banankoro : les courbes obtenues sont semblables à celles des stations proches des sommets topographiques des plateaux de Banankoro, tant en résistivité qu'en épaisseur.

Le SE du Burundi, sur le massif de Musongati, présente aussi des résistivités et des épaisseurs semblables aux stations proches des axes de drainage des vallées de Banankoro.

Les deux SE effectués en Côte-d'Ivoire sur le site d'Akouékouadiokro, sur la surface intermédiaire et



sur le haut-glacis sont comparables aux SE des vallées : l'épaisseur totale du profil d'altération pour ces deux SE est proche de celle des SE du centre des vallées et les résistivités sont plus proches de celles des SE de la périphérie. Les résistivités apparentes du minimum étant nettement supérieures à celles des SE proches des axes de drainage des vallées de Banankoro, elles pourraient ainsi identifier une nature différente de la lithomarge à la base du profil due à une roche-mère différente, qui est du type amphibolites alors que celle de Banankoro est plutôt du type schisteux.

Tous ces exemples montrent que les SE effectués sur un même milieu peuvent être très différents selon les caractéristiques propres à ce milieu. Il n'est pas surprenant de retrouver sur le secteur de Kobada, qui est proche de celui de Banankoro pour les cadres géologique, paléoclimatique et hydrographique, des SE de plateau presque identiques à certains SE du plateau de Banankoro. Il est intéressant de trouver des ressemblances entre les SE du secteur de Banankoro et ceux d'autres régions plus distantes comme à Akouékouadiokro en Côte-d'Ivoire et sur le massif de Musongati au Burundi, alors que les cadres géologique, paléoclimatique et hydrographique sont à priori différents.

#### IV. L'ISOTROPIE D'UN SE DE DIRECTION E-W ET N-S

Les travaux de PHAM en magnéto-tellurique sur le secteur de Banankoro ont mis en évidence l'isotropie électrique du profil d'altération : les mesures de résistivité apparente effectuées EW et NS ne montrent pas de différence significative ( PHAM et BOYER, 1988 ; PHAM *et al.*, 1988). On a voulu aussi tester cette isotropie électrique par le SE. Pour cela, on a sélectionné la station L2-1550S, située au milieu du plateau de Banankoro, afin d'y réaliser un SE de direction EW, comme tous les autres SE, et un autre SE de direction NS. A cet endroit, sur le plateau, les dénivelées ne sont pas trop importantes, et les écartements maximaux en AB/2, jusqu'à 500m, restent distants des rebords du plateau. Par contre, la nature de l'affleurement et la végétation peuvent varier rapidement : la dalle cuirassée peut être soit massive, soit fracturée, soit recouverte par un épais recouvrement argilo-quartzueux à gravillons ferrugineux.

Les courbes de ces deux SE sont pratiquement identiques (Figure 102). Les résistivités apparentes mesurées sont très proches (Tableau 17) : elles diffèrent le plus pour AB/2=10m, où le SE de direction EW a une résistivité apparente plus forte, et pour AB/2=150m et AB/2=200m, où c'est le SE de direction NS qui a des résistivités apparentes plus fortes. Ces différences sont sans doute dues à des à-coups de prise, c'est-à-dire des changements assez importants au niveau du contact électrode-affleurement pour produire de fortes variations de résistance.

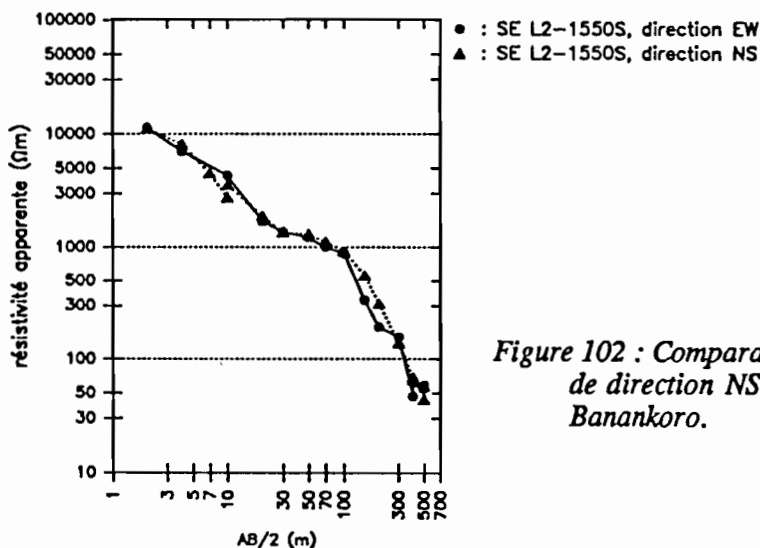


Figure 102 : Comparaison entre le SE de direction EW et celui de direction NS pour la station L2-1550S du plateau de Banankoro.

Tableau 17 : Résistivités apparentes des SE L2-1550S de direction EW et NS.

AB/2 (m)	$\rho_a$ ( $\Omega\text{m}$ )	
	L2-1550S EW	L2-1550S NS
2	11232	11257
4	7047	8178
7		4535
10	4325	2774
10		3584
20	1700	1906
20	1705	
30	1374	1344
50	1205	1301
50		1278
70	997	1118
100	876	918
150	336	558
200	193	312
300	157	140
400	47	66
400	62	69
500	59	44
500	55	58

Ce résultat confirme le caractère isotrope des propriétés géoélectriques du profil d'altération jusqu'à l'amorce du conducteur profond. L'anisotropie de la roche-mère schisteuse mise en évidence par les sondages magnéto-telluriques à plus grande profondeur disparaît très tôt à la base de la lithomarge, avant même que ne s'efface totalement la structure de la roche-mère.

On retrouve donc bien l'isotropie électrique du profil d'altération, sur une zone du plateau où le profil est particulièrement épais. On peut donc penser que c'est le cas sur l'ensemble du secteur de Banankoro.

## V. COMPARAISON DE DEUX SE SUIVANT LEUR POSITION TOPOGRAPHIQUE

Il y a sur le plateau de Banankoro de nombreux bombements topographiques de longueur d'onde hectométrique et de faible amplitude, surtout sur la partie ouest amont. Là, ils ont une forme allongée perpendiculairement à la direction générale NW-SE de cette partie du plateau. L'altitude moyenne décroît d'Ouest en Est, vers la vallée du Kokoyon. Le plateau est entaillé dans les zones basses par des axes de drainage qui vont former, sur les rebords, les têtes de marigot qui alimentent le Kokoyon à la saison des pluies. On a implanté sur ce secteur deux SE distants de 50m : le premier, 5450W-1600N, est implanté sur un bombement ; le second, 5500W-1600N, est situé en contrebas à 5m, dans un creux. A cet endroit affleure une vaste dalle cuirassée massive sur plusieurs kilomètres carrés. Une zone boisée, située en aval, n'est atteinte qu'à partir de AB/2=200m.

Les courbes de ces deux SE ne sont pas identiques, tout en ayant la même allure générale (Figure 103). En AB/2=2m, la résistivité apparente du bombement est supérieure à celle du creux, respectivement 12494 $\Omega\text{m}$  et 9525 $\Omega\text{m}$ . De AB/2=4m à AB/2=20m, les résistivités apparentes des deux SE sont très proches. A partir de AB/2=30m et jusqu'à AB/2=150m, les résistivités apparentes du bombement deviennent nettement inférieures à celles du creux. Finalement pour AB/2=200m, les résistivités apparentes sont à nouveau proches. La courbe du bombement atteint son minimum avant celle du creux, respectivement pour AB/2=100m à 75 $\Omega\text{m}$  et pour AB/2=200m à 112 $\Omega\text{m}$ .

Le profil d'altération semble donc moins épais sous le bombement que sous le creux. On pourrait même dire que ce sont les niveaux résistants intermédiaires compris entre AB/2=30m et AB/2=100m avec une résistivité entre 4000 $\Omega\text{m}$  et 100 $\Omega\text{m}$ , qui sont moins épais sous le bombement que sous le creux. Ce

résultat est en contradiction avec la tendance générale observée sur l'ensemble des SE de Banankoro, qui montrent des profils plus épais et plus résistants en profondeur, quand l'altitude des stations augmente. Cette contradiction apparente peut-être due au fait que les directions d'écartement des électrodes sont en biais par rapport à la direction d'allongement du bombement et du creux. Si bien qu'à partir de  $AB/2=50m$ , les électrodes d'émission passent du bombement aux creux qui l'entourent pour le SE 5450W-1600N, et vice versa pour le SE 5500W-1600N, et d'une façon plus ou moins symétrique et simultanée. Pour mieux étudier ce problème, il faudrait effectuer d'autres SE avec des direction d'écartement pour les électrodes parallèles à celles du relief.

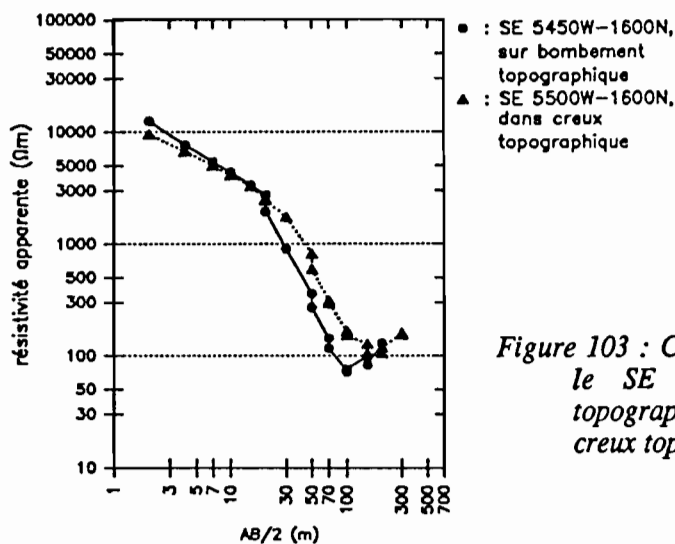


Figure 103 : Comparaison sur le plateau de Banankoro entre le SE 5450W-1600N, situé sur un bombement topographique, et le SE 5500W-1600N, situé dans un creux topographique.

De plus, on remarque que, pour le SE du bombement, sur la partie de la courbe comprise entre  $AB/2=20m$  et  $AB/2=100m$ , les résistivités apparentes baissent systématiquement pour un agrandissement de MN avec un même AB/2. On note la même chose pour le SE du creux entre  $AB/2=50m$  et  $AB/2=150m$ . Alors que normalement dans le cas d'une pente négative, un écartement de MN pour un même AB/2 devrait provoquer une augmentation des résistivités apparentes. Ces à-coups de MN pourraient marquer l'influence des ondulations topographiques sur les mesures.

## VI. COMPARAISON DES COURBES DE RESISTIVITE DES SE ET DES SMT

Les SE et les sondages magnéto-telluriques (SMT) ont été réalisés sur les mêmes stations, aux erreurs de repérage sur le terrain près, et pendant la même période climatique (milieu de saison sèche). On peut donc comparer les courbes de résistivité apparente obtenues par ces deux méthodes sur le profil d'altération.

Avec les SMT, le profil d'altération est caractérisé par quatre valeurs de résistivité apparente au maximum, la première est obtenue en V.L.F et les trois autres en M.T., alors qu'avec le SE il est détaillé par neuf valeurs au minimum, pour les profils les moins épais. La définition du profil d'altération par le SE est donc meilleure que celle du SMT. La première valeur de résistivité apparente mesurée par le SMT est de l'ordre du millier d'ohm-mètres, alors que celle mesurée par le SE est d'environ la dizaine de milliers d'ohm-mètres. Ceci est dû au fait que les horizons de surface, par leurs très fortes résistivités, se comportent comme des niveaux invisibles pour les SMT. Souvent, sur les courbes des SMT, il n'y a pas de valeur intermédiaire entre la valeur "V.L.F." résistante et la première valeur "M.T." conductrice, correspondant souvent au minimum de la courbe du SMT, tandis que sur les courbes des SE, il y a au moins quatre à cinq valeurs de résistivité apparente pour former la partie descendante de la courbe : la séquence verticale des horizons du profil d'altération sera mieux caractérisée par la succession des niveaux résistants intermédiaires mis en évidence par les SE.

Pour améliorer les performances et la résolution des SMT à faible profondeur, il faudrait mettre au point un appareil capable de sélectionner un plus grand nombre de fréquences électro-magnétiques vers les plus faibles périodes, en "V.L.F." comme en M.T.

## VII. CONCLUSIONS

Cette étude constitue vraisemblablement le premier exemple d'exploration systématique d'une couverture latéritique par un réseau de SE aussi dense : l'ensemble du secteur de 70km<sup>2</sup>, correspondant au plateau de Banankoro et à ses vallées adjacentes, a été couvert par 127 stations de SE. Les caractéristiques géoélectriques des profils d'altération mises en évidence par l'examen de l'ensemble des mesures de résistivité apparente peuvent être résumées suivant leurs trois aspects principaux :

### 1°) Les variations de résistivité apparente en fonction de la profondeur

Le trait commun à tous les SE du secteur de Banankoro est la forme caractéristique en V des courbes de résistivité apparente pour des écartements en AB/2 compris entre 2m et 300m. La remontée finale de la courbe n'est pas toujours amorcée même avec des mesures allant jusqu'à AB/2=500m. Les résistivités apparentes mesurées ont une gamme de valeurs très étendue : les maxima sont atteints en début de courbe avec des résistivités apparentes de l'ordre de la dizaine de milliers d'ohm-mètres, et les minima sont atteints en fin de courbe avec des résistivités apparentes de l'ordre de la dizaine d'ohm-mètres.

Les résistivités moyennes calculées pour l'ensemble du secteur décroissent régulièrement de AB/2=2m à AB/2=200m, et la dispersion des valeurs est importante. La distribution des résistivités apparentes pour chaque AB/2, montre que les 127 stations de SE ne forment pas une population homogène à moyenne profondeur de AB/2=20m à AB/2=100m : on distingue un groupe de faible résistivité apparente et un autre de forte résistivité apparente, pour les SE situés sur les plateaux comme pour les SE situés dans les vallées.

### 2°) La distribution spatiale des résistivités apparentes à l'échelle du paysage

La réalisation de cartes de résistivité apparente avec comme fonds les contours des plateaux, le réseau hydrographique et les natures de roches-mères, a permis de mettre en évidence des groupes de station qui présentaient les mêmes évolutions pour des AB/2 successifs. On distingue trois types de carte d'iso-valeur, qui se succèdent quand les AB/2 augmentent :

- Pour le premier type de carte, qui concerne les écartements de AB/2=2m à AB/2=7m, l'hétérogénéité spatiale des valeurs est forte : il n'y a pas d'organisation évidente en fonction des caractéristiques du terrain. Ceci est dû au fait que les affleurements sont de natures variées et que, d'une station à l'autre, ils sont souvent différents.

- Le deuxième type de carte se rencontre pour les écartements compris entre AB/2=20m et AB/2=100m, la carte de AB/2=10m faisant la transition avec le premier type. Sur ces cartes, les résistivités apparentes s'organisent clairement en fonction des deux unités morphologiques du paysage : les plateaux sont résistants et les vallées sont conductrices. De plus, sur les plateaux, certaines stations sont nettement plus résistantes que d'autres, elles sont alors soit regroupées le long d'un axe étroit comme sur la partie est du plateau de Banankoro, soit isolées. Les autres stations de plateau ont des résistivités apparentes proches de celles des stations de vallée. On met donc en évidence une zonalité très nette des résistivités à moyenne profondeur entre AB/2=20m et AB/2=100m, qui semble liée à la morphologie de la surface.

- Le troisième type de carte existe pour AB/2=200m et AB/2=300m. Sur ces cartes, l'organisation change : les courbes d'iso-valeur s'organisent en surfaces irrégulières et recourent les formes du relief ; il y a des inversions de résistivité apparente, certaines stations de plateau deviennent plus conductrices que celles de vallée, ce qui marque des différences importantes quant aux épaisseurs des profils.

### 3°) Les quatre familles de sondage électrique

D'après ces cartes d'iso-résistivité, on distingue plusieurs familles de SE. La première séparation est guidée par les cartes de  $AB/2=20m$  à  $AB/2=100m$ , elle se fait d'après la morphologie du paysage : les stations de plateau et celles de vallée sont regroupées séparément, car les premières sont plus résistantes que les secondes. D'après ces mêmes cartes, on subdivise les stations de plateau en deux groupes : celui des stations qui restent résistantes par rapport aux vallées d'une carte à l'autre quand  $AB/2$  augmente, et celui des stations qui deviennent conductrices. Les stations des vallées se répartissent aussi en deux groupes d'après la forme de la courbe du SE, selon que ces stations ont une résistivité apparente supérieure ou inférieure à  $100\Omega m$  pour  $AB/2=50m$ . Finalement, les SE se répartissent en quatre familles correspondant à deux types géoélectriques "résistant" et "conducteur" pour les deux unités morphologiques "plateau" et "vallée".

La représentation de ces quatre familles par leur courbe moyenne disposée sur un même diagramme permet de comprendre l'organisation des cartes des résistivité apparente et de mieux caractériser chaque famille.

Pour les plus faibles  $AB/2$ , les quatre courbes moyennes sont très proches et la dispersion des valeurs est grande, il ne peut donc pas y avoir d'organisation claire sur les cartes d'iso-valeur correspondantes. De  $AB/2=20m$  à  $AB/2=100m$ , les courbes moyennes se distinguent nettement les unes des autres : la famille résistante de plateau a les valeurs les plus fortes, la famille conductrice de vallée les plus faibles, tandis que les SE de plateau de type "conducteur" se rapprochent des SE de vallée de type "résistant" avec les plateaux résistants et les vallées conductrices.

Pour les plus grands  $AB/2$ , les valeurs moyennes se rapprochent : celles des deux familles de vallée et de la famille conductrice de plateau correspondent à la remontée finale des courbes de SE, alors que celle de la famille résistante de plateau correspond au début du minimum des courbes de SE ; cette disposition des courbes expliquent les inversions de résistivité apparente observées sur les cartes d'iso-valeur de grande profondeur.

En localisant sur une carte les positions des stations de ces quatre familles, on remarque que :

- Les stations conductrices des vallées se situent préférentiellement à proximité des axes de drainage, au centre de la vallée.
- Les stations résistantes des vallées sont plutôt situées à la périphérie des vallées, à proximité des talus des plateaux.
- Les stations conductrices des plateaux se trouvent généralement aux plus faibles altitudes.
- Les stations résistantes des plateaux sont sur les points topographiques élevés.

On observe donc une distribution ordonnée des quatre types de SE depuis les zones les plus basses des vallées jusqu'aux zones les plus hautes des plateaux. D'après la forme des courbes moyennes, cette répartition correspond à un déplacement de la position du minimum depuis les plus faibles résistivités apparentes et les plus petits  $AB/2$  vers les plus fortes résistivités apparentes et les plus grands  $AB/2$ . Cette évolution met en évidence des changements importants au niveau des horizons de moyenne profondeur du profil d'altération. L'épaisseur de ces horizons de résistivités intermédiaires entre les niveaux résistants de surface et le conducteur profond, se développent des vallées vers les plateaux. Le rôle de la topographie et des axes de drainage sur l'épaississement de ces horizons semble donc prépondérant.

L'influence de la roche-mère mise en évidence par sondage magnéto-tellurique (PHAM *et al.*, 1989) n'apparaît pas clairement sur les SE, sauf pour la famille des SE résistants des plateaux : la courbe moyenne des SE sur granite amorce sa remontée finale pour  $AB/2=300m$ , alors que celle des SE sur schiste continue à baisser. L'épaisseur du profil d'altération pour ces SE semble donc plus importante sur schiste que sur granite.

Par rapport à d'autres SE réalisés dans diverses régions d'Afrique, sur des profils d'altération latéritique, les SE de Banankoro sont caractéristiques d'un profil d'altération souvent plus résistant et plus épais. Cependant certains exemples sont comparables aux SE des vallées, conducteurs et résistants, et à ceux conducteurs des plateaux. Il s'agit deux SE réalisés à Akouékouadiokro (Côte-d'Ivoire), sur des amphibolites, et situés l'un sur la surface intermédiaire et l'autre sur le haut-glacis, (BOULANGE et

CARN, 1971) ; et il y a aussi le SE de Musongati (Burundi), situé sur des péridotites, qui est très proche des SE conducteurs des vallées (PERIC, 1981). Aucun exemple de SE qui soit du type "résistant" de plateau de Banankoro n'a été rencontré.

L'étude des courbes de SE a révélé la diversité que pouvait avoir des profils d'altération latéritique sur un secteur de faible superficie, ainsi que leur différenciation en fonction du relief et du réseau hydrographique.



# CHAPITRE IV

## INTERPRETATION

### DES SONDAGES ELECTRIQUES

#### PAR MODELE TABULAIRE

Dans ce chapitre, on présente d'abord la méthode d'interprétation des sondages électriques, puis on décrit les différents niveaux géoélectriques identifiés sur le secteur de Banankoro, par rapport aux données de terrain recueillies sur ce secteur, ainsi que par rapport aux travaux de référence. Ensuite les variations d'épaisseur de ces niveaux géoélectriques sont examinées sur les dix coupes géoélectriques transversales au plateau, réalisées pour chaque layon de SE. L'objectif de cette étude est de mieux comprendre le mode de différenciation de la couverture latéritique à l'échelle de l'unité du modelé du paysage, en relation avec la morphologie du relief et la nature de la roche-mère.

#### I. L'INTERPRETATION DES SONDAGES ELECTRIQUES

La méthode classique d'interprétation des SE est basée sur l'étalonnage de certains SE à partir de puits de référence. Mais à Banankoro, les puits ne sont pas assez profonds pour atteindre la roche-mère. On a eu recours à une méthode d'interprétation un peu particulière en utilisant les résultats des sondages magnéto-telluriques (SMT) réalisés sur le secteur.

##### A. La méthode classique d'interprétation des SE

Normalement, pour interpréter des SE, on étalonne certains d'entre eux sur des puits de référence. Pour cela, on implante un SE à proximité d'un puits pour fixer les paramètres du modèle tabulaire (nombre de couche, épaisseur et résistivité), de manière à ce que la courbe théorique calculée soit la plus proche possible de celle mesurée sur le terrain. On teste successivement plusieurs modèles en retenant finalement le meilleur compromis entre les observations du puits et la courbe de terrain. Il est très difficile de connaître à l'avance la résistivité exacte d'un horizon : elle dépend de la composition minéralogique, de l'assemblage des minéraux (taille, nature du joint de grain, porosité) et de l'eau présente dans les pores (quantité, répartition et salinité).

Le nombre et l'épaisseur des horizons sont déterminés par les profils du puits, et servent à calibrer le modèle d'ajustement théorique au SE en fixant les valeurs de résistivité pour chaque niveau. L'interprétation des autres SE à partir du SE étalonné se fait d'autant plus facilement que le secteur est uniforme, c'est-à-dire que les SE se ressemblent. Si les variations deviennent trop importantes, il faut alors refaire un étalonnage. Le nombre d'étalonnage varie en fonction de l'homogénéité du secteur étudié.

Cette méthode classique d'interprétation n'a pas pu être appliquée directement à Banankoro pour l'ensemble du profil, puisque les puits, dont certains descendent jusqu'à 20m de profondeur, n'atteignent jamais la roche-mère. L'épaisseur minimale du profil d'altération, mesurée par sondage magnéto-tellurique (SMT), est de 50m sous les vallées, et elle peut dépasser 100m sous les plateaux (PHAM *et al.*, 1988). Cette grande profondeur a été confirmée par la suite par les forages du B.R.G.M. (VERNET *et al.*, 1988). Il a donc fallu étalonner les SE de Banankoro autrement.



## B. La méthode d'interprétation des SE utilisée dans ce travail

Pour interpréter les SE, on s'est servi des SMT qui ont été réalisés sur le secteur de Banankoro par l'équipe de PHAM en 1987, 1988 et 1989. Les stations de mesures étant les mêmes, chaque SE est étalonné sur le SMT équivalent. Mais le profil d'altération n'est décomposé par les SMT qu'en trois niveaux (PHAM *et al.*, 1988) : l'ensemble "cuirasse et argiles tachetées", la lithomarge argileuse et la roche-mère ; alors qu'il est toujours décomposé en quatre niveaux au moins par les SE. Cependant, les données de SMT sont utiles, car elles permettent de calibrer les épaisseurs et les résistivités globales des niveaux de SE.

La méthode d'interprétation que l'on a suivie se déroule en deux étapes :

- Au cours de la première étape, chaque SE est interprété séparément, et le plus simplement possible, en distinguant un nombre minimum de couche, et avec des résistivités qui décroissent depuis la surface jusqu'au conducteur profond, sauf pour la première couche qui est parfois moins résistante que la suivante. Cette décroissance est pratiquement toujours observée dans les travaux publiés sur ce type de profil (Tableau 19). Au cours de l'interprétation, on cherche à conserver l'épaisseur totale du profil d'altération donnée par les SMT. On remarque alors qu'il est facile d'obtenir pour le conducteur profond des SE, des épaisseurs et des résistivités proches de celles du niveau conducteur des SMT, correspondant à la lithomarge argileuse. On est donc en présence du même niveau géoélectrique dans les deux cas : il correspond aux résistivités minimales des courbes de sondage. Pour les niveaux situés au-dessus de ce conducteur profond, la somme de leurs épaisseurs doit donc être égale à l'épaisseur de l'ensemble "cuirasse et argiles tachetées" des SMT, afin de garder la même épaisseur pour l'ensemble du profil. Ceci a toujours été obtenu sans poser de problème majeur.
- Au cours de la seconde étape, on regroupe les résistivités des différents niveaux, issus de la première interprétation, par classes de valeurs en respectant la position des niveaux sur la courbe de résistivité, puis on fait une nouvelle interprétation des SE, en essayant d'homogénéiser les valeurs de résistivité vers une seule valeur moyenne par famille pour chaque niveau, de façon à ce que ces valeurs moyennes soient les plus distinctes les unes des autres. Plus les niveaux sont superficiels, plus il est difficile de changer leurs caractéristiques, et inversement pour les niveaux profonds. De plus, on tient compte aussi des SE voisins : si l'un d'eux présente un niveau différent en résistivité, c'est-à-dire appartenant à une autre classe de valeurs, on essaye de le mettre en évidence dans la nouvelle interprétation. On ne garde ce nouveau niveau que si son épaisseur n'est pas négligeable par rapport à celle des niveaux qui l'encadrent.

Finalement, on remarque que la somme des épaisseurs des niveaux des SE situés au-dessus du conducteur profond, est très souvent légèrement supérieure aux épaisseurs du niveau équivalent "ensemble cuirasse et argiles tachetées" des SMT. Ceci s'explique fort bien par les fortes résistivités ( $> 1000\Omega m$ ) et par les épaisseurs relativement faibles des terrains superficiels mis en évidence par SE. Ces niveaux supérieurs très résistants du profil d'altération sont pratiquement invisibles pour les ondes électromagnétiques utilisées par les SMT, qui ont une trop grande profondeur de pénétration.

Lors de la deuxième phase d'interprétation, on essaie de respecter un principe de continuité des niveaux géoélectriques d'un SE à l'autre. On obtient finalement des profils d'altération aussi épais que ceux déterminés par SMT, avec une meilleure caractérisation de la séquence verticale des niveaux géoélectriques, qui s'étendent d'une façon assez continue d'un SE à l'autre, sur l'ensemble du secteur.

## C. Le programme d'interprétation des SE utilisé dans ce travail

Le programme d'interprétation des SE a été mis au point au Laboratoire de Géophysique Appliquée et Structurale à Vandoeuvre-lès-Nancy. C'est un programme interactif qui recalcule instantanément les résistivités apparentes à partir des paramètres du modèle tabulaire. La courbe théorique est directement visualisée sur l'écran, en même temps que la courbe de terrain. Le calcul des résistivités apparentes se fait avec 156 coefficients. Il n'y a pas de calcul de l'erreur quadratique : le meilleur ajustement des deux courbes est laissé à l'appréciation visuelle de l'opérateur. Il n'y a pas non plus de calcul automatique utilisant un critère d'ajustement pour fixer les différentes valeurs des paramètres du modèle théorique : l'opérateur procède par approximations successives et de manière séquentielle en commençant par les niveaux les plus superficiels. Les valeurs des paramètres, épaisseur et résistivité de chaque niveau, sont contrôlées à chaque étape.

## II. LES CARACTERISTIQUES DES NIVEAUX GEOELECTRIQUES

Après avoir appliqué la méthode d'interprétation des SE telle qu'elle a été décrite ci-dessus, on obtient finalement huit niveaux géoélectriques différents pour le profil d'altération depuis la surface jusqu'à la roche-mère comprise. Ces niveaux se distinguent par leurs résistivités et par leurs positions sur les courbes des SE. Leurs caractéristiques (effectif, moyennes et écarts-types des résistivités et des épaisseurs) sont données dans le tableau 18 pour l'ensemble des 127 stations de mesures. Ces valeurs sont également représentées sur la figure 104, pour faciliter les comparaisons.

Tableau 18 : Les caractéristiques des huit niveaux géoélectriques des 127 SE.

niveau géoélectrique	effectif sur 127 SE	résistivité ( $\Omega m$ )		épaisseur (m)		identification
		m	s	m	s	
niveau 1	56	6700	9700	2.4	1.7	formation meuble de recouvrement
niveau 2	86	18000	8300	1.8	0.7	horizon très induré riche en hématite et goethite : cuirasse
niveau 3	101	4500	240	5.1	2.8	horizon induré à hématite et goethite : carapace
niveau 4	90	1100	100	19	16	argile tachetée et sommet de la lithomarge kaolinique
niveau 5	104	650	60	16	9.4	lithomarge non saturée en eau "résistante"
niveau 6	37	190	65	17	10	lithomarge non saturée en eau "conductrice"
niveau 7	116	23	13	36	7.0	lithomarge saturée en eau
niveau 8	116	430	380	non déterminée par SE		roche-mère peu altérée

m : moyenne, s : écart-type

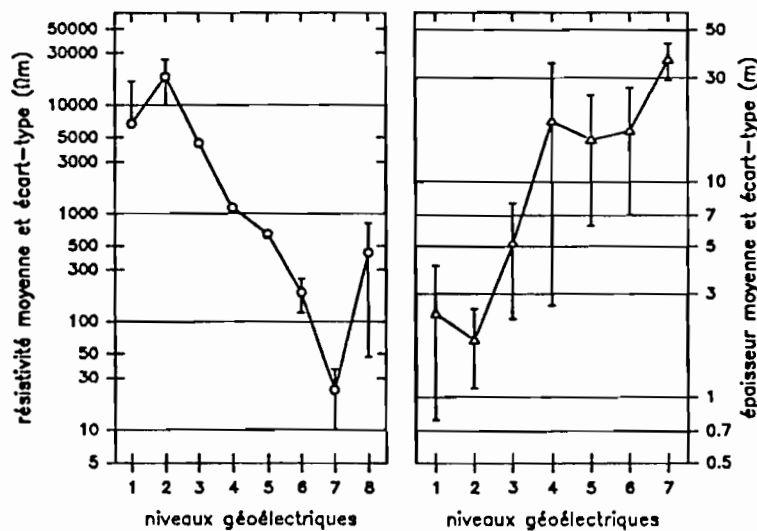


Figure 104 : Les résistivités et les épaisseurs moyennes des huit niveaux géoélectriques, mis en évidence par les SE.

Tableau 19 : Exemples de résistivités obtenues sur des profils d'altération latéritiques.

auteur(s)	substratum	identification	résistivité (Ωm)			
MATHIEZ et HUOT (1966)	socle cristallin (Afrique occidentale)	recouvrement latéritique :	carapace ferrugineuse	300	-	10000
			zone de transition à concrétions	100	-	300
			base argileuse à canalicules	100	-	300
			arènes :	3	-	30
			arène fluente	30	-	200
		socle		> 200		
ALBOUY, PION et WACKERMANN (1970)	roches "éruptives" (Sénégal, Haute-Volta)	terrain superficiel (très argileux, ou latéritique, ou gravillons ferrugineux) altération	argiles gonflantes	10	-	> 10000
			argiles gonflantes + kaolinite	6	-	14
			kaolinite	15	-	25
			arène	20	-	30
				50	-	100
BOULANGE et CARR (1971)	roches vertes (Côte-d'Ivoire)	SE étalonné S9, sur Surface Intermédiaire	recouvrement meuble			?
			cuirasse ferrugineuse très compacte			14400
			horizon argileux induré			2450
			lithomarge essentiellement kaolinique			32
			roches vertes			+ ∞
		4 SE étalonnés différents	cuirasses en fonction de l'induration et de la teneur en fer	3000	-	10000
			horizons sous cuirasse (argiles tachetées)	1000	-	3000
		SE S11, sur Haut Glacis	lithomarges argileuses (souvent kaolinite pure)			< 100
			horizon cuirassé très résistant			7000
			nappe perchée sur argiles tachetées			350
argiles tachetées partiellement indurées				630		
SE S10, sur Moyen Glacis	lithomarge kaolinite			20		
	roches vertes			+ ∞		
	cuirasse ferrugineuse vacuolaire			4000		
	lithomarge argileuse			40		
		roches vertes		+ ∞		
ENGALENC (1978)	socle cristallin (Afrique de l'Ouest)	carapace ferrugineuse cuirasse zone de transition à concrétions base argileuse à canalicules arène fluente arène sableuse arène grenue granite fissuré et altéré granite sain		300	-	10000
				300	-	1500
				100	-	300
				100	-	300
				3	-	20
				50	-	60
				15	-	90
				30	-	200
					> 200	
					10	
	roches vertes	altération de roches vertes			80	
		roches vertes altérées	10	-	30	
		altération de schistes	5	-	400	
	schistes	schistes altérés	250	-	> 1000	
		schistes sains				
PALACKY et KADEKARU (1979)	dunites (Santa Fe, Goiás, Brésil)	couverture latéritique niveau altéré dunite		=	12000	
				=	90	
				>	700	

Tableau 19 (suite) : Exemples de résistivités obtenues sur des profils d'altération latéritiques.

auteur(s)	substratum	identification	résistivité (Ωm)			
BERNARDI et MOUTON( 1981)	socle cristallin (Afrique)	recouvrement résistant (carapace latéritique et partie supérieure de la couche d'altération argilo-sableuse)	100	-	3000	
		complexe conducteur (base saturée d'eau de la couche d'altération et niveaux humides non saturés qui la prolonge vers le haut + zone fissurée des roches encore saines)	10	-	100	
		si > 400m, alors couche d'altération sableuse sur quartzites si < 400m, alors couche d'altération seule substratum résistant			> 500	
PALACKY, RITSEMA et De JONG (1981)	schistes	niveau supérieur			250	
		niveau conducteur			18	
		roche-mère			> 500	
	granites	niveau supérieur			450	
		niveau conducteur			38	
		roche-mère			> 500	
		d'après ENGALENC, 1978 :				
		sur granites	niveau altéré	25	-	50
			zone de transition	40	-	200
			roche-mère saine			> 1500
	sur schistes	niveau altéré	10	-	30	
		zone de transition	250	-	400	
		roche-mère saine			> 1000	
	sur amphibolites	niveau altéré	5	-	15	
		zone de transition	10	-	80	
		roche-mère saine			> 500	
PERC (1981)	roches ultrabasiqes (Burundi)	cuirasse	4000	-	10000	
		carapace + zone des argiles tachetées	600	-	1200	
		saprolite	5	-	25	
		péridotites	200	-	1200	
		serpentinites	50	-	200	
PYAM, BOYER, FREYSSINET et TARDY (1988)	schistes (Banankoro, Mali)	cuirasse et argiles tachetées	500	-	5000	
		lithomarge keolinique	10	-	30	
		schistes birrimiens			~ > 1000	

On met en évidence en moyenne cinq à six niveaux par SE, ce qui est nettement plus important que dans les exemples habituellement décrits pour ce type de profil où ils sont en moyenne au nombre de trois ou quatre par SE (Tableau 19). L'identification des niveaux superficiels a été faite à partir des observations de la surface et dans les puits présents sur le secteur, et pour les niveaux plus profonds d'après des forages réalisés par le B.R.G.M. sur le secteur de Banankoro et d'après les travaux déjà publiés sur l'étude des latérites par SE. Ces niveaux sont décrits successivement, suivant leur ordre d'apparition sur les courbes de SE depuis la surface vers la roche-mère en profondeur.

## A. Les niveaux superficiels

Les trois niveaux superficiels très résistants qui se situent au début des courbes de SE, dépassent rarement quelques mètres d'épaisseurs, et leur identification se fait facilement d'après les affleurements et les puits présents sur le secteur.

### 1. Le niveau 1

Le niveau 1, identifié en tout début de courbe de SE, est le plus superficiel. C'est un des niveaux les moins fréquents : il n'est présent que pour 44% des stations (Tableau 18). Sa résistivité moyenne est l'une des plus forte avec  $6700\Omega\text{m}$ , et la dispersion des valeurs est très grande puisque l'écart-type est supérieur à la moyenne (Figure 104). Ce niveau a une épaisseur décimétrique à métrique, sa valeur moyenne étant de 2,4m.

Ce premier niveau est facilement identifiable sur le terrain. Il s'agit de la formation superficielle meuble de recouvrement correspondant aux sols de cette zone. Sa nature est très variable d'un endroit à l'autre : elle passe de matériaux purement argilo-silteux à des nappes de gravillons ferrugineux mélangés à des blocs issus du démantèlement de la cuirasse. Il peut correspondre aussi à une dalle cuirassée fortement fracturée avec un remplissage plus ou moins important des diaclases par des matériaux argileux. La grande dispersion des valeurs de résistivité (Figure 104) s'explique par l'hétérogénéité spatiale et le morcellement de cette couverture à l'échelle du réseau des stations de mesures.

Cette formation est rarement décrite. ALBOUY *et al.* (1970) donnent également des résistivités très variées pour ce niveau qu'ils appellent sol : depuis  $10\Omega\text{m}$  pour un horizon purement argileux, jusqu'à  $20000\Omega\text{m}$  pour un recouvrement à gravillons. Les niveaux à gravillons ont tendance à être nettement plus résistants ( $> 1000\Omega\text{m}$ ) que les matériaux argileux qui composent les sol bruns ou les vertisols (environ  $100\Omega\text{m}$ ). Les sols à éboulis de pente ont des résistivités intermédiaires (environ  $500\Omega\text{m}$ ). Dans un tableau de synthèse, BOULANGE et CARN (1971) donnent des résistivités apparentes inférieures à  $100\Omega\text{m}$  pour le recouvrement humifère (néosol), et comprises entre  $100\Omega\text{m}$  et  $1000\Omega\text{m}$  pour le recouvrement meuble avec des blocs, des graviers, des gravillons et pour la cuirasse démantelée. Les résistivités obtenues pour ce niveau à Banankoro sont donc supérieures à celles de BOULANGE et CARN, et elles sont semblables aux plus fortes valeurs présentées par ALBOUY *et al.*.

Ce niveau, souvent très argileux, a posé d'importants problèmes de contact avec les électrodes car il était déjà très sec à l'époque où les mesures ont été faites, c'est-à-dire en milieu de saison sèche. Il est alors très difficile à humecter avec de l'eau salée comme cela se fait d'habitude, car l'eau s'infiltrerait trop lentement. Le phénomène inverse a lieu quand ce niveau est presque exclusivement formé par des gravillons : l'eau versée pour établir le contact se répand rapidement partout et risque de provoquer un court-circuit pour le plus petit écartement des électrodes de réception M et N. Si bien que ce niveau a été déblayé avant l'implantation des électrodes, lorsque son épaisseur était inférieure à une trentaine de centimètres.

D'après la carte des isopaques (Annexe carte 15), ce niveau, quand il n'est pas absent, présente des très faibles épaisseurs sur de grandes surfaces, localisées aussi bien sur les plateaux que dans les vallées, et aussi bien sur granite que sur schiste. Les zones où il présente les plus fortes épaisseurs sont restreintes et elles sont plutôt situées dans les vallées, par exemple au sud du layon L0, au sud du layon L4, au nord et au sud du layon L8, sur la station 4500W-2000S située entre les layons L6 et L7. Mais son épaisseur peut être aussi importante en rebord de plateau comme pour les stations L5-400N et L5-500S

situées au nord du layon L5, et sur le plateau même comme pour la station L8-3400N où elle atteint la valeur maximale de 7m.

## 2. Le niveau 2

Le niveau 2 est aussi un niveau superficiel, puisqu'il se situe soit en tout début de courbe de SE, soit juste après le niveau 1. C'est un niveau relativement fréquent : il est présent pour 68% des stations (Tableau 18). Sa résistivité moyenne est la plus élevée avec 18000 $\Omega$ m, et la dispersion des valeurs est l'une des plus forte (Figure 104). Son épaisseur est décimétrique à métrique, sa valeur moyenne est la plus petite avec moins de 2m.

On identifie facilement ce niveau 2 puisqu'on le trouve souvent directement à l'affleurement : il s'agit de la cuirasse ferrugineuse. Sa composition minéralogique, très riche en oxy-hydroxydes de fer, et sa faible teneur en eau à l'époque des mesures expliquent ses très fortes résistivités. Les exemples de résistivités aussi élevées pour des formations cuirassées sont rares : elles sont en général inférieures à 10000 $\Omega$ m. Seuls BOULANGE et CARN (1971), et PALACKY et KADEKARU (1979) donnent des valeurs proches, respectivement à 14400 $\Omega$ m et à environ 12000 $\Omega$ m (Tableau 19). La grande dispersion des valeurs de résistivité est due à l'hétérogénéité de la cuirasse sur le secteur. Sur le plateau de Banankoro, FREYSSINET (1990) distingue trois types de faciès emboîtés : le plus profond est le faciès cuirassé massif, qui se développe au-dessus de la carapace massive, et qui présente des domaines ferrugineux importants et relativement uniformes, avec des canalicules millimétriques plus ou moins argileux ; ce faciès évolue progressivement vers le haut vers un faciès pseudo-nodulaire, où un réseau de goethites rubanées isole des plages mamelonnées dans le domaine ferrugineux, sans former de nodules franchement individualisés ; ce dernier faciès passe progressivement à un faciès nodulaire, qui se compose principalement de nodules ferrugineux millimétriques à centimétriques, jointifs ou isolés dans une matrice indurée, avec des enclaves pluri-centimétriques de cuirasse massive ou pseudo-nodulaire. Sur les glacis des vallées, FREYSSINET (1990) décrit pour la cuirasse un faciès massif scoriacé, où les nodules ferrugineux de la carapace se soudent progressivement pour former un réseau anastomosé et induré identique au faciès massif du plateau, avec de grosses vacuoles millimétriques à centimétriques. La cuirasse, par sa position superficielle, est exposée à l'érosion de surface qui décape plus ou moins profondément les faciès affleurants. Ainsi, le faciès de la cuirasse change souvent sur une distance de 250m à 400m, qui correspond aux écartements entre les stations, et ceci se traduit par les fortes variations de résistivités mesurées pour ce niveau (Figure 104).

La cuirasse est difficile à mettre en évidence, lorsqu'elle est située sous une formation de recouvrement meuble (niveau 1) relativement épaisse, car les domaines de résistivité de ces deux niveaux se recoupent entre 10000 $\Omega$ m et 16000 $\Omega$ m (Figure 104). D'après la courbe de SE seule, on ne peut pas toujours les distinguer. Ce problème est relativement fréquent dans les vallées où les zones de recouvrement sont plus importantes que sur les plateaux. Il faut alors tenir compte des autres stations de mesures et des puits les plus proches.

D'après la carte des isopaques (Annexe carte 16), l'épaisseur de ce niveau varie de façon irrégulière sur l'ensemble du secteur. Néanmoins, il est souvent plus mince dans les vallées que sur les plateaux, c'est le cas par exemple de la vallée du Kokoyon entre les layons L1 et L3, et des vallées de Diourouka et de Guilingoué à l'Ouest entre les layons L6 et L9. Au contraire sur les plateaux, il est épais sur de plus grandes surfaces, comme par exemple sur le plateau de Banankoro entre les layons L1 et L3, et entre les layons L7 et L8. Il peut aussi être localement absent sur les plateaux, comme par exemple pour les stations L5-400N, L5-500S, L5-800S, L7-1600N situées en rebord de plateau, et les stations L8-3400N, L9-3400N et L9-2900N situées au niveau d'entailles profondes qui démantèlent la partie supérieure du profil d'altération à l'intérieur même du plateau. Ce niveau très résistant assimilé à la cuirasse, n'apparaît pas non plus sur les SE de plateau L3-600S et L4-1350S qui ont la particularité d'être situés sur des termitières cathédrales.

Mais le niveau 2 présente parfois des épaisseurs importantes dans les vallées ; tel est le cas des stations L0-0 et L4-400N de la vallée du Kokoyon situées sur des zones de cuirassement important, et la station L3-2350S située sur une zone de forte induration. Il n'y a pas de relation évidente entre l'épaisseur de ce niveau et la roche-mère.

### 3. Le niveau 3

Le niveau 3 est encore un niveau superficiel, mais il n'apparaît jamais directement en début de courbe. Il est toujours présent sous la cuirasse (niveau 2), lorsque celui-ci existe, mais parfois, il se trouve directement sous la formation meuble de recouvrement (niveau 1). Ce niveau est plus fréquent que les deux premiers, on le rencontre pour 80% des stations (Tableau 18). Sa résistivité est élevée et pratiquement constante, environ  $4500\Omega\text{m}$  (Figure 104), car c'est le premier niveau pour lequel on a pu homogénéiser les résistivités autour d'une valeur moyenne lors de la seconde étape de l'interprétation. Son épaisseur est de 5m en moyenne.

Logiquement, d'après les observations faites dans les puits, le niveau 3 correspond à la carapace, où les domaines ferrugineux pauvres en kaolinite sont dominants, avec des tubules millimétriques à matrice argileuse grise (FREYSSINET, 1990). Elle présente une cohésion intermédiaire entre celle des argiles tachetées et celle de la cuirasse. Il n'y a pas de référence directe pour ce niveau dans les travaux antérieurs, soit parce que la carapace n'est pas distinguée (ALBOUY *et al.*, 1970 ; BOULANGE et CARN, 1971 ; PALACKY et KADEKARU, 1979 ; PALACKY *et al.*, 1981), soit parce que le terme même de carapace ne semble pas correspondre à celui utilisé par FREYSSINET à Banankoro. Par exemple, MATHIEZ et HUOT (1966), et BERNARDI et MOUTON (1981) ne parlent que de carapaces ferrugineuses et pas de cuirasses, ou encore ENGALENC (1978) donne des résistivités jusqu'à  $10000\Omega\text{m}$  pour la carapace et seulement jusqu'à  $1500\Omega\text{m}$  pour la cuirasse. PERIC (1981) qui décrit une carapace entre les argiles tachetées et la cuirasse, ne lui attribue pas une résistivité particulière puisqu'il l'associe avec les argiles tachetées, et donne à l'ensemble formé par ces deux horizons des résistivités comprises entre  $600\Omega\text{m}$  et  $1200\Omega\text{m}$ . Ce niveau 3 semble donc avoir été caractérisé ici pour la première fois dans l'étude des profils latéritiques par SE, et ceci d'une manière très générale sur l'ensemble du secteur de Banankoro.

D'après la carte des isopaques (Annexe carte 17), ce niveau est souvent absent et généralement moins épais dans les vallées avec au maximum 6,5m, alors que sur les plateaux les épaisseurs sont souvent supérieures à 5m. Cependant quelques stations de plateau présentent des faibles épaisseurs pour ce niveau 3, c'est-à-dire moins de 2m, comme par exemple les stations L5-400N, L5-100N, L5-2600N, L8-3400N et L4-1350S. Pour cette dernière station, le niveau 3 n'est pas mis en évidence, c'est une des deux stations situées sur une termitière cathédrale et pour laquelle il n'y a pas non plus de niveau 2. Cette observation peut s'interpréter de deux manières. En effet, les termites pourraient choisir de préférence les zones les plus favorables, correspondant à des niveaux indurés peu épais ou absents, pour construire leurs édifices ; ou bien c'est l'installation d'une termitière qui a transformé les horizons superficiels indurés en augmentant leur humidité et leur teneur en argile, ce qui diminue leur résistivité. Ces horizons peuvent alors se confondre sur les courbes de SE, avec le niveau 4 plus conducteur correspondant aux argiles tachetées. Des mesures plus systématiques près des termitières cathédrales seraient nécessaires pour vérifier ces hypothèses.

Dans les vallées, l'épaisseur du niveau 3 est la même en moyenne pour les stations sur schiste ou sur granite. Par contre sur les plateaux du secteur schisteux, le niveau 3 présente des épaisseurs maximales supérieures à 10m pour quatre stations : ce sont les stations L1-1000N sur le plateau de la Dinkolé au Nord, et L1-1250S, L1-1000S, et L2-1100S sur le plateau de Banankoro. Sur les deux dernières stations, il atteint respectivement 15m et 16m, alors que sur le secteur granitique, l'épaisseur est de 9m au maximum pour les stations L6-430N et L6-1550S.

### B. Les niveaux profonds

Les cinq niveaux dits "profonds", ont en moyenne des épaisseurs décamétriques (Tableau 18). Ils n'apparaissent jamais en début de courbe, et sont souvent recouverts par au moins deux niveaux superposés. Leur identification est plus difficile à réaliser que pour les niveaux superficiels, car il n'y a que sept forages implantés par le B.R.G.M. à Banankoro qui les aient traversés. Les deux niveaux les plus profonds, c'est-à-dire les niveaux 7 et 8, sont facilement repérables par leurs résistivités et leurs positions sur la courbe de SE, et ils sont presque toujours cités dans les publications sur les SE appliqués aux couvertures latéritiques.

Le niveau 7 a les plus faibles résistivités, et correspond au minimum de la courbe de SE. Il est souvent associé à la lithomarge kaolinique à la base du profil d'altération (Tableau 19). Il se place



immédiatement au-dessus du niveau 8, correspondant à la roche-mère plus ou moins désagrégée et fracturée (Tableau 19) et qui se traduit par la remontée finale de la courbe de résistivité. Les niveaux supérieurs, 4, 5 et 6, ont des résistivités intermédiaires entre celles de la carapace (niveau 3) située au-dessus et celles du niveau 7 situé en-dessous, comprises entre 1200 et 190 $\Omega$ m en moyenne. Des profils d'altération possédant de tels niveaux avec de si fortes résistivités en profondeur, ne semblent pas avoir été décrits auparavant. Dans les paragraphes qui suivent, on essayera de les caractériser en étudiant leurs variations d'épaisseur et leurs distributions sur l'ensemble du secteur.

Avant de décrire individuellement chaque niveau, on peut déjà noter quelques observations générales. Ces niveaux se présentent toujours en se succédant de haut en bas dans l'ordre 4-5-6-7, avec des résistivités décroissantes. Cette suite est rarement complète, il manque suivant les endroits, les niveaux 4, 5, ou 6. D'après les données des puits et des forages, les niveaux 4 à 7 correspondent par leurs épaisseurs aux argiles tachetées (FREYSSINET, 1990), et à la lithomarge (VERNET *et al.*, 1988). Il y a donc plus de niveaux géoélectriques que d'horizons minéralogiques. Et les épaisseurs données pour les argiles tachetées (< 10m) sont nettement inférieures à celles des niveaux 4, 5 et 6, qui ont entre 16m et 19m de puissance en moyenne.

En se basant sur le niveau 7, qui est un niveau de référence puisqu'il est mis en évidence pour toutes les stations, et qu'il est toujours décrit par ailleurs, on peut formuler des hypothèses sur la nature des niveaux 4, 5 et 6. BERNARDI et MOUTON (1981) montrent que ce niveau, qu'ils appellent le complexe conducteur, caractérisé par des résistivités allant de 10 $\Omega$ m à 100 $\Omega$ m, comprend toujours la base saturée du profil d'altération et les niveaux argileux humides non saturés qui la prolongent vers le haut ; il peut aussi dans certains cas englober la zone fissurée de la roche encore saine. Selon ces auteurs, le complexe conducteur ne correspond qu'à la seule couche d'altération quand sa résistivité est inférieure à 40 $\Omega$ m, tandis qu'il englobe tout ou partie de la roche dégradée ou fissurée pour les valeurs plus élevées. Les résistivités très basses, c'est-à-dire inférieures à 20 $\Omega$ m, indiquent une altération très argileuse et très peu perméable ou une salinité élevée des eaux de la nappe. D'après ces résultats, le niveau 7 qui est toujours situé juste au-dessus de la roche-mère, et qui a les plus faibles résistivités (23 $\Omega$ m en moyenne) doit correspondre à la partie inférieure de la lithomarge contenant la nappe phréatique à la base du profil d'altération. Les niveaux 4, 5, et 6 qui ont des résistivités nettement plus élevées que celles du niveau 7, et qui sont toujours placés au-dessus, appartiennent donc à la zone argileuse non saturée du profil située entre la carapace et la nappe phréatique. La diminution de résistivité du niveau 4 jusqu'au niveau 6, est certainement due à une augmentation de la teneur en eau. Si le niveau 7 a des épaisseurs relativement constantes proches de 40m, celles des niveaux 4, 5 et 6 peuvent être très variables d'un secteur à l'autre, et même d'une station à l'autre.

### 1. Le niveau 4

Le niveau 4 se trouve le plus souvent sous le niveau 3, c'est-à-dire la carapace. Mais il arrive qu'il se situe directement sous le niveau 1, c'est-à-dire la formation meuble de recouvrement. C'est un niveau fréquent car il est mis en évidence pour 70% des stations (Tableau 18). Sa résistivité est la plus forte des niveaux profonds, elle est en moyenne de 1100 $\Omega$ m. Cette valeur est très uniforme puisque l'on a pu pour ce niveau, comme pour les niveaux 3, 5 et 6 homogénéiser les résistivités autour d'une valeur moyenne (Figure 104). Son épaisseur est nettement supérieure à celles des niveaux situés au-dessus, elle est de 19m en moyenne avec un écart-type important de 16m.

D'après les observations faites dans les puits, ce niveau 4 qui se trouve très souvent sous la carapace correspond logiquement aux argiles tachetées. FREYSSINET (1990) décrit cet horizon comme étant particulièrement hétérogène et constituant le siège d'importantes évolutions de faciès : la matrice argileuse grise de la lithomarge sous-jacente tend à disparaître progressivement vers le sommet de l'horizon aux dépens essentiellement de plages argileuses rose à rouge pourpre, et la ferruginisation s'intensifie du bas vers le haut en produisant une forte coloration rouge et finalement l'apparition des nodules argilo-ferrugineux violets. Dans la toposéquence du Kokoyon étudiée par FREYSSINET, à partir de sept puits, cet horizon a une épaisseur moyenne de 5m, elle est maximale sous le plateau de Banankoro avec 10m de puissance. D'après les observations faites par NOVIKOFF (communication orale) sur les carottes des sept forages du B.R.G.M., l'horizon de l'argile tachetée atteint 9,6m sur le plateau de la Dinkolé, il varie de 2,9m à 6,15m sur le plateau de Banankoro, et il fait de 2,4m en bas du talus du plateau dans la plaine du Kokoyon. Ces épaisseurs sont nettement inférieures à celles estimées



par SE pour le niveau 4, puisque ces dernières dépassent 50m sous le plateau de Banankoro à proximité des forages. Il semble donc que la limite inférieure du niveau 4 ne s'arrête pas systématiquement en bas de l'horizon des argiles tachetées. D'après NOVIKOFF (communication orale), il existe sous cet horizon des argiles tachetées, au sommet de la lithomarge, un horizon purement argileux et blanchi de 2 à 3m d'épaisseur au maximum. Il doit correspondre à la lithomarge claire de FREYSSINET (1990) puisque les puits de sa toposéquence n'atteignent que les premiers mètres du toit de la lithomarge. FREYSSINET décrit cette lithomarge claire comme étant constituée par un ensemble argileux friable de couleur blanc-gris traversé par des flammèches jaune à rose pâle, la roche étant malléable, d'aspect farineux, non induré, avec un faciès macroscopique peu changeant tout au long de la toposéquence. La plupart des structures de la roche-mère sont parfaitement conservées. Si on regroupe l'horizon de l'argile tachetée et l'horizon blanchi du sommet de la lithomarge, les épaisseurs de cet ensemble argileux restent inférieures à celles du niveau 4 avec des valeurs comprises entre 5 et 12m. Mais sur les logs des sept sondages carottés du B.R.G.M. (VERNET *et al.*, 1988), l'horizon de l'argile tachetée et l'horizon blanchi supérieur de la lithomarge n'apparaissent pas en tant que tels, par contre il y a des zones presque purement argileuses décrites sous le terme d'argilite avec des couleurs allant du beige au lie de vin en passant par le brun et le verdâtre situées entre les horizons superficiels indurés (cuirasse et carapace) et les roches altérées de la lithomarge décrites sous les termes de schistes et de grès. Les épaisseurs de cette zone sont un peu supérieures à celles de l'ensemble "argile tachetée et horizon argileux blanchi" puisqu'elle varie de 8 à 18m (VERNET *et al.*, 1988). Finalement les épaisseurs de ces ensembles argileux se rapprochent de celles du niveau 4 pour les SE des vallées, mais elles restent nettement inférieures à celles de certains SE réalisés sur les plateaux. En se référant aux différents travaux antérieurs, seuls BOULANGE et CARN (1971) donnent des résistivités comprises entre 1000 $\Omega$ m et 3000 $\Omega$ m pour les argiles tachetées d'après quatre SE étalonnés, ainsi que la valeur de 2450 $\Omega$ m pour ce qu'ils appellent la zone argileuse indurée d'un SE non étalonné, qui est comprise entre la cuirasse ferrugineuse et la lithomarge argileuse. PERIC (1981) quant à lui fournit des valeurs allant de 600 $\Omega$ m à 1200 $\Omega$ m pour l'ensemble "carapace et argiles tachetées". Ces résultats confirment l'identification du niveau 4 en tant qu'argiles tachetées par leurs résistivités proches des 1100 $\Omega$ m, caractéristiques de ce niveau.

D'après la carte des isopaques (Annexe carte 18), l'épaisseur du niveau 4 est plus faible dans les vallées que sous les plateaux. C'est à proximité du talus, ou dans les parties amont des vallées, ou encore dans les vallées où le réseau hydrographique est le moins développé, comme les vallées ouest, que le niveau 4 est le plus épais, avec 12m au maximum. Ailleurs, il est souvent absent.

Sur le plateau de Banankoro, les épaisseurs sont presque toujours supérieures à 10m. Elles ne sont jamais nulles, sauf au niveau du layon L1 pour les stations voisines L1-1750S, L1-2075S, L1-2375S, 400E-1600S et L2-2300S. A l'Ouest, sur le secteur granitique, le niveau 4 apparaît nettement plus uniforme et moins épais qu'à l'Est sur le secteur schisteux où ce niveau forme un bourrelet plus épais, parallèle à l'allongement du plateau, qui s'étend depuis le layon L1 à l'Est jusqu'au layon L5 à l'Ouest. Sur cet axe, les épaisseurs dépassent souvent trente mètres, et elles atteignent même cinquante mètres sur les layons L1 et L2. On retrouve localement cet épaissement sur le plateau de la Dinkolé pour les stations L1-1000N et L3-900N. Ces zones d'épaisseurs très importantes sont jalonnées par les points topographiques les plus hauts, et suivent l'axe des fortes résistivités apparentes, individualisé sur les cartes d'iso-valeurs pour  $AB/2=20$ m à 100m (Annexe cartes 8 à 12). On remarque pour la station 400E-1600S, située entre les layons L1 et L2 à l'extrémité est de cet épaissement, que le niveau 4 est absent. Ceci peut s'expliquer par sa situation particulière (Annexe cartes 1 et 3), sur un axe de drainage provenant d'un cirque d'érosion qui a entaillé le bombement du plateau situé entre les layons L1 et L2. On retrouve sur le plateau deux autres stations analogues, L1-2075S et L2-2300S, c'est-à-dire des stations qui sont situées sur un axe de drainage, ou à proximité immédiate, et qui ne présentent pas de niveau 4. Donc le niveau 4 se développerait davantage à l'aplomb des sommets topographiques des plateaux, en particulier dans la partie est du secteur, sur roche-mère schisteuse.

## 2. Le niveau 5

Le niveau 5 est souvent placé sous le niveau 4, mais parfois aussi sous le niveau 3 ; pour de rares cas, et seulement dans les vallées, il se situe juste sous le niveau 1. Il est mis en évidence pour 82% des stations (Tableau 18). Sa résistivité varie peu autour de 650 $\Omega$ m, soit environ la moitié de celle du niveau 4 (Figure 104). Son épaisseur moyenne (16m) est proche de celle du niveau 4. Il correspond

logiquement à la lithomarge non saturée.

Sur la carte des isopaques (Annexe carte 19), les vallées présentent les plus faibles épaisseurs. Mais les variations sont un peu plus importantes que pour le niveau 4 : pour un certain nombre de stations ce niveau est absent, comme par exemple l'extrémité sud des layons L1 et L3, alors qu'ailleurs il dépasse les dix mètres d'épaisseur et atteint même 35m à la station L3-350S. Les plus fortes épaisseurs se trouvent à proximité des talus des plateaux et à une certaine distance des axes de drainage. Sous les plateaux, les épaisseurs sont encore plus variables que pour le niveau 4. Le niveau 5 peut être absent en certains endroits, comme par exemple pour les stations voisines L1-1000S, L1-1250S et L1-1500S, ou encore L3-1600S, L3-1850S et L3-2050S. Il peut aussi atteindre des valeurs maximales supérieures à 30m, comme pour les stations voisines L3-600S et L3-850S, ou encore pour les stations L4-1350S, L5-800S, L5-1100S et L6-100N. La partie ouest sur granite est plus uniforme que la partie est sur schiste, sauf pour les stations des layons L5 et L6. Les stations qui ont le niveau 5 le plus épais sur le plateau ne correspondent pas systématiquement avec celles qui ont le niveau 4 le plus épais. Il y a même des inversions très marquées surtout sur les schistes : l'axe d'épaississement du niveau 4 sur le plateau de Banankoro disparaît pour le niveau 5. Sur granite, le niveau 5 montre donc globalement la même distribution que le niveau 4, par contre sur schiste il est plus hétérogène, en particulier sous les plateaux.

### 3. Le niveau 6

Le niveau 6 est généralement situé sous le niveau 5, mais parfois aussi sous les niveaux 4, 3 ou 1. C'est le niveau le moins fréquent, il n'est mis en évidence que pour 29% des stations (Tableau 18). Sa résistivité moyenne est de 190 $\Omega$ m, avec un écart-type relativement élevé (Figure 104). Son épaisseur moyenne de 17m est proche de celle des niveaux 4 et 5, avec des variations relativement importantes.

Sur la carte des isopaques (Annexe carte 20), ce niveau apparaît sur trois zones distinctes du secteur schisteux. La première zone est située dans la vallée du Kokoyon où elle s'étend sur les layons L1, L2 et L3, et comprend dix-sept stations. Là, son épaisseur varie entre 5m et 40m, et elle est maximale pour deux stations situées juste en rebord de plateau : les stations L1-750N et L2-500S. La seule station de plateau qui appartient à cette zone est la station L2-800S du plateau de Banankoro.

La deuxième zone couvre la partie sud des layons L1, L2 et L3 ; elle s'étend à la fois sous le plateau de Banankoro et sous la vallée qui le longe au Sud. Les épaisseurs du niveau 6 sont comprises entre 5m et 49m ; cette épaisseur maximale est atteinte pour la station de vallée L2-3300S. Ici, les stations présentant ce niveau, sont plutôt situées en bordure du plateau que sous les vallées, avec neuf et six stations respectivement. Mais pour la majorité des stations de plateau, les épaisseurs de ce niveau sont moins importantes que celles des stations de vallées, et il est situé à plus grandes profondeurs, sous les niveaux 4 ou 5. Sur la carte, on remarque que cette zone est située au Sud-Est, juste en bordure de la plaine du Niger, et semble s'ouvrir vers elle.

La troisième zone se place à l'extrémité sud du layon L5, c'est la plus petite car elle ne contient que quatre stations. Deux d'entre elles sont situées sous le plateau à proximité de son rebord, les deux autres sont situées au pied du talus. Là, les épaisseurs du niveau 6 varient entre 10m et 30m. Sur la carte des isopaques, l'interpolation réunit les deuxième et troisième zones, mais il n'y a pas de station intermédiaire pour confirmer cette interprétation.

On note que la seule station du secteur granitique où ce niveau apparaît, la station 4500W-2000S, est proche de la limite entre les deux types de roche-mère. Elle a en plus la particularité d'être juste sur la berge du lit d'un marigot à sec.

Ce niveau se développe donc principalement sous les vallées du secteur sur roche-mère schisteuse. Il est toujours situé en bas du profil, juste au-dessus du niveau 7, avec des résistivités plus proches de ce niveau que celles des niveaux 4 et 5 : il pourrait donc caractériser les zones où la lithomarge non saturée présente des teneurs en eau plus élevées. Elle est donc appelée lithomarge non saturée "conductrice" pour la distinguer de la lithomarge non saturée "résistante" correspondant au niveau 5.

### 4. Le niveau 7

Le niveau 7 correspond au minimum de la courbe de résistivité apparente. Il est très souvent situé sous le niveau 5, ou sous le niveau 6 quand celui-ci existe, il se trouve parfois directement sous le niveau 4,

mais jamais directement sous les niveaux 3, 2 ou 1. Ce niveau est donc toujours relativement profond. Il est présent pour toutes les stations (Tableau 18). Mais pour onze d'entre elles, la remontée finale de la courbe n'a pas été atteinte, et dans ce cas l'épaisseur du niveau 7 n'a pu être déterminée. Il a les résistivités les plus faibles de l'ensemble des niveaux géoélectriques :  $23\Omega\text{m}$  en moyenne, et la dispersion des valeurs est relativement importante (Figure 104). Son épaisseur moyenne est de 37m.

Ses caractéristiques sont très proches de celles du conducteur identifié sur les sondages magnéto-telluriques (PHAM *et al.*, 1988). Les deux niveaux sont donc équivalents. Mais l'interprétation faite pour les SMT où ce niveau est identifié comme lithomarge kaolinique paraît trop simple à cause de la présence des niveaux 4, 5 et 6 sur les SE. Il ne correspondrait en fait qu'à la base saturée en eau de la lithomarge kaolinique d'après les données des forages et des travaux de BERNARDI et MOUTON (1981). C'est le niveau repère sur notre secteur, en raison de son omniprésence, de ses très faibles résistivités et de son épaisseur importante.

Sur la carte des isopaques (Annexe carte 21), son épaisseur apparaît relativement uniforme. Sur granite, ce niveau semble encore plus uniforme que sur schiste, ses épaisseurs sont alors comprises entre 30m et 45m. Seules quelques stations, sur les layons L5, L7 et L9, ont des épaisseurs supérieures à 45m. Par contre sur schiste, les épaisseurs sont plus souvent comprises entre 30m et 35m, elles sont même inférieures à 25m pour cinq stations situées sur les layons L0 et L1. Mais les épaisseurs du niveau 7 n'ont pu être déterminées sur les onze SE qui n'atteignent pas la roche-mère sur schiste. Sur ces profils d'altération très profonds, la lithomarge saturée dépasse vraisemblablement 40m d'épaisseur.

En dépit de ces quelques hétérogénéités locales, il semble donc que l'épaisseur de la nappe phréatique à la base de la lithomarge soit relativement uniforme. Mais il convient de faire la remarque suivante : l'interprétation des SMT a été faite en fixant l'épaisseur de ce niveau à 40m (PHAM, communication orale). Cette démarche a été choisie à cause du principe d'équivalence car elle facilitait la recherche de solutions pour le modèle tabulaire : avec cette épaisseur, les résistivités correspondantes restaient très faibles d'une station à l'autre. Il n'y a pas eu de problème majeur à reprendre cette épaisseur, même si elle a été ensuite ajustée pour mieux tenir compte des courbes des résistivités apparentes mesurées pour chaque SE.

## 5. Le niveau 8

Le niveau 8 est toujours caractérisé par l'extrémité finale remontante de la courbe de résistivité apparente, observée pour les plus grands AB/2. Il est mis en évidence pour toutes les stations, sauf pour les onze qui ne présentent pas cette remontée finale. La résistivité moyenne de ce niveau est de  $430\Omega\text{m}$ , et la dispersion des valeurs est très importante (Tableau 18 et figure 104). Son épaisseur ne peut pas être déterminée par SE puisque c'est le dernier niveau atteint.

D'après les SMT, et les autres travaux de SE sur les profils d'altération, ce niveau correspond à la roche-mère plus ou moins saine, ou fissurée. En général, les courbes de SE, dont le demi-écartement AB/2 est limité au maximum entre 300 et 500m pour des raisons de gain de temps, ne permettent pas de définir avec précision la résistivité exacte de la roche-mère, puisque seule l'amorce de la remontée finale apparaît sur ces courbes. Pour entreprendre des investigations à partir de ces profondeurs, il est plus simple de faire appel aux méthodes électro-magnétiques comme par exemple le sondage magnéto-tellurique qui complète alors avantageusement les SE.

## 6. Conclusion

L'interprétation des 127 SE de Banankoro fournit un plus grand nombre de niveaux géoélectriques superposés que ceux observés jusqu'ici et cités dans les publications sur les latérites. Ce sont successivement : la formation meuble de recouvrement, la cuirasse, la carapace, les argiles tachetées, la lithomarge supérieure et inférieure non saturée, la lithomarge saturée et la roche-mère. Ces huit niveaux ont des résistivités bien distinctes, sauf les deux niveaux les plus superficiels, c'est-à-dire la formation de recouvrement et la cuirasse, dont les intervalles de résistivité se recouvrent en partie (Figure 104). Les trois premiers niveaux ont des épaisseurs moyennes métriques, celles des niveaux plus profonds sont décamétriques. Ces épaisseurs sont très variables, sauf celle de la lithomarge saturée (niveau 7) qui est proche de 40m (Figure 104).

Le nombre important de niveaux géoélectriques mis en évidence à Banankoro est sans doute dû à la très grande épaisseur du profil d'altération, ce qui permet à chaque niveau d'avoir une épaisseur suffisante pour être individualisé sur les courbes de SE. De plus, le niveau de base de la nappe phréatique est profond au moment des mesures, au moins 15 à 20m sous les vallées, ce qui permet certainement aux différents horizons de la zone non saturée, comme les niveaux 4, 5 et 6, d'apparaître sur les courbes. Alors que les profils décrits dans les travaux antérieurs, quand ils sont donnés en entier, ne dépassent pas les trente mètres d'épaisseur, et il n'y a alors que trois ou quatre niveaux géoélectriques qui apparaissent.

### **C. Discussion : morphodépendance et lithodépendance des niveaux géoélectriques**

Les variations d'organisation des profils latéritiques à l'échelle du paysage, en fonction de la morphologie et la roche-mère, sont discutées en considérant d'abord les variations d'épaisseur de chaque niveau individuellement, puis leur superposition dans les différentes séquences de profil géoélectrique.

#### **1. Epaisseurs des niveaux géoélectriques**

Les cartes d'isopaques (Annexe cartes 15 à 21), les calculs statistiques (Tableau 20 et figure 105) et les courbes de distribution (Figure 106) montrent que les huit niveaux des SE présentent des répartitions et des épaisseurs plus ou moins contrastées, lorsque l'on passe des plateaux aux vallées, ou bien du secteur schisteux au secteur granitique.

##### **a. Morphodépendance**

La morphodépendance du profil d'altération est très nette sur les deux types de roche-mère : elle se manifeste principalement pour les niveaux intermédiaires compris entre la cuirasse (niveau 2) et la lithomarge saturée (niveau 7). Le contraste le plus important apparaît pour le niveau 4 assimilé aux argiles tachetées, dont l'épaisseur est en moyenne quatre fois plus forte sous les plateaux par rapport aux vallées (Tableau 20 et figures 105a et 105b). Ce niveau est plus fréquent sous les plateaux que sous les vallées (Figure 106-4).

Le contraste est également très net pour les deux niveaux voisins : la carapace (niveau 3) et la lithomarge non saturée (niveau 5) sont en moyenne deux fois plus épais sur les profils des plateaux que sur ceux des vallées (Tableau 20 et figures 105a et 105b). De plus la carapace est presque toujours présente sous les plateaux, alors que sous les vallées elle est absente pour un tiers des stations (Figure 106-3).

Au sommet du profil, la cuirasse (niveau 2) présente une extension beaucoup plus large sur les plateaux que dans les vallées (Figure 106-2). En revanche, la formation meuble de recouvrement (niveau 1) est plus développée dans les vallées (Figure 106-1). Cependant cette couverture est plus épaisse sur les plateaux du secteur granitique, probablement en raison d'une plus grande irrégularité du relief facilitant le piégeage et l'accumulation des dépôts dans les dépressions topographiques.

A la base du profil, l'épaisseur de la lithomarge est assez uniforme (Tableau 20 et figures 105a, 105b et 106-7). La lithomarge non saturée "conductrice" (niveau 6), qui n'existe que sur le secteur schisteux, est un plus fréquente et plus épaisse sous les vallées que sous les plateaux (Figure 106-6).

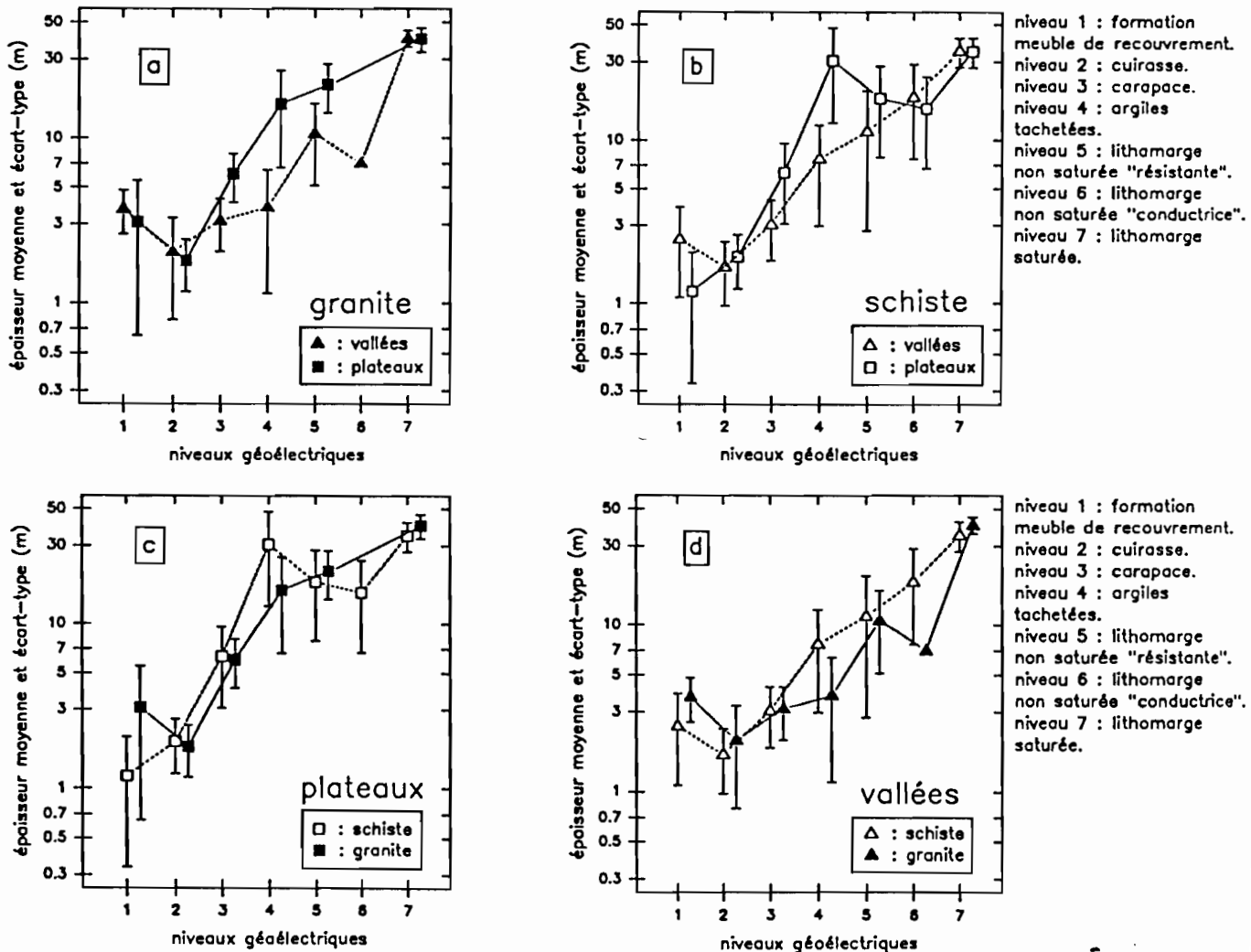
Ainsi globalement, en raison de l'épaississement considérable des horizons argileux compris entre la cuirasse et la lithomarge saturée, les profils d'altération sont nettement plus profonds sous les plateaux que sous les vallées.

Tableau 20 : Epaisseurs moyennes des niveaux géoélectriques sous les vallées et sous les plateaux, en distinguant le secteur sur granite et celui sur schiste.

niveau géoélectr.	1	2	3	4	5	6	7
<b>vallées</b>							
granite							
épaisseur (m)	3.7	2.0	3.1	3.8	11	7.0	40
écart-type (m)	1.1	1.2	1.1	2.6	5.5	--	4.5
effectif	6	6	7	9	12	1	13
schiste							
épaisseur (m)	2.5	1.7	3.1	7.7	11	18	35
écart-type (m)	1.4	0.7	1.2	4.7	8.6	11	7.0
effectif	28	21	28	20	36	24	45
<b>plateaux</b>							
granite							
épaisseur (m)	3.1	1.8	6.0	16	21	--	40
écart-type (m)	2.4	0.6	2.0	9.5	6.9	--	6.5
effectif	10	18	24	24	25	0	25
schiste							
épaisseur (m)	1.2	1.9	6.3	31	18	16	35
écart-type (m)	0.9	0.7	3.3	18	10	8.8	7.0
effectif	12	40	42	37	31	12	33

nombre total sur granite de stations de vallée : 13 ; de plateau : 25  
 nombre total sur schiste de stations de vallée : 46 ; de plateau : 43  
 1 : formation meuble de recouvrement    2 : cuirasse    3 : carapace    4 : argiles tachetées  
 5 : lithomarge non saturée "résistante"    6 : lithomarge non saturée "conductrice"    7 : lithomarge saturée

Figure 105 : Epaisseurs moyennes et écarts-types des niveaux géoélectriques en distinguant les profils de vallée et de plateau, sur les deux types de roche-mère, granite et schiste.



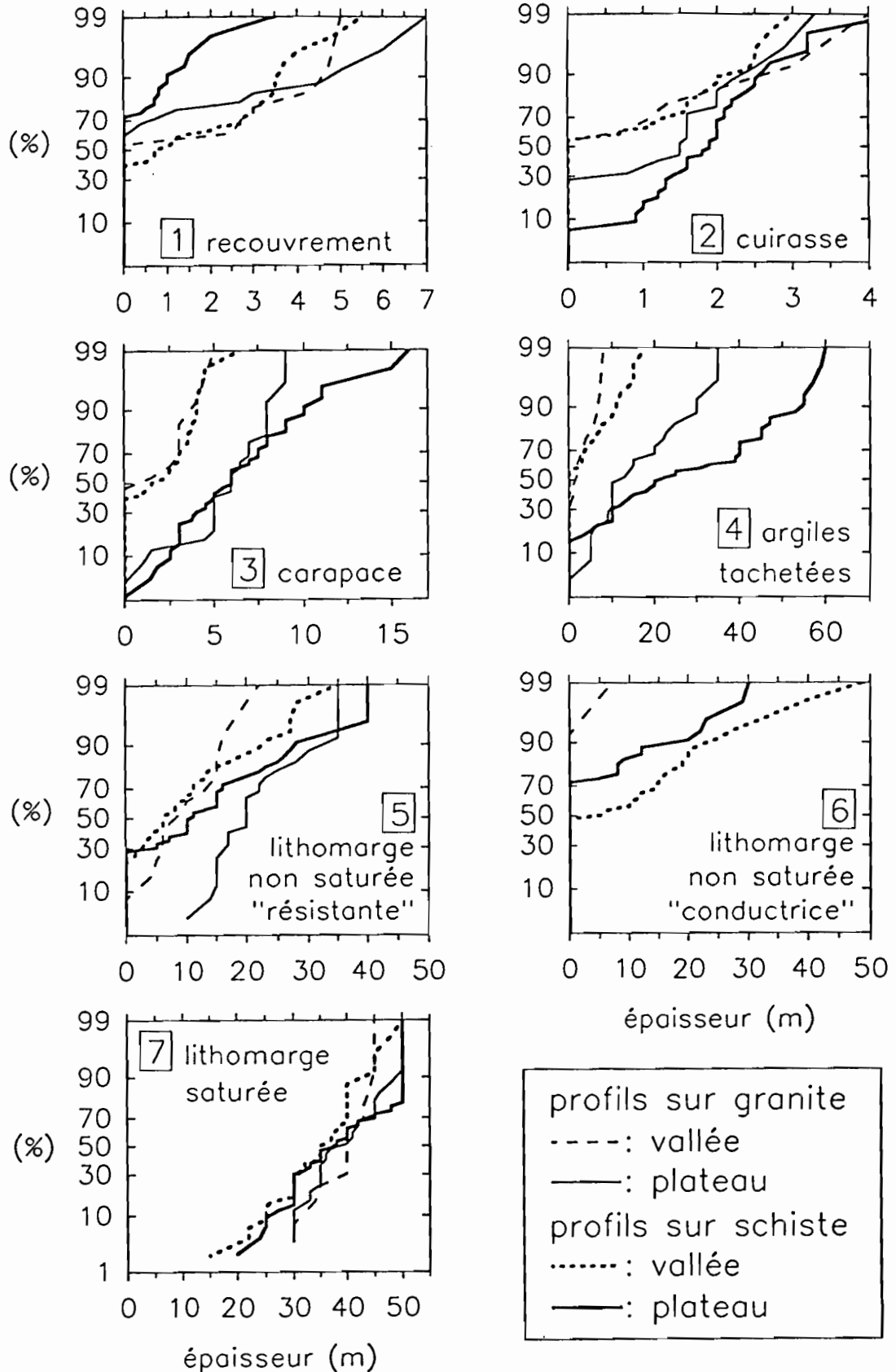


Figure 106 : Distribution des épaisseurs des niveaux géoélectriques en distinguant les profils de vallée et de plateau, sur les deux types de roche-mère.



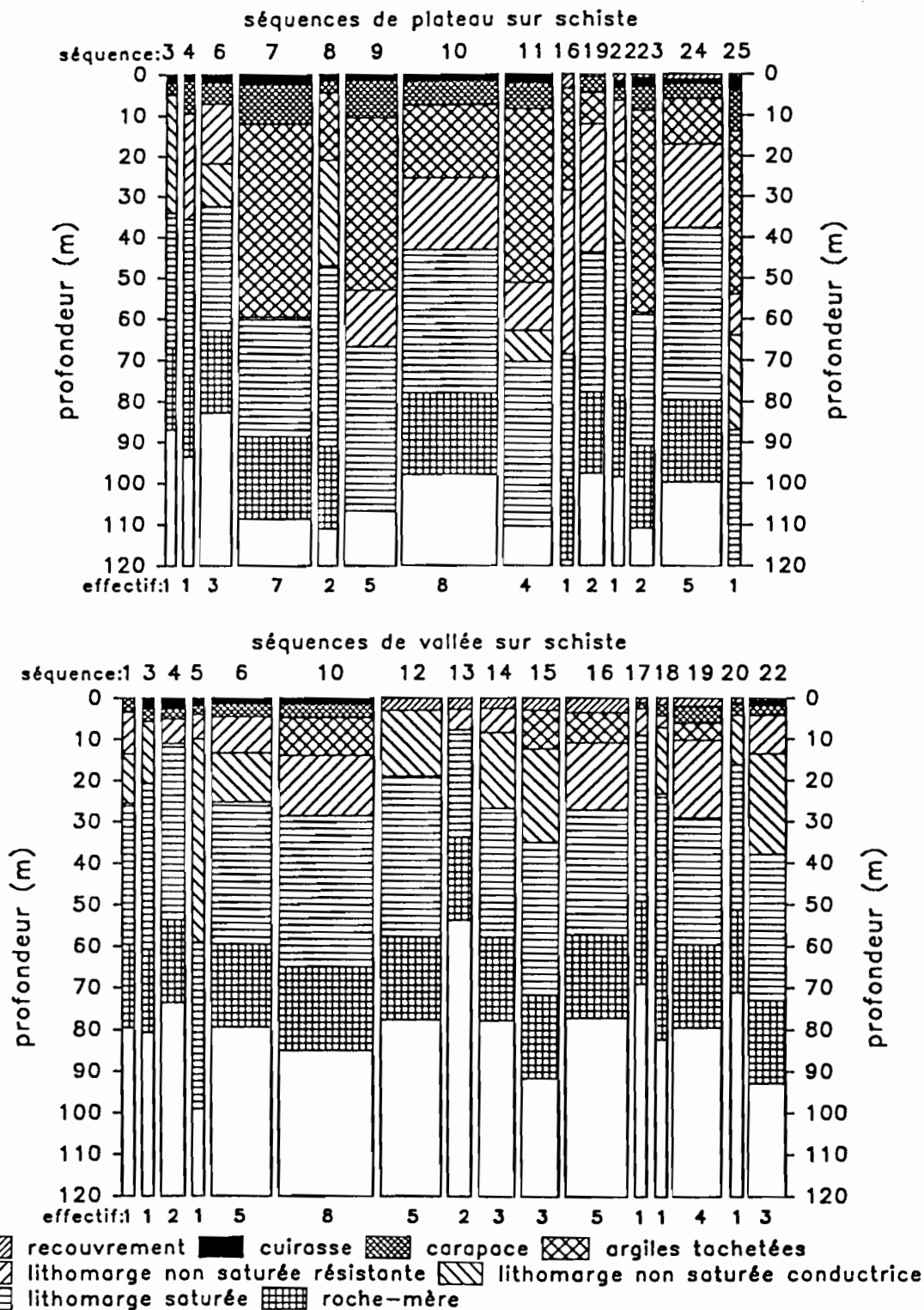
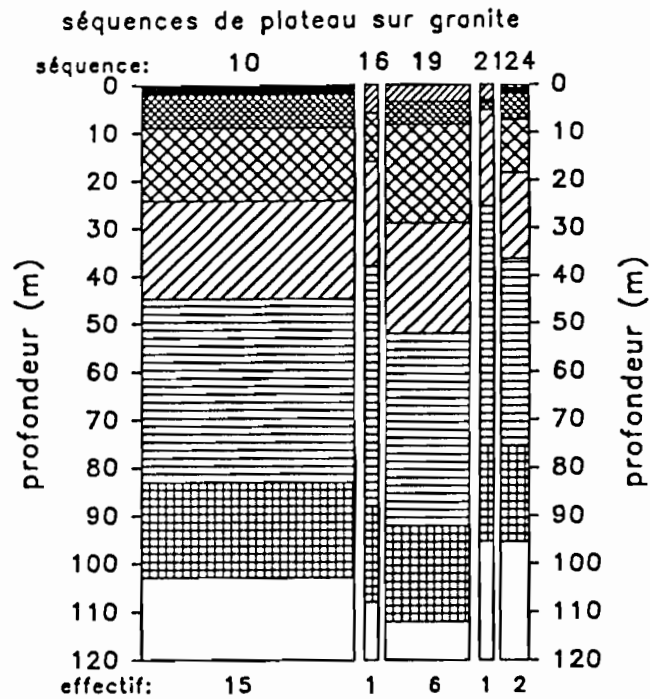
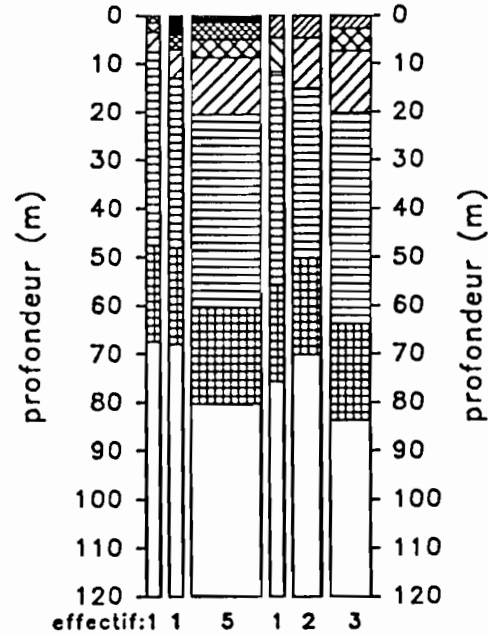


Figure 107 : Séquences géoélectriques des profils latéritiques de plateau et de vallée, sur le secteur schisteux.



séquences de vallée sur granite

séquence: 2 4 10 12 13 16



- recouvrement
- cuirasse
- carapace
- argiles tachetées
- lithomarge non saturée résistante
- lithomarge non saturée conductrice
- lithomarge saturée
- roche-mère

Figure 108 : Séquences géoélectriques des profils latéritiques de plateau et de vallée, sur le secteur granitique.



## b. Lithodépendance

La lithodépendance des niveaux géoélectriques est peu marquée (Tableau 20 et figure 106) ; elle apparaît un peu plus nettement pour les profils de plateau que pour ceux de vallée, où l'on observe pratiquement pas de différence suivant le type de roche-mère, sauf pour le niveau 6 qui n'est présent que sous les vallées et les plateaux du secteur schisteux.

C'est encore pour l'épaisseur des argiles tachetées (niveau 4) que le contraste entre schiste et granite est le plus fort (Figures 105c et 105d). Ce niveau dépasse souvent 40m sur le secteur schisteux, alors qu'il n'atteint jamais plus de 35m sur le secteur granitique (Figure 106-4). En revanche, il est plus souvent absent sur schiste que sur granite. Ceci traduit en fait une plus forte hétérogénéité des profils sur secteur schisteux par rapport au secteur granitique.

La carapace (niveau 3) présente également de très fortes épaisseurs (> 10m) pour quelques SE de plateau sur le secteur schisteux (Figure 106-3).

La lithomarge non saturée "résistante" (niveau 5) présente plus fréquemment des épaisseurs nulles ou faibles (< 10m) sous les plateaux du secteur schisteux (Figure 106-5). Le niveau 6, le plus conducteur de la lithomarge non saturée, n'est présent que sur schiste et pas sur granite, à une exception près (Figure 106-6).

Au sommet des profils de plateau, la cuirasse est à peine plus épaisse sur schiste que sur granite (Figure 106-2). En revanche, l'horizon meuble de recouvrement (niveau 1) paraît nettement plus développé sur les plateaux du secteur granitique, avec des épaisseurs qui dépassent souvent 4m comme dans les vallées. (Figure 106-1).

A la base du profil, la lithomarge saturée semble relativement uniforme et ne présente pas de différenciation suivant la nature de la roche-mère ou la morphologie (Figure 106-7).

En conclusion, les vallées se distinguent des plateaux principalement par de plus faibles épaisseurs pour la carapace, les argiles tachetées et le niveau 5 de la lithomarge non saturée ; tandis que le secteur granitique se différencie du secteur schisteux surtout par des argiles tachetées moins épaisses et par l'absence totale du niveau 6 de la lithomarge non saturée à une exception près. Il y a donc d'un point de vue géoélectrique plusieurs types de profil d'altération latéritique à Banankoro, qui se différencient essentiellement par les caractéristiques des horizons argileux de la zone non saturée, en fonction de leur position morphologique et de la nature de la roche-mère. Mais la morphodépendance des niveaux géoélectriques est très nette, alors que leur lithodépendance apparaît beaucoup plus discrète.

## 2. Les séquences géoélectriques

Afin d'examiner les différents types d'organisation des profils géoélectriques, on peut considérer les séquences verticales plus ou moins complètes des niveaux qui se superposent toujours dans le même ordre. La lithomarge saturée et la roche-mère sont toujours présentes à la base du profil d'altération, mais on a distingué les séquences où la roche-mère était effectivement atteinte par les SE, et celles où elle ne l'était pas.

On a donc 128 combinaisons possibles pour les sept niveaux géoélectriques, mais seulement 25 séquences différentes ont été effectivement observées sur la zone d'étude. Elles ont été rangées dans l'ordre allant du profil le moins complet vers le profil le plus complet, en faisant un test sur la présence des niveaux successifs à partir du haut. Elles sont représentées sur les figures 107 et 108 avec l'épaisseur moyenne des niveaux qui les composent et une largeur proportionnelle à leur effectif, en distinguant les deux unités morphologiques, vallée et plateau, pour chaque roche-mère, schiste et granite. Dans la discussion, nous examinons d'abord les profils les plus complets coiffés d'une cuirasse ferrugineuse affleurante (séquences 3 à 11) et tantôt surmontée d'un horizon de recouvrement (séquences 21 à 25), puis on considérera les profils non cuirassés, sans recouvrement (séquences 1 à 2) et avec recouvrement (séquences 12 à 20).

### a. Les séquences des profils cuirassés

La séquence 10 est la plus commune sur l'ensemble des SE, et elle est observée pour les quatre types d'environnement morpho-lithologique. Elle correspond à des profils complets avec une cuirasse affleurante et où la lithomarge non-saturée est du type "résistant" (niveau 5).

i) Sur roche-mère granitique, tous les profils de plateau où la cuirasse affleure sont de ce type. Un profil équivalent existe lorsqu'un horizon meuble superficiel recouvre la cuirasse, il correspond à la séquence 24, mais celle-ci est plus rare et existe uniquement pour les profils de plateau.

ii) Sur le secteur schisteux, les profils géoélectriques sont nettement plus diversifiés et on retrouve plusieurs types de séquence légèrement différents :

- Sur le plateau, la séquence 9 est identique à la séquence 10, mais les profils sont trop profonds pour que la roche-mère soit atteinte par les SE.

- Sur d'autres profils de plateau, le niveau des argiles tachetées descend jusqu'à la nappe phréatique et on ne distingue pas la lithomarge non saturée ; ce type de profil correspond aux séquences 7 ou 23, suivant la présence ou non de recouvrement sur la cuirasse.

- Au contraire, d'autres profils de plateau sur schiste présentent deux niveaux de résistivité différente au sein de la lithomarge non saturée (niveaux 5 et 6). Ce sont les profils les plus complets et les plus profonds. Ils correspondent aux séquences 11, lorsque la cuirasse affleure, et 25, lorsqu'elle est recouverte par un sol meuble.

- D'autres profils cuirassés correspondant aux séquences 6 et 22, présentent également les deux types de lithomarge non saturée, résistant (niveau 5) et conducteur (niveau 6), mais le niveau des argiles tachetées au-dessus est absent. Ces deux séquences, 6 et 22, distinguées par la présence ou non d'une formation de recouvrement au-dessus de la cuirasse, ne sont observées que sur le secteur schisteux et plus fréquemment dans les vallées que sur les plateaux.

- Les séquences cuirassées sans argiles tachetées et avec un seul niveau de lithomarge non saturée, 5 ou 6, existent également (séquences 3, 4 et 20), mais elles sont nettement plus rares que les séquences précédentes, 6 et 22, avec deux niveaux de lithomarge non saturée.

### b. Les séquences des profils non cuirassés

La plupart des profils sans cuirasse bien individualisée, présentent une formation de recouvrement relativement épaisse (2 à 4m environ), sauf pour deux SE de vallée où la carapace affleure en surface (séquences 1 sur schiste et 2 sur granite). Ce type de profil est moins fréquent sous les plateaux que dans les vallées, et encore moins sur les plateaux du secteur schisteux que sur ceux du secteur granitique.

On peut distinguer trois types de séquence suivant la nature de l'horizon (carapace, argiles tachetées, lithomarge) identifié sous la couverture superficielle.

i) La séquence 19 est le type principal des profils non cuirassés où l'horizon de recouvrement repose sur la carapace. Elle s'observe surtout sous les plateaux du secteur granitique et dans les vallées du secteur schisteux.

ii) Pour les séquences 15 et 16, qui diffèrent par le niveau conducteur (6) ou résistant (5) de la lithomarge non saturée, l'horizon de recouvrement repose directement sur les argiles tachetées. Ce type de profil est plus fréquent dans les vallées que sous les plateaux.

iii) Pour les séquences 12, 13 et 14, qui diffèrent également par les niveaux de la lithomarge non saturée, l'horizon de recouvrement repose directement sur la lithomarge. Ce type de profil s'observe uniquement dans les vallées et jamais sous les plateaux.

Finalement, on constate la même tendance pour les plateaux et les vallées : les profils cuirassés ne présentent généralement pas de recouvrement, tandis que les profils qui présentent un recouvrement épais ne sont pas cuirassés.

De plus dans les vallées, la troncature du profil d'altération descend plus profondément que sur les plateaux, puisque le recouvrement repose souvent directement sur les niveaux argileux non indurés des argiles tachetées et de la lithomarge.

Ces observations montrent que la formation meuble de recouvrement s'enfonce dans le profil d'altération par dégradation et érosion des niveaux ferrugineux superficiels, et qu'elle s'épaissit en descendant plus profondément dans les profils de vallées que dans ceux des plateaux.

### III. LES COUPES GEOELECTRIQUES SUR LE SECTEUR GRANITIQUE

On peut visualiser très simplement l'organisation des niveaux géoélectriques à l'échelle du paysage en les représentant sur des coupes verticales. Ainsi les dix layons permettent de réaliser des coupes parallèles qui traversent le plateau de Banankoro et les vallées adjacentes. Les layons ont été implantés régulièrement d'Est en Ouest, indépendamment de la nature du substratum qui n'était pas connue au début de ce travail.

D'après les résultats des SMT (PHAM *et al.*, 1989), les layons L0, L1, L2 et L3 à l'Est sont entièrement situés sur schiste, les layons L8 et L9 à l'Ouest sont entièrement situés sur granite, tandis que les layons L4, L5, L6 et L7 ont des stations sur les deux types de roche-mère. Nous décrirons successivement les coupes géoélectriques obtenues sur chaque unité lithologique, granite et schiste, en commençant par un layon caractéristique sur chaque secteur. C'est le layon L6 qui convient le mieux pour décrire les profils d'altération sur roche-mère granitique, car c'est celui qui présente le plus grand nombre de stations sur cette unité lithologique.

#### A. La coupe géoélectrique du layon L6

Sur les onze stations du layon L6, neuf sont sur granite et deux, plus au sud, sont sur schiste (Figure 109 et annexe figure 7). Cette coupe est plus représentative des profils de plateau que des profils de vallée, car il n'y a que trois stations dans les vallées : les stations L6-1100S et L6-650S sont situées dans la vallée de Guilingoué, la station L6-1000N se place dans la vallée du Kokoyon. Les huit autres stations sont toutes sur le plateau de Banankoro.

##### 1. Les stations du plateau

On remarque (Annexe figure 7) que le niveau 1 (formation meuble de recouvrement) n'est mis en évidence sur aucune des huit stations du plateau, soit parce qu'il est effectivement absent, soit parce qu'il est très mince (<30cm) et a été simplement enlevé pour faciliter les contacts électrodes-cuirasse. Le niveau 6 est lui aussi totalement absent sur cette coupe.

Les niveaux ferrugineux indurés, cuirasse et carapace, sont présents sur toutes les stations, avec des épaisseurs relativement constantes. La carapace est nettement plus épaisse que la cuirasse (respectivement 7m et 1,8m en moyenne). Le niveau 4, correspondant aux argiles tachetées et à la partie sommitale argileuse de la lithomarge, est aussi présent sur toutes les stations. Son épaisseur (17m en moyenne) est nettement plus importante que celle de la carapace, en particulier juste au Nord et au Sud de la vallée de Guilingoué.

Le niveau 5 de la lithomarge non saturée est aussi présent sur toutes les stations. Son épaisseur est variable, de 10 à 35m, et paraît augmenter sous la partie nord du plateau des points topographiques bas vers les points topographiques hauts. Le niveau 7, correspondant à la lithomarge saturée présente une épaisseur presque constante (39m) pour toutes les stations.

## 2. Les stations des vallées

Dans la vallée de Guilingoué, les deux SE montrent des profils presque identiques. Ils commencent par une formation meuble de recouvrement (niveau 1) de 3m d'épaisseur. La cuirasse (niveau 2) et la carapace (niveau 3) sont absentes. Les argiles tachetées (niveau 4) ont 6 à 7m d'épaisseur. La lithomarge non saturée (niveau 5) est plus épaisse pour la station L6-650S (22m) que pour la station L6-1100S (7m). La lithomarge saturée dépasse, dans les deux cas, 40m d'épaisseur.

Le SE L6-1000N de la vallée du Kokoyon, qui se situe juste sur le talus à quelques mètres de dénivelée sous le rebord du plateau, est légèrement différent. A cet endroit, la formation de recouvrement est essentiellement constituée par des gravillons ferrugineux issus du démantèlement de la cuirasse du plateau. En-dessous, se développe une carapace (niveau 3) de 3m d'épaisseur.

Le niveau des argiles tachetées est nettement moins épais (3m) que pour les deux stations de la vallée de Guilingoué. La lithomarge non saturée est aussi peu épaisse que pour la station L6-1100S de la vallée de Guilingoué (5m), mais l'épaisseur de la lithomarge saturée est identique (40m).

## 3. Discussion à propos de la coupe L6

En considérant séparément le plateau et les vallées adjacentes, les différents niveaux présentent des caractéristiques relativement constantes. Les profils d'altération sur le secteur granitique apparaissent assez uniformes.

Le point le plus remarquable sur cette coupe, se situe à la limite du plateau de Banankoro et de la vallée de Guilingoué. La cuirasse et la carapace sont entièrement recoupées au niveau du talus, ainsi que le niveau 4 des argiles tachetées pour une grande partie de son épaisseur. Tandis que l'épaisseur du niveau 5 diminue avec une légère remontée du toit de la lithomarge saturée (niveau 7).

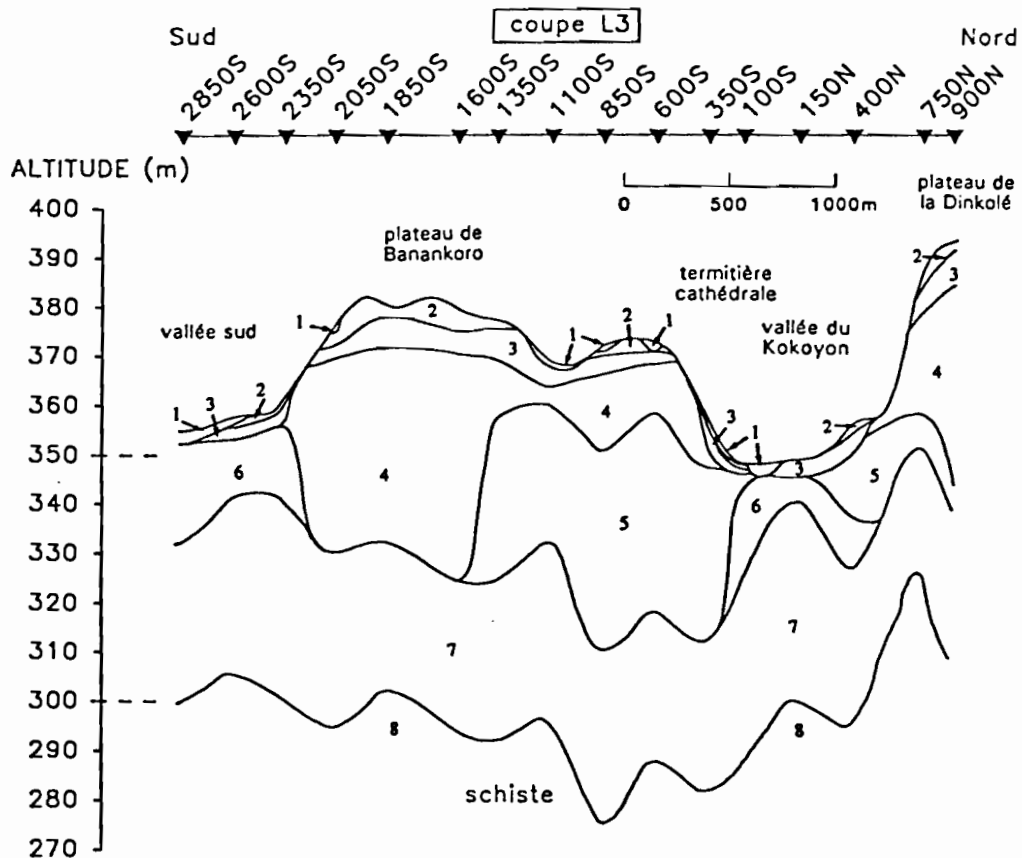
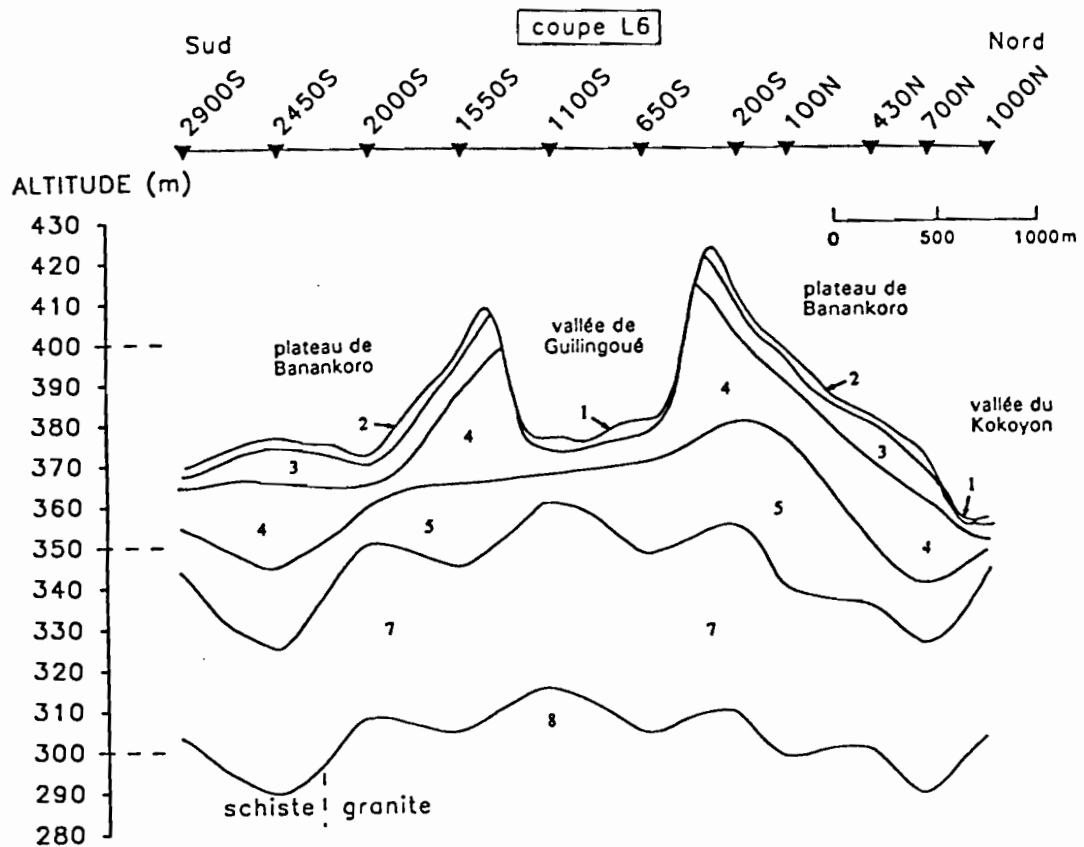
La vallée de Guilingoué forme à cet endroit un cirque d'érosion, qui entaille le plateau au centre d'un bombement de la surface topographique. De part et d'autre de la vallée, la dénivelée du talus est très importante, plus de 30m, avec une pente moyenne forte, plus de 10%. Le niveau 4 semble s'épaissir considérablement (30m) sous les rebords du plateau autour de cette vallée : il pourrait descendre ici en-dessous de l'horizon des argiles tachetées et correspondre aussi ici la partie sommitale moins humide de la lithomarge non saturée. Cette diminution de la teneur en eau de la lithomarge non saturée à proximité du talus s'expliquerait par un meilleur drainage et une forte évapotranspiration au niveau du l'entaille abrupte, non cuirassée et très boisée. Cet épaississement du niveau 4 est compensé par l'amincissement du niveau 5. Par contre l'épaisseur de la lithomarge saturée ne semble pas affectée.

Il en va différemment de la vallée du Kokoyon. Les altitudes du plateau baissent régulièrement vers cette vallée, si bien que le talus est peu marqué. La forte diminution de l'épaisseur de la zone non saturée, formée par les niveaux 4 et 5, est compensée par la remontée de la lithomarge saturée.

On remarque que la lithomarge saturée est toujours profonde. En effet, à l'époque des mesures effectuées entre janvier et mars, toutes les sources sont tarées, et les marigots sont à sec. Les dernières précipitations datent en effet de la fin de la saison des pluies qui se termine au mois d'octobre.

Sur cette coupe, le relief du toit de la roche-mère suit d'une façon très atténuée la morphologie du plateau, en faisant abstraction de la partie centrale correspondant à la vallée de Guilingoué : on imagine facilement un sommet dans le prolongement de la surface topographique reliant les deux bords du plateau de part et d'autre de la vallée (Figure 109). Le creusement de cette vallée provoque localement une inversion de relief.

Les deux stations qui sont situées sur schiste à l'extrémité sud du plateau ne présentent pas de différence majeure par rapport aux autres stations de plateau. Toutefois, l'avant dernier SE, L6-2450S, situé sur une zone basse correspondant à un replat légèrement bombé du plateau, montre un épaississement de la zone argileuse non saturée (niveaux 4 et 5) par rapport aux deux SE qui l'encadrent, L6-2900S et L6-2000S. La station L6-2900S se situe à proximité du rebord sud du plateau, et la station L6-2000S se trouve dans une légère dépression topographique qui débouche vers l'Ouest sur une entaille, en tête de marigot, au niveau de la station L5-2300S. Pour ces deux SE, comme pour ceux situés dans la vallée de Guilingoué et du Kokoyon, l'amincissement de la zone argileuse non saturée résulte à la fois de l'abaissement de la surface topographique et de la remontée de la nappe phréatique à la base de la lithomarge. Si bien que le toit de la lithomarge saturée et de la roche-mère épousent à l'échelle du plateau la morphologie du relief, mais présentent dans le détail des bosses correspondant au reflet inverse des vallées et des dépressions de la surface topographique.



- 1: formation meuble de recouvrement    2: cuirasse    3: carapace  
 4: argiles tachetées    5: lithomarge non saturée résistante    6: lithomarge non saturée conductrice  
 7: lithomarge saturée    8: roche-mère

*Figure 109 : Deux exemples de coupe géoélectrique : le layon L6 caractéristique du secteur granitique et le layon L3 situé sur le secteur schisteux.*

## B. Les autres coupes géoélectriques situées sur granite

Les autres coupes géoélectriques (layons L4, L5, L7, L8 et L9) situées soit en partie, soit entièrement sur granite, sont représentées en annexe sur les figures 5, 6, 8, 9 et 10. Les layons L4 et L5 n'ont respectivement que quatre et six stations sur le secteur granitique, mais ces stations sont voisines et séparées par une distance de 250m à 300m. Par contre les layons L7, L8 et L9 ont un nombre restreint de stations, distantes les unes des autres de 700m. Ces stations sont toutes sur granite, sauf la dernière station sud du layon L7, qui est située sur schiste.

### 1. Les coupes géoélectriques L7, L8 et L9 à l'Ouest de la coupe L6

Ces coupes ne sont pas suffisamment détaillées pour montrer les variations locales du profil d'altération, mais elles permettent de suivre les tendances plus régulières à l'échelle du paysage.

#### La coupe géoélectrique L7

La coupe L7 (Annexe figure 8) présente des caractéristiques proches de la coupe L6 décrite précédemment. Dans la partie centrale, le plateau de Banankoro et celui plus au Sud, appelé plateau ouest, forment la base d'un dôme largement éventré par la vallée de Guilingoué. Ici l'entaille recoupe complètement le niveau 4 des argiles tachetées et atteint le niveau 5, plus conducteur, correspondant à la lithomarge non saturée. Aucun niveau ferrugineux induré, cuirasse ou carapace, n'a été mis en évidence dans cette vallée, dont le fond plat est recouvert par des sols argilo-silteux relativement épais. Comme sur la coupe L6, l'élévation de la surface topographique vers le centre du plateau entaillé par la vallée de Guilingoué, s'accompagne d'une remontée du toit de la lithomarge saturée et de la roche-mère.

#### La coupe géoélectrique L8

Sur la coupe L8 (Annexe figure 9), le relief du plateau qui culmine à 420m, présente une forme dissymétrique avec un versant sud relativement abrupt et un versant nord qui descend en pente douce vers la vallée du Kokoyon. C'est sur le versant nord que la cuirasse est la plus épaisse, peut-être parce que la pente est plus faible et que l'érosion est moins intense. En profondeur, sous la cuirasse, les épaisseurs des niveaux géoélectriques varient peu d'une station à l'autre et leurs limites épousent la silhouette topographique de cet interfluve. Sur les deux SE de vallée, au Sud et au Nord, les niveaux ferrugineux indurés, cuirasse et carapace, disparaissent, et le recouvrement meuble argilo-silteux repose directement sur la lithomarge non saturée (niveau 5).

#### La coupe géoélectrique L9

La coupe L9 (Annexe figure 10), la plus à l'Est du secteur, passe par le mont Koro Nidjan (470m) qui correspond au relief le plus élevé du plateau. Sur cette coupe, l'épaisseur de la lithomarge saturée et non saturée (niveaux 7 et 5) est à peu près constante. Les limites de ces horizons présentent une forme bombée, qui suit de façon très atténuée la morphologie de la surface. En revanche, à la différence de ce que montre la coupe L8, le niveau des argiles tachetées (niveau 4) s'épaissit fortement sous le relief le plus élevé. Il manque toutefois une station sur le sommet lui-même, entre les SE L9-3400N et L9-2900N, pour mesurer l'épaississement des niveaux superficiels, cuirasse, carapace et argiles tachetées, à cet endroit.

### 2. Les coupes géoélectriques L4 et L5 à l'Est de la coupe L6

Seules les parties nord des coupes L4 et L5 sont situées sur granite, elles correspondent au plateau de Banankoro et à la vallée du Kokoyon.

#### La coupe géoélectrique L5

Sur la coupe L5 (Annexe figure 6), six stations sont implantées sur le secteur granitique au Nord et sept stations sont implantées sur le secteur schisteux au Sud. Suivant la morphologie, les stations sur granite



occupent le versant nord du plateau de Banankoro et la crête qui longe le rebord ouest, à l'amont de la vallée de Guilingoué (Annexe carte 1). La zone sur schiste correspond au versant sud du plateau, prolongé par un replat cuirassé en bas de pente.

Sur cette coupe, les niveaux ferrugineux indurés, cuirasse et carapace (niveaux 2 et 3), s'étendent d'une façon régulière et continue sur l'ensemble du plateau, sauf à quelques endroits où la cuirasse est décapée par l'érosion. C'est le cas notamment près du rebord ouest au sommet du plateau et en bas de versant vers le Nord. Les limites des niveaux 5 et 7 de la lithomarge non saturée et saturée apparaissent ici plus irrégulières que sur les coupes précédentes, et sans relation évidente avec la morphologie de la surface. On note cependant un épaissement du niveau 4 sous le plateau, avec un pincement en bordure sous les versants, lié en partie à une remontée des niveaux 5 et 7 de la lithomarge.

Il n'apparaît pas de différenciation très nette entre les parties nord et sud de la coupe, en relation avec la nature de la roche-mère. Le contraste principal correspond au passage latéral du niveau 5 au niveau 6, plus conducteur, sous le replat au Sud du plateau, en secteur schisteux.

#### La coupe géoélectrique L4

Sur la coupe L4 (Annexe figure 5), le secteur granitique est représenté au Nord par quatre SE implantés dans la vallée du Kokoyon et sur le rebord sud du plateau de la Dinkolé. Dans ce secteur, on remarque que les argiles tachetées (niveau 4) s'amincissent et disparaissent, lorsque l'on passe du plateau à la vallée. Le glacis qui s'étend au pied du talus dans la vallée du Kokoyon est armé d'une cuirasse et d'une carapace (niveaux 2 et 3).

#### C. Conclusion

Il existe donc sur le secteur granitique deux principaux types de profil latéritique : celui des plateaux et celui des vallées, avec deux différences majeures :

- Le cuirassement (cuirasse et carapace) est pratiquement absent dans les vallées, sauf dans celle du Kokoyon, alors qu'il est épais et continu sur les plateaux.

- les argiles tachetées et la lithomarge non saturée sont nettement plus épaisses sous les plateaux que sous les vallées. Quand il y a un talus abrupt, avec une très forte dénivellée entre le plateau et la vallée, la variation d'épaisseur du niveau des argiles tachetées est considérable, puisqu'il a tendance à s'épaissir fortement sous les sommets topographiques. Quand le talus est peu marqué, on observe un simple pincement du niveau des argiles tachetées. La lithomarge non saturée, qui est plus profonde, a plutôt tendance à s'amincir progressivement en passant des plateaux aux vallées quelque soit l'ampleur du talus.

Les profils de plateau montrent des petites différences entre eux : la formation meuble de recouvrement qui est en générale absente peut apparaître localement, et les niveaux ferrugineux indurés, cuirasse et carapace, sont plus ou moins érodés.

Les différences mineures des profils de vallée sont dues au cuirassement qui existe pour de rares stations. De plus, le niveau 6 de la lithomarge non saturée n'est présent que pour la station isolée 4500W-2000S, située au Sud de la vallée de Guilingoué sur le bord d'un marigot à sec.

Sur les coupes, en considérant aussi bien les plateaux que les vallées, les niveaux sont relativement bien continus d'une station à l'autre, et cela d'autant plus que ces niveaux sont profonds. Les niveaux géoélectriques sont nettement recoupés par les talus en bordure de plateau, depuis la cuirasse jusqu'à la zone des argiles tachetées ou la lithomarge non saturée. Les reliefs qui forment les plateaux actuels semblent donc avoir été dégagés par l'enfoncement du réseau hydrographique au cours d'une phase d'érosion mécanique intense. La présence de profil cuirassé dans la vallée du Kokoyon, caractérisé par des niveaux très indurés, cuirasse et carapace, moins épais que ceux des plateaux, indique qu'il y a eu reprise de l'altération latéritique, accompagnée par une nouvelle phase de cuirassement au sommet des profils tronqués des vallées. L'absence de glacis cuirassé au sommet dans les petites vallées de Guilingoué et de Diourouka, à l'Ouest du plateau, peut s'expliquer par un processus plus récent d'érosion régressive en bordure du plateau (DELAITRE *et al.*, 1993).

Si on considère le modelé de la surface topographique des coupes L7, L8 et L9, les plus à l'Ouest, sur les flans du mont Koro Nidjan, on observe globalement une bonne conservation de la morphologie de

surface, en profondeur pour le toit de la roche-mère, à cause des faibles variations d'épaisseur des niveaux géoélectriques dans ce secteur.

En revanche, à l'Est, on a une très forte atténuation (layon L6), puis un effacement complet (layons L4 et L5) de la morphologie de surface à la base du profil d'altération, car l'épaisseur des niveaux argileux de la zone non saturée devient de plus en plus irrégulière, dans la zone de transition avec le secteur schisteux.

#### IV. LES COUPES GEOELECTRIQUES SUR LE SECTEUR SCHISTEUX

La coupe géoélectrique du layon L3 est représentative du secteur schisteux car elle est située au centre de ce secteur, et elle présente des caractéristiques communes aux autres coupes sur schiste. Cette coupe L3 est décrite en premier, puis les aspects particuliers des autres coupes situées de part et d'autre, à l'Ouest et à l'Est, seront discutés.

##### A. La coupe géoélectrique du layon L3

Les seize stations du layon L3 appartiennent au secteur schisteux d'après les résultats des sondages magnéto-telluriques. Elles se répartissent à égalité sur les plateaux et les vallées (Figure 109 et annexe figure 4).

##### 1. Les stations des plateaux

Il y a six stations sur le plateau de Banankoro, et deux sur le plateau de la Dinkolé au Nord. La formation meuble de recouvrement (niveau 1) n'apparaît sur les plateaux que pour trois stations, son épaisseur est proche de 1m. La cuirasse est présente sur tous les SE des plateaux, sauf à la station L3-600S, située sur une termitière cathédrale. Pour les autres stations, les variations d'épaisseur de la cuirasse sont sensibles :  $2,2 \pm 1,2$ m. La carapace existe pour tous les SE, même pour la station sur la termitière cathédrale. Son épaisseur moyenne (5m) fait le double de la cuirasse, et elle est relativement constante.

Le niveau 4 (argiles tachetées) est partout présent sous les plateaux, mais son épaisseur change brusquement entre la partie nord du plateau de Banankoro, où elle atteint 10 à 15m, et la partie sud où elle fait 45m. Ce sur-épaississement considérable du niveau 4 entre les stations L3-1600S et L3-2050S s'accompagne de la disparition du niveau 5 sous-jacent, dont l'épaisseur est de 35m en moyenne dans la partie nord. Cette différenciation latérale de la zone argileuse non saturée ne se reflète dans la morphologie de la surface que par un léger abaissement de la partie nord du plateau par rapport à la partie sud. On note également sur le plan de situation (Annexe carte 1) que la partie nord correspond à une apophyse latérale du plateau dégagée de part et d'autre par l'entaille de deux marigots qui descendent vers la vallée du Kokoyon. Un ensellement de la surface topographique dépourvu de cuirasse, au centre du plateau, correspond d'ailleurs au rebord d'un cirque d'érosion qui se développe vers l'Est, en avant de la coupe.

A la base de la coupe, la lithomarge saturée a une épaisseur presque constante de 31m, mais sa profondeur diminue sous les vallées par rapport au plateau.

##### 2. Les stations des vallées

Huit stations de cette coupe L3 se situent dans les vallées longent le plateau de Banankoro au Nord et au Sud, et sur un axe de drainage secondaire de la vallée du Kokoyon (station L3-1100S). La formation meuble de recouvrement (niveau 1) est présente sur presque toutes ces stations, avec une épaisseur très variable de 1,7m en moyenne. Le niveau 2, qui est aussi présent pour presque toutes les stations, correspond soit à de véritables cuirasses proches de celles du plateau comme dans la vallée du Kokoyon, soit à des niveaux moins ferrugineux et moins évolués mais très secs (FREYSSINET et NOVIKOFF, communications personnelles), comme dans la vallée sud. La carapace est deux fois plus épaisse que la cuirasse (respectivement 3,3m et 1,4m), et plus étendue vers le centre de la vallée du



Kokoyon.

Le niveau 4 (argiles tachetées) s'amincit en bordure des plateaux et disparaît sous les vallées. Le niveau 5 de la lithomarge non saturée n'est présent que sous la vallée du Kokoyon, mais il s'amincit également et disparaît vers le centre, à proximité de l'axe de drainage. Il est alors remplacé, comme dans la vallée sud, par le niveau 6 plus conducteur. Ce niveau 6, qui n'existe pas sur les coupes du secteur granitique, paraît ici relativement étendu et bien localisé à l'aplomb des vallées.

### 3. Discussion à propos de la coupe L3

La coupe L3 montre que sur schiste, comme sur granite, les profils d'altération sont différents suivant qu'ils sont sous les plateaux ou sous les vallées : la zone non saturée comprenant les argiles tachetées et la partie supérieure de la lithomarge, est nettement plus épaisse sous les plateaux par rapport aux vallées. Mais elle montre aussi que sous les plateaux, cette zone est très hétérogène : les niveaux 4 et 5 présentent des discontinuités correspondant à des brusques variations d'épaisseur d'une station à l'autre. Ces fortes variations des niveaux argileux de la zone non saturée reflètent alors vraisemblablement des hétérogénéités des faciès de la roche-mère.

Le niveau 6 se développe sous les vallées où il tend à remplacer les niveaux 4 et 5 moins conducteurs. Cette différenciation latérale du niveau 6 peut s'expliquer par une plus forte teneur en eau de la lithomarge non saturée sous les vallées par rapport aux plateaux.

Comme pour le secteur granitique, les niveaux supérieurs du profil latéritique sont recoupés, depuis la cuirasse jusqu'à une certaine profondeur dans le niveau 4, par les talus très escarpés de la vallée du Kokoyon et de la vallée sud. Les profils d'altération des plateaux ont donc été entaillés par enfoncement du réseau hydrographique dans les vallées.

La présence du niveau 6 sous les vallées et le sur-épaississement du niveau 4, qui s'enfonce jusqu'à la lithomarge saturée à la place du niveau 5 sous les plateaux, constituent les deux différences majeures observées sur cette coupe L3 en secteur schisteux par rapport aux autres coupes du profil d'altération sur le secteur granitique.

### B. Les autres coupes géoélectriques situées sur schiste

Les autres coupes géoélectriques situées en partie, ou entièrement sur schiste sont représentées en annexe sur les figures 1, 2, 3, 5 et 6. Ce sont les coupes des layons L0, L1, L2 à l'Est du layon L3, et les coupes L4 et L5 à l'Ouest. Ces dernières étant situées en partie sur schiste et sur granite. Sur ces coupes espacées de 700m à 1200m, l'écartement des stations de SE varie entre 250m et 300m. Elles présentent toutes un certain nombre de particularités par rapport à la coupe L3.

#### 1. Les coupes géoélectriques L2, L1 et L0 à l'Est de la coupe L3

##### La coupe géoélectrique L2

La coupe du layon L2, située à l'Est de la coupe L3 (Annexe figure 3), passe à l'un des endroits où le plateau de Banankoro est le plus large (2,3km), avec une topographie légèrement ondulée, convexe-concave.

Les profils d'altération sous le plateau se caractérisent par une grande épaisseur, généralement supérieure à 100m, et la roche-mère n'a pas été atteinte par les SE, même pour des écartements en AB/2 allant jusqu'à 500m. Cet épaississement, déjà notable pour la carapace (niveau 3) qui atteint une dizaine de mètres de puissance, est particulièrement important pour le niveau 4 (40m en moyenne) et pour la lithomarge saturée (niveau 7), dont la profondeur dépasse la limite de pénétration des SE. Cet approfondissement du profil d'altération sur cette coupe, déjà mis en évidence par les sondages magnéto-telluriques (PHAM et BOYER, 1988), s'explique probablement par la proximité immédiate de la minéralisation aurifère de Banankoro (COTTARD *et al.*, 1981). Dans cet environnement minéralisé de type stockwerk (VERNET *et al.*, 1988), le développement de l'altération est favorisé par une fracturation plus intense. De plus, les propriétés électriques des altérites et du substratum sont probablement modifiées par rapport à celles de l'encaissant non minéralisé. On voit bien ici l'intérêt de la méthode géoélectrique comme outil de prospection tactique en milieu latéritique.

Sur cette coupe, le niveau 4 assimilé à l'horizon des argiles tachetées, repose toujours sur le niveau 5, plus conducteur, correspondant à la lithomarge non saturée, dont l'épaisseur assez uniforme est de 10m en moyenne.

Sous la vallée du Kokoyon, le profil d'altération est moins épais : le niveau 4 disparaît, la lithomarge saturée (niveau 7) s'amincit, le toit de la roche-mère (niveau 8) remonte, et il est atteint par tout les SE. Le niveau 5 s'amincit légèrement, tandis que le niveau 6, plus conducteur, se développe au-dessus de la lithomarge saturée. Ce niveau 6 atteint son maximum de puissance (49m) sur le SE L2-3300S de la vallée sud, et il se prolonge assez loin en s'amincissant, sous la bordure sud du plateau.

Plus près de la surface dans les vallées, la plupart des SE mettent en évidence les niveaux 2 et 3, correspondant aux horizons ferrugineux indurés, cuirasse et carapace ; mais les épaisseurs de ces deux niveaux (respectivement 1,4m et 3,6m) sont plus faibles que sous le plateau (respectivement 2,2m et 5m). De plus, ils reposent directement sur le niveau 5, puisque le niveau 4 (argiles tachetées) est entièrement recoupé au niveau du talus en bordure du plateau. Cette discontinuité est importante : elle traduit manifestement la succession de deux phases majeures de cuirassement séparées par une phase d'érosion et de creusement des vallées autour du plateau (FREYSSINET, 1990 ; DELAITRE *et al.*, 1993).

Une autre discontinuité apparaît sur cette coupe au niveau de la station L2-2300S, située au centre de la partie légèrement concave de la surface du plateau. Ce SE est très différent des autres SE du plateau (Figure 110), et il présente les mêmes caractéristiques que ceux des vallées, puisque le niveau 4 n'existe pas et que le niveau 5 de la lithomarge non saturée remonte ici jusque sous la carapace. Cette remontée brutale du niveau 5 s'accompagne de celle des niveaux inférieurs 6, 7 et 8. La particularité de ce SE pourrait s'expliquer par sa situation topographique au centre d'une dépression en bordure du plateau (Annexe cartes 1 et 3) ; mais elle résulte peut-être aussi d'un artefact de mesure. En effet pour les grands écartements ( $AB/2 > 30m$ ), l'électrode d'injection ouest sort du plateau, et descend dans la vallée sud non cuirassée.

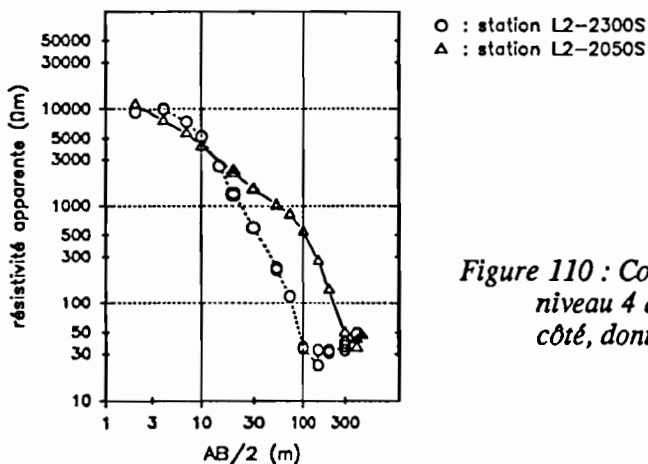


Figure 110 : Comparaison entre le SE L2-2300S pour lequel le niveau 4 disparaît brutalement et celui L2-2050S situé à côté, dont le niveau 4 atteint 45m.

Quoi qu'il en soit pour cette station particulière, on observe bien sur l'ensemble de la coupe L2 une inversion entre le relief de la surface topographique et celui du toit de la roche-mère, puisque les horizons d'altération argileux s'enfoncent sous la surface haute des plateaux, en raison du fort développement du niveau 4, et qu'ils se relèvent sous la vallée du Kokoyon.

### La coupe géoélectrique L1

Sur la coupe L1 située à l'Ouest de la coupe L2 (Annexe figure 2), le relief est plus accentué. Le plateau de Banankoro est plus étroit (1,5km), et sa surface s'élève de 50m depuis le rebord sud jusqu'au rebord nord où elle culmine à 415m, au-dessus de la vallée du Kokoyon. Ici, cette vallée est très encaissée, entre les deux escarpements du plateau de Banankoro au Sud et de celui de la Dinkolé au Nord. La cuirasse et la carapace couvrent toute la surface du plateau de Banankoro, et leurs épaisseurs comme sur la coupe L2 sont relativement importantes, respectivement 2,4m et 8,6m. Ces deux niveaux ferrugineux indurés sont également présents sur les glacis cuirassés de la vallée du Kokoyon, mais leurs

épaisseurs sont alors plus faibles, respectivement 1,7m et 2,8m.

A plus grande profondeur, on observe à nouveau sur cette coupe une différenciation latérale importante des niveaux argileux au-dessus de la lithomarge saturée. Sous la partie sommitale du plateau, le niveau 4 est très épais (60m), et s'enfonce en profondeur jusqu'au toit de la lithomarge saturée (niveau 7). De part et d'autre, il s'interrompt brusquement et il est remplacé par les deux niveaux, 5 et 6, de la lithomarge non saturée. Cette transition s'effectue sous le talus des plateaux, de chaque côté de la vallée du Kokoyon, et au niveau d'une rupture de pente entre la partie amont plus redressée et la partie aval du plateau de Banankoro.

Au centre de la vallée du Kokoyon, le niveau 5 est très aminci, tandis que, au Sud vers la vallée du Niger, il disparaît complètement et laisse place au niveau 6, plus conducteur. Ainsi, les différenciations latérales des niveaux argileux de la zone non saturée du profil d'altération, ressemblent beaucoup à celles décrites sur les deux coupes L3 et L2 précédentes.

Le toit de la nappe phréatique en bas de la lithomarge est atteint pour une altitude qui oscille entre 330 et 340m, son épaisseur moyenne est de 31m. La roche-mère (niveau 8) est identifiée sur tous les SE, car les profils d'altérations sont moins épais que sur la coupe L2.

### La coupe géoélectrique L0

Sur la coupe L0 située à l'Ouest du secteur (Annexe figure 1), l'extrémité du plateau de Banankoro est étroite (400m), son altitude baisse (375m) et il domine à peine la vallée du Kokoyon au Nord et celle qui s'ouvrent au Sud sur la plaine du Niger (Annexe carte 1).

Au sommet des profils, les niveaux ferrugineux indurés, cuirasse et carapace, sont encore bien développés sur le plateau et dans la vallée du Kokoyon, mais ils sont absents dans la vallée du Niger. La formation meuble de recouvrement est relativement épaisse et étendue, notamment dans les zones où la cuirasse est érodée ou absente. Elle recouvre la carapace sur les versants de la vallée du Kokoyon, et atteint son maximum de puissance (4,2m) dans la vallée du Niger sur une zone cultivée.

Le niveau 4 est nettement moins épais (5 à 15m) que sur les autres coupes du secteur sur roche-mère schisteuse. Il s'étend sous l'ensemble du plateau et disparaît en bordure, vers le centre des vallées. En-dessous, on retrouve systématiquement les deux niveaux 5 (5 à 10m) et 7 (20 à 35m) correspondant à la lithomarge non saturée et saturée. Bien que cette coupe traverse la vallée du Kokoyon dans sa partie aval, on ne retrouve pas ici le niveau 6 entre le niveau 5 et le niveau 7, comme c'était le cas pour les trois autres coupes à quelques kilomètres en amont (Annexe carte 1).

Globalement, les profils d'altération sont ici moins épais que sur les autres coupes, et la roche-mère est toujours atteinte pour une profondeur comprise entre 35 et 75m.

## 2. Les coupes géoélectriques L4 et L5 à l'Ouest de la coupe L3

Les deux coupes L4 et L5 (Annexe figures 5 et 6) dont les parties sud se trouvent sur le secteur schisteux, ont déjà été présentées avec celles situées sur le secteur granitique. On retrouve sur la partie schisteuse de ces deux coupes, les discontinuités latérales importantes des niveaux argileux non saturés de la lithomarge.

E-

n effet, sur la coupe L4, le niveau 4 s'épaissit brusquement au centre du plateau, sous les stations L4-850S et L4-1100S, et il s'enfonce dans le niveau 5 jusqu'à la lithomarge saturée. Sur la coupe L5, le niveau 6 remplace le niveau 5 sous la surface basse du plateau et sous la vallée sud. L'altitude du toit de la lithomarge saturée est assez irrégulière, mais son épaisseur reste à peu près constante : 35m sur la coupe L4 et 40m sur la coupe L5.

### C. Conclusion

On retrouve donc bien sur le secteur schisteux les deux principaux types de profils latéritiques : ceux des plateaux et ceux des vallées, dont la différence majeure tient aux épaisseurs de la carapace (niveau 3), de la zone non saturée formée par les argiles tachetées et la partie supérieure de la lithomarge (niveau 4), et du niveau 5 de la lithomarge non saturée qui sont en moyenne nettement plus épais sous les plateaux que sous les vallées.

Mais on distingue aussi un niveau supplémentaire situé juste au-dessus de la lithomarge saturée, plus conducteur que le niveau 5 et qui se développe principalement en bordure de plateau et sous les vallées où il atteint une épaisseur importante (18m en moyenne). Ce niveau 6 n'apparaît pas sur les SE du secteur granitique à une exception près.

Sous le plateau comme sous les vallées, les horizons argileux non saturés (niveaux 4, 5 et 6) présentent de grandes variations dans leur épaisseur et leur répartition : sous le plateau, les argiles tachetées (niveau 4) s'épaississent considérablement par endroit, en s'approfondissant et en remplaçant les niveaux 5 et 6 de la lithomarge non saturée, alors que sous les vallées, il tend à disparaître complètement, de même que le niveau 5 tend à s'amincir ; ils sont alors remplacés par le niveau 6 qui s'épaissit sous les vallées.

Les profils d'altération du secteur schisteux sont donc nettement plus diversifiés que ceux du secteur granitique. Cependant il n'existe pas de limite bien contrastée entre ces deux unités lithologiques, on observe plutôt des changements progressifs des coupes géoélectriques, d'Est en Ouest sur l'ensemble du secteur. La présence d'une minéralisation aurifère associée à un couloir de fracturation parcouru par un système filonien, se marque très nettement par un approfondissement du profil d'altération le long du layon L2.

## V. ENFONCEMENT DU PROFIL D'ALTERATION DANS LE PAYSAGE

Après avoir examiné l'organisation des niveaux géoélectriques sur les dix coupes transversales du plateau de Banankoro, on compare maintenant le relief de la surface topographique et celui du toit de la roche-mère, en relation avec les variations d'épaisseur globale du profil latéritique.

### A. Cartes du relief et de l'épaisseur de la couverture latéritique

Sur la carte topographique du secteur d'étude (Annexe carte 22), les courbes de niveau ont été calculées par interpolation à partir de l'altitude relevée pour chaque station de SE. La carte des épaisseurs du profil d'altération latéritique est représentée de la même manière (Annexe carte 23). La carte des altitudes du toit de la roche-mère correspond à la différence entre les deux premières (Annexe carte 24). Des différences très nettes apparaissent entre ces trois surfaces :

- i) Le relief de la surface topographique (Annexe carte 22) est dominé par le contraste d'altitude entre le plateau de Banankoro et les vallées adjacentes. La surface du plateau elle-même est ondulée et présente trois bombements séparés par des ensembles :
  - A l'Est, entre les layons L1 et L2, la surface du plateau s'élève du Sud vers le Nord depuis 365m jusqu'à 410m au-dessus de la vallée du Kokoyon.
  - Le bombement central qui s'élève jusqu'à 415m est profondément entaillé par la vallée de Guilingoué qui s'ouvre vers l'Ouest.
  - Le mont Koro-Nidjan qui s'élève à l'Ouest jusqu'à 470m correspond au relief dominant du secteur.

- ii) La carte des isopaques du profil d'altération (Annexe carte 23) montre bien l'épaississement des profils sous les plateaux par rapport aux vallées. Cet épaississement est très marqué sous les bombements topographiques au centre et à l'Est du plateau. Il apparaît également mais de façon nettement moins prononcée sous le mont Koro Nidjan à l'Ouest du plateau. Ainsi l'alignement de profil très épais le long du layon L2 sur le secteur schisteux, pour lequel la roche-mère n'a pas été atteinte, se distingue comme une structure "anomalique", puisqu'elle ne correspond pas à une élévation du relief en surface. Cette structure est interrompue au Nord par la vallée du Kokoyon ; elle semble se prolonger jusqu'à l'autre extrémité du layon L2, sous la vallée au Sud du plateau.

Par contre, le profil s'amincit très nettement à l'Est, pour quatre SE (épaisseur < 40m) situés à l'extrémité sud du layon L0, dans la vallée en bordure de la plaine du Niger.

iii) Sur la carte de l'altitude du toit de la roche-mère à la base du profil d'altération (Annexe carte 24), les différences d'altitude entre plateau et vallée sont presque complètement estompées, ainsi que les bombements topographiques au centre et à l'Est du plateau.

Le relief dominant de la roche-mère s'élève jusqu'à 360m à l'Ouest sous le mont Koro Nidjan. Cette zone de haut-fond du profil d'altération se prolonge sous la vallée de Guilingoué, le long de la bordure sud-ouest du plateau de Banankoro. On retrouve donc en profondeur, sous le profil latéritique, une image complète du bombement topographique éventré par la vallée de Guilingoué, au centre du plateau. Un autre relief, au Sud-Est du secteur, correspond à une remontée du toit de la roche-mère sous les profils d'altération peu épais de la bordure de la vallée du Niger, à l'extrémité du layon L0.

En revanche, l'épaississement des profils d'altération sous le layon L2 se traduit par une entaille profonde du toit de la roche-mère. Une réplique de cette structure linéaire qui traverse le plateau de Banankoro, se dessine de façon moins contrastée, sous le layon L5, au centre du secteur. Cependant cette structure est interrompue en son centre par l'extrémité du bombement du toit de la roche-mère qui se prolonge depuis le mont Koro Nidjan à l'Ouest et passe ici sous le plateau au Sud-Est de la vallée de Guilingoué.

### B. Distribution des altitudes de la surface, des épaisseurs du profil et des altitudes de la roche-mère

Les aspects statistiques de ces trois composantes du relief de la couverture latéritique sont présentés sur la figure 111 par les courbes de fréquences cumulées des altitudes et des épaisseurs du profil d'altération, en distinguant les zones de vallée et de plateau, sur les deux types de roche-mère (schiste et granite).

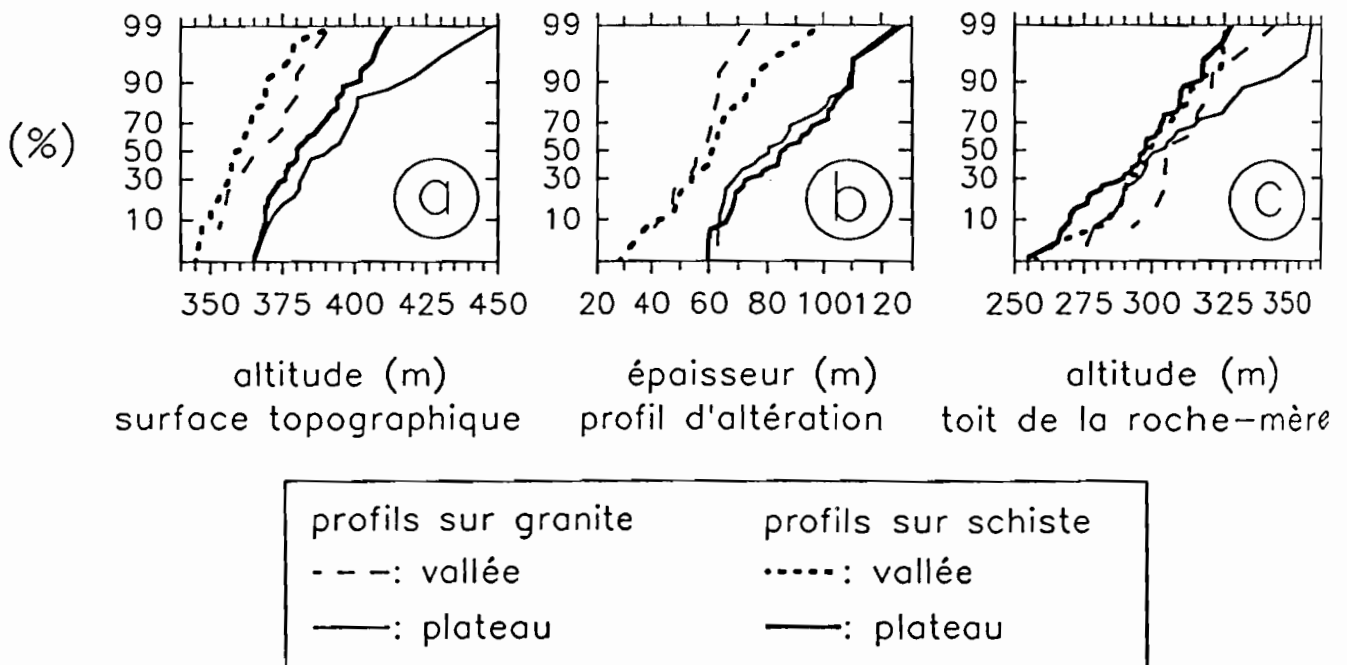
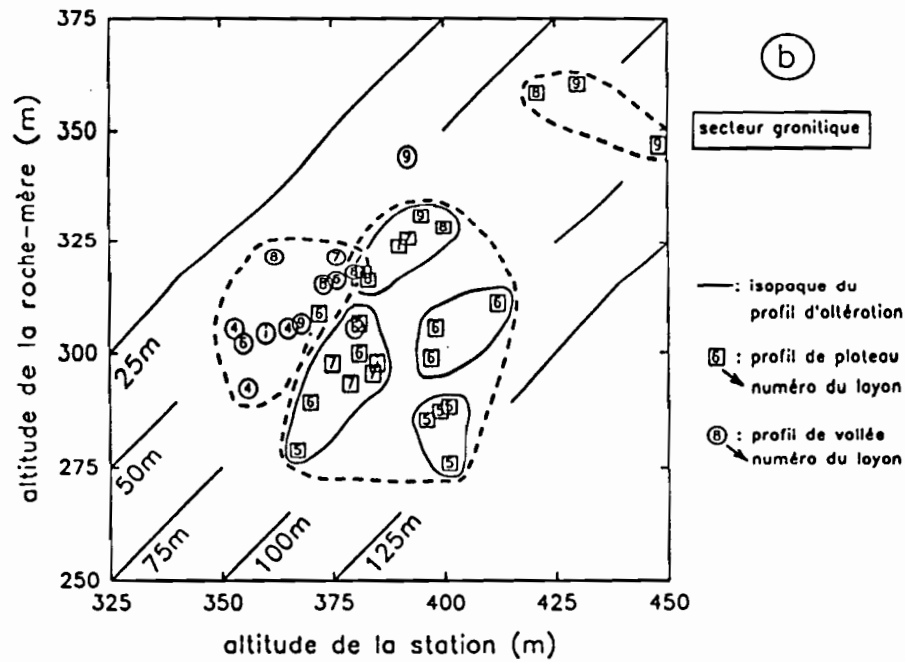
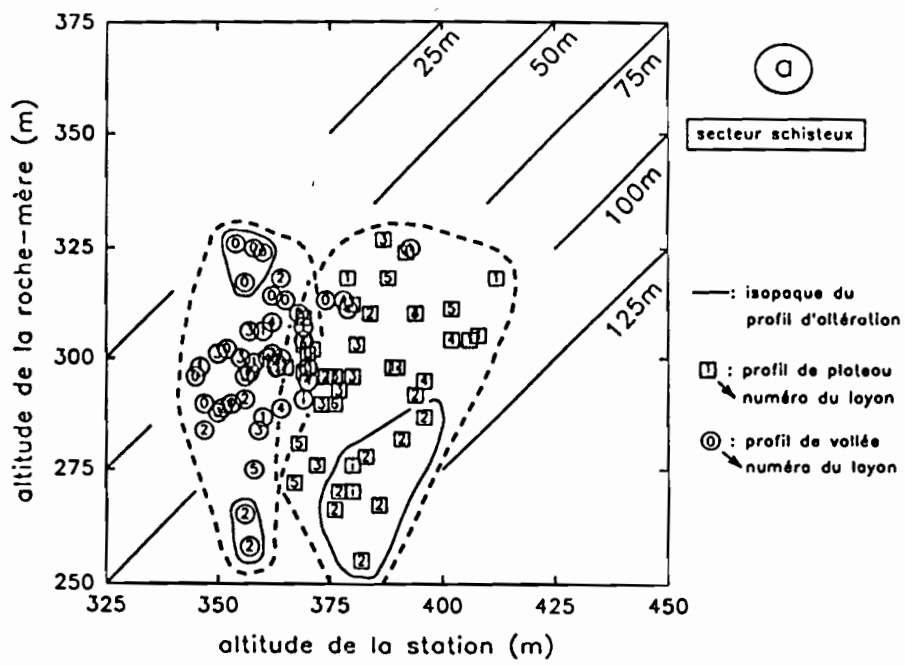


Figure 111 : Courbes de fréquences cumulées (a) des altitudes de la surface topographique, (b) des épaisseurs du profil d'altération et (c) des altitudes du toit de la roche-mère, en distinguant les vallées et les plateaux sur les deux secteurs, schisteux et granitique.



transformation du relief par altération

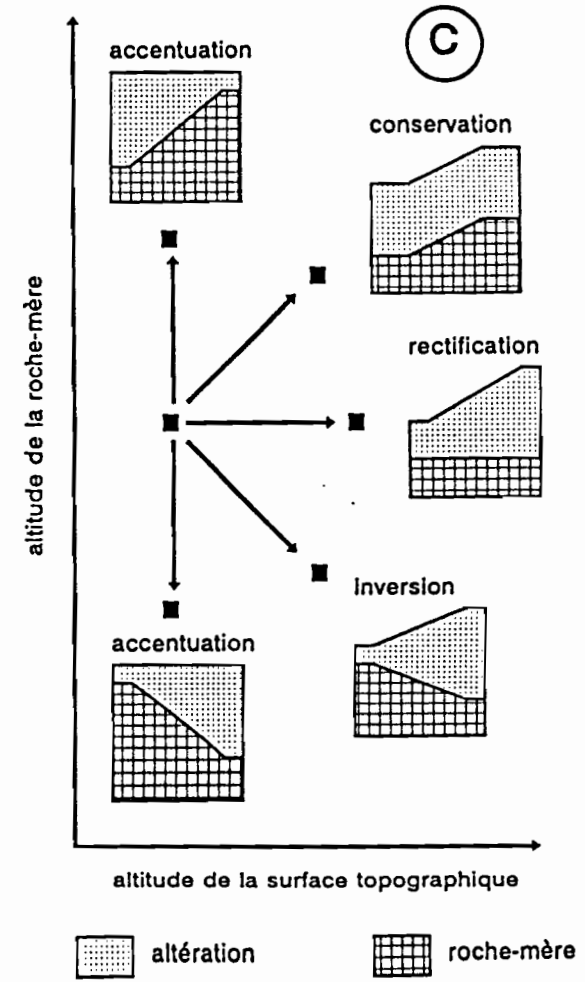


Figure 112 : Relation entre l'altitude de la surface topographique et l'altitude du toit de la roche-mère :  
 a) sur le secteur schisteux ;  
 b) sur le secteur granitique ;  
 c) schéma interprétatif.



Ces diagrammes montrent bien que les différences morphologiques de surface entre plateau et vallée (Figure 111-a) sont effacées à la base du profil d'altération (Figure 111-c) car l'épaisseur de la couverture latéritique est nettement plus forte sous les plateaux (85m en moyenne), que sous les vallées (60m en moyenne) (Figure 111-b). Cependant cet effacement du modelé caractéristique de la morphologie de surface ne correspond pas à un aplanissement du relief à la base du profil d'altération. En effet, les variations d'altitude du toit de la roche-mère, comprises entre 255 et 360m (Figure 111-c), sont aussi fortes que celles de la surface topographique, qui sont comprises entre 345 et 450m.

Il n'y a pas de différence notable d'épaisseur du profil d'altération entre les deux types de roche-mère, schiste et granite, si ce n'est une plus forte proportion de profils épais sur le secteur schisteux, qui dépassent 65m de profondeur sous les vallées (Figure 111-b) ou bien pour lesquels la roche-mère n'a pas pu être atteinte sous les plateaux ( $> 120m$ ).

Sur le secteur granitique, le relief du toit de la roche-mère reste ainsi plus contrasté, comme celui de la surface topographique, par rapport au secteur schisteux (Figure 111-c).

### C. Transformation du relief par altération

La transformation du relief à la base du profil d'altération est présentée sur un diagramme où l'on a reporté l'altitude de la roche-mère en fonction de l'altitude de la surface topographique pour toutes les stations du secteur schisteux (Figure 112-a) et granitique (Figure 112-b). Les différents types de changements de relief se lisent clairement sur ces diagrammes en considérant les positions relatives des stations (Figure 112-c) :

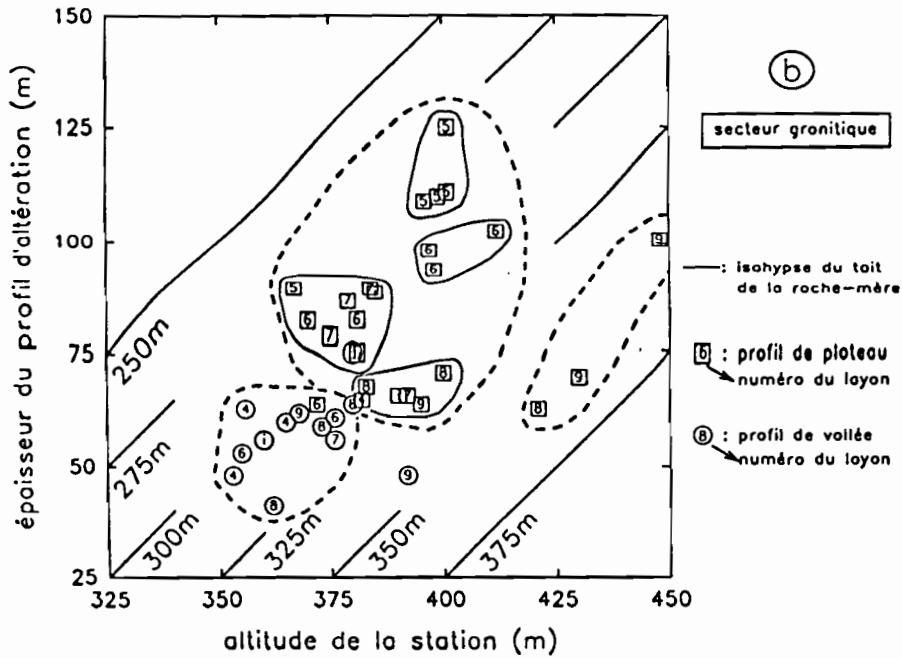
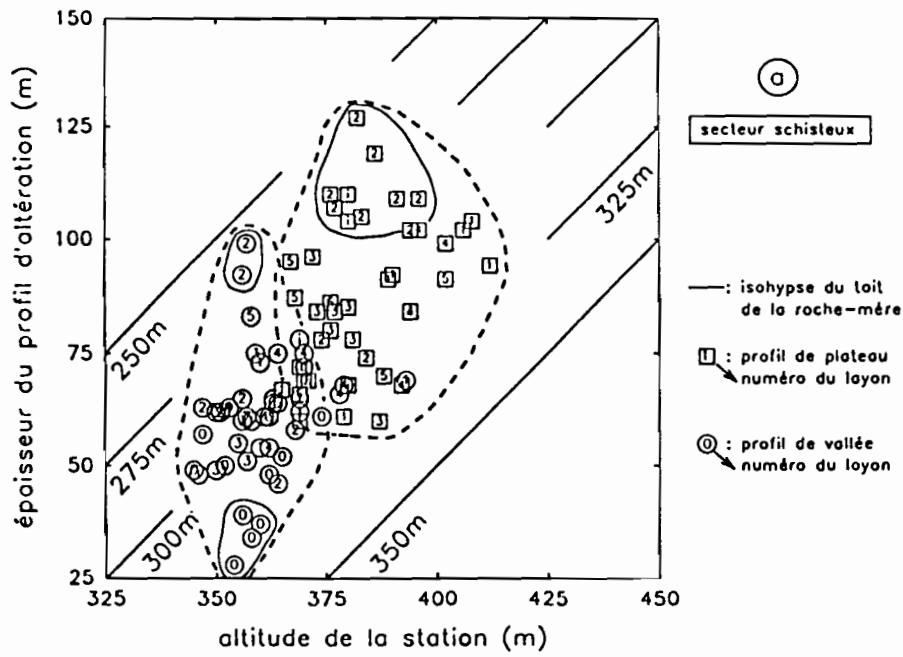
- i) Lorsque les stations sont alignées suivant la première bissectrice, l'épaisseur du profil est constante et le relief de la roche-mère en profondeur reproduit celui de la surface.
- ii) Si la pente de la droite qui joint les deux stations est supérieure à 1, la différence d'altitude de la roche-mère entre les stations est supérieure à la différence d'altitude topographique et il y a accentuation du relief à la base de la couverture latéritique.
- iii) Si la pente de la droite qui joint deux stations est comprise entre 1 et 0, il y a une atténuation du relief en profondeur qui peut aller jusqu'à l'aplanissement complet du relief de surface.
- iv) Si la pente de la droite entre deux stations est négative, l'altitude du toit de la roche-mère est plus faible sous le point haut que sous le point bas : il y a une inversion de relief. Lorsque la pente est comprise entre 0 et -1, il y a une inversion avec atténuation, en profondeur, du relief de la surface. Mais si la pente est inférieure à -1, il y a une inversion avec accentuation, en profondeur, du relief de la surface.

Sur le premier diagramme correspondant au secteur schisteux (Figure 112-a), le nuage de point représentatif de l'ensemble des stations, ne présente pas de direction privilégiée. En effet la corrélation entre l'altitude de la surface et celle de la roche-mère est faible ( $R = 0.37$ ) et l'on peut donc avoir tous les types de changement de relief suivant les couples de stations considérés.

Le groupe des stations de vallée se détache assez nettement du groupe des stations de plateau par des altitudes plus faibles pour la surface mais pas pour la roche-mère. Les deux nuages de points sont étirés suivant la verticale, ce qui indique qu'il y a une tendance générale à l'accentuation du relief en profondeur sous chaque unité morphologique, tandis que l'on a une rectification du modelé lorsque l'on passe des plateaux aux vallées.

Cette transformation du relief, liée à un approfondissement différentiel du profil d'altération d'un point à l'autre du paysage, est plus importante pour certains groupes de station situés aux extrémités du nuage de points :

- i) Les stations du layon L2 qui correspondent à des profils très épais ( $> 100m$ ) sous les plateaux et sous les vallées se détachent dans la partie inférieure du diagramme en marquant ainsi un enfoncement du toit de la roche-mère avec une inversion ou une accentuation du relief par rapport aux autres stations.
- ii) A l'inverse, les stations de vallée du layon L0, à l'Est du secteur et en bordure de la plaine du Niger, se distinguent par une remontée du toit de la roche-mère correspondant à une faible épaisseur du profil d'altération ( $< 50m$ ).



transformation du relief par altération

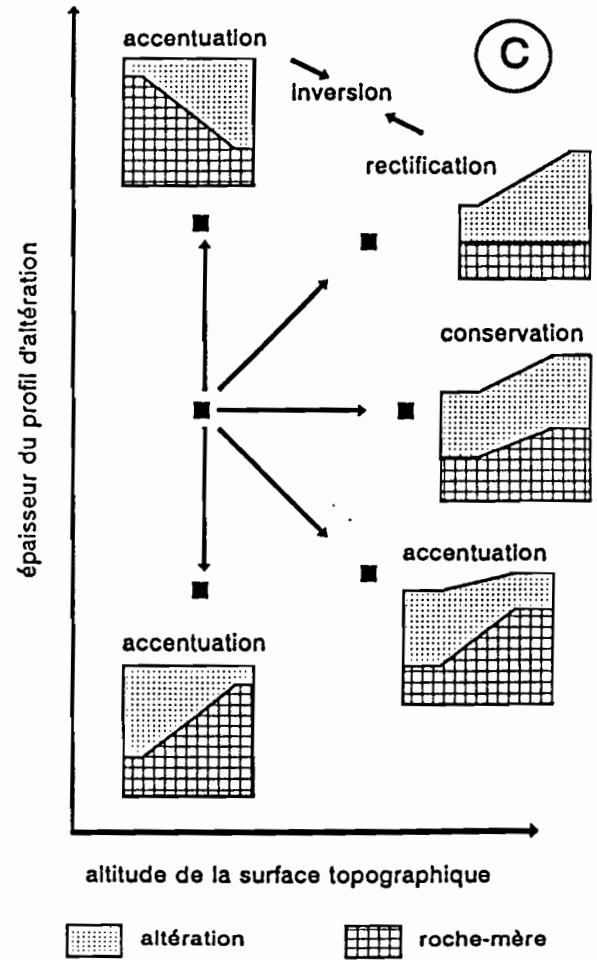


Figure 113 : Relation entre l'épaisseur du profil d'altération et l'altitude de la surface topographique :  
 a) sur le secteur schisteux ;  
 b) sur le secteur granitique ;  
 c) schéma interprétatif.



Sur le secteur granitique (Figure 112-b), les stations de vallée paraissent relativement homogènes, avec de faibles écarts au niveau de la topographie ou de l'épaisseur des profils, comprise entre 50 et 65m. En revanche, on distingue plusieurs groupes de station de plateau correspondant à des situations plus contrastées :

i) Trois stations situées dans la zone sommitale du mont Koro Nidjan, sur les layons L8 et L9, à l'Ouest du secteur, se détachent nettement par les altitudes plus élevées de la surface topographique et du toit de la roche-mère. Il y a donc conservation de ce relief en profondeur.

ii) Les stations des layons L5 et L6 plus à l'Est, qui correspondent également aux sommets topographiques du plateau à proximité de l'entaille de la vallée de Guilingoué, présentent au contraire des profils relativement épais, entre 100 et 125m. L'abaissement du toit de la roche-mère est plus marqué pour les stations du layon L5, et il entraîne une légère inversion de relief par rapport aux stations d'altitude inférieure.

iii) Un autre groupe de stations appartenant à plusieurs layons, L7, L8 et L9, et situées en position de versant sur les reliefs du plateau, se distinguent par des altitudes comprises entre 380 et 400m, intermédiaires entre celles des sommets et celles des vallées, ainsi que par une épaisseur des profils d'altération, entre 60 et 70m, à peine plus importante que celle des profils de vallée.

iv) Enfin, le groupe des stations de bas-plateaux, dont les altitudes comprises entre 365 et 385m dépassent de très peu celles des vallées, présente au contraire des profils nettement plus épais, avec 75 à 90m de puissance. Il y a donc une tendance assez générale à l'inversion de relief en profondeur lorsque l'on passe des vallées aux bas plateaux sur le secteur granitique.

Les effets de l'approfondissement différentiel du profil d'altération, d'une station à l'autre, peuvent être présentés d'une autre manière en reportant l'épaisseur du profil d'altération en fonction de l'altitude de la surface topographique (Figure 113). Cette figure montre bien qu'il existe une corrélation positive entre ces deux paramètres :  $R = 0.65$  sur le secteur schisteux et  $R = 0.52$  sur le secteur granitique.

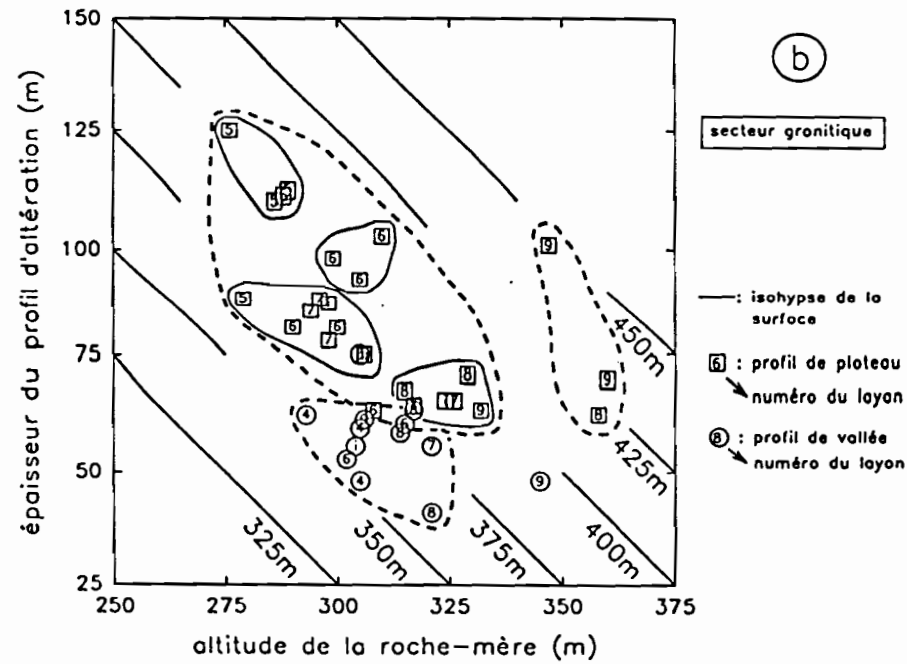
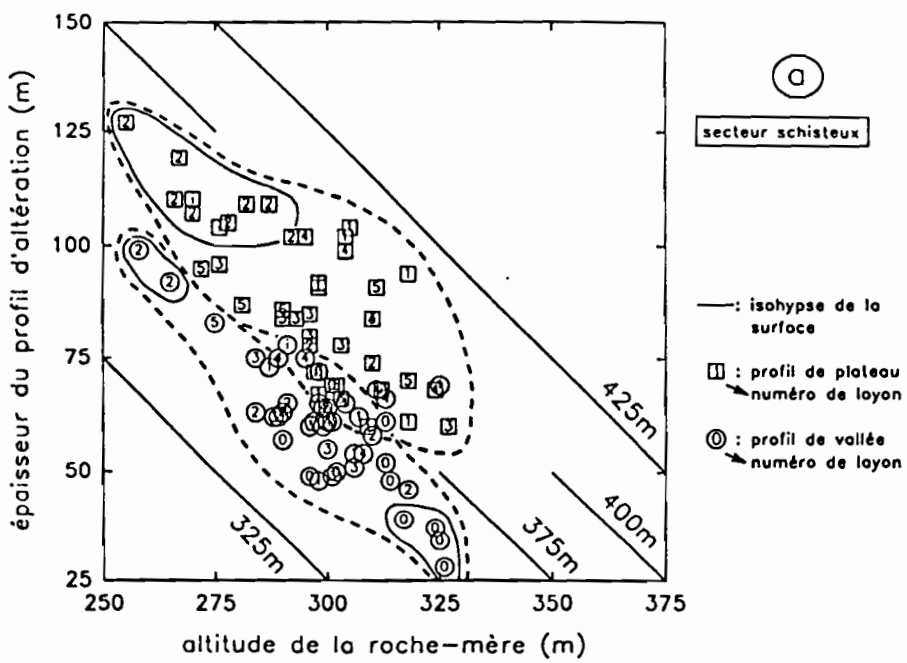
Sur ces diagrammes (Figure 113-a et 113-b), le nuage de point s'étale suivant la direction de la première bissectrice correspondant aux isohypses du toit de la roche-mère, en opposant les profils de plateau, plus épais et d'altitude plus élevée, aux profils de vallée plus minces et d'altitude plus faible. Cette tendance correspond à une rectification générale de la morphologie de surface à l'échelle de la zone d'étude (Figure 113-c). Les écarts à cette tendance principale résultent en grande partie des particularités décrites précédemment pour plusieurs groupes de stations :

i) Sur le secteur schisteux (Figure 113-a), on retrouve l'opposition entre les profils de plateau épais du layon L2 et les profils minces des vallées du layon L0.

ii) Sur le secteur granitique, on reconnaît également les quatre groupes de profils de plateau :

- les profils relativement peu épais du mont Koro Nidjan ;
- les profils relativement épais des stations proches du rebord élevé du plateau autour de la vallée de Guilingoué ;
- les profils relativement minces du groupe des stations de versant ;
- les profils relativement épais des bas-plateaux.

De plus sur ce même diagramme, on peut remarquer que l'épaisseur du profil de la station du mont Koro Nidjan la plus proche du sommet, L9-2900N à 448m d'altitude, est nettement plus forte que celles des profils des deux stations situées à une altitude inférieure, proche de 425m. Ces deux stations, situées en haut de versant présentent des profils d'épaisseur comprise entre 60 et 70m, identique à celles des autres stations de versant. Cette observation confirme l'importance prépondérante de la situation morphologique locale de la station par rapport à son altitude, comme facteur de contrôle de l'approfondissement du profil latéritique.



transformation du relief par unificati...

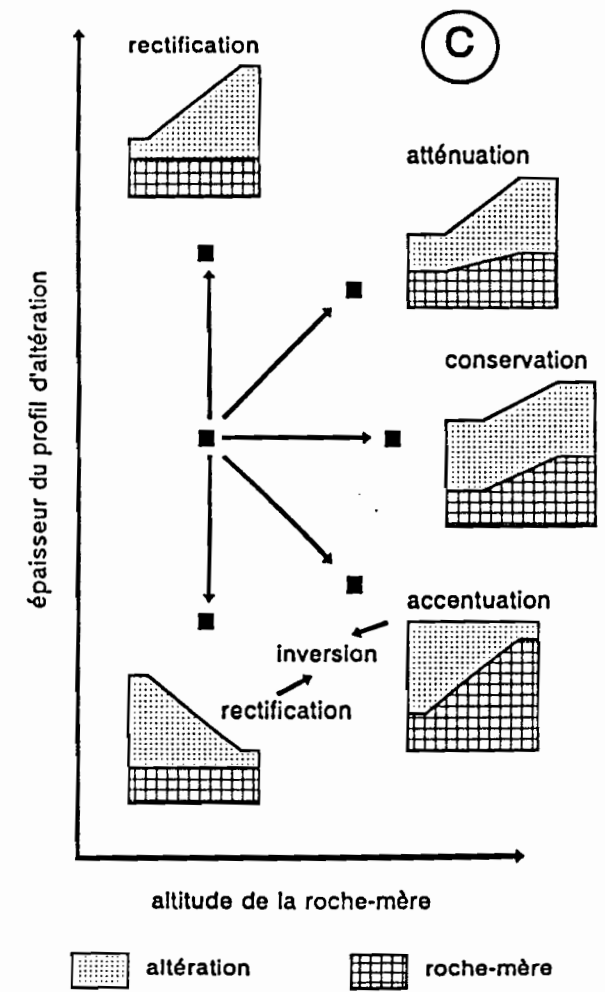


Figure 114 : Relation entre l'épaisseur du profil d'altération et l'altitude du toit de la roche-mère:  
 a) sur le secteur schisteux ;  
 b) sur le secteur granitique ;  
 c) schéma interprétatif.

Les relations entre l'épaisseur du profil d'altération et l'altitude du toit de la roche-mère sont décrites sur la figure 114. Ces deux paramètres varient en sens inverse et les nuages de points représentatifs des stations s'allongent suivant la direction de la seconde bissectrice, de pente -1, sur les diagrammes du secteur schisteux (Figure 114-a) et du secteur granitique (Figure 114-b).

Cette direction privilégiée correspondant aux isohypses de la surface topographique, traduit une accentuation du relief de la roche-mère à la base du profil d'altération (Figure 114-c). Le toit de la roche-mère a tendance à s'enfoncer sous les profils épais et à remonter sous les profils minces. Cette corrélation négative entre épaisseur du profil d'altération et altitude de la roche-mère est plus marquée pour les profils de plateaux ( $R = -0.75$ ) et de vallée ( $R = -0.78$ ) du secteur schisteux, que pour les plateaux ( $R = -0.59$ ) et les vallées ( $R = -0.45$ ) du secteur granitique.

Les diverses tendances décrites précédemment et que l'on retrouve sur les diagrammes de la figure 114, montrent comment le relief s'organise en profondeur par rapport à celui de la surface topographique :

i) Sur le secteur schisteux, une entaille de la roche-mère traverse le plateau de Banankoro dans la direction N-S, le long du layon L2, et à l'inverse une remontée se produit en bordure de la plaine du Niger, le long du layon L0 à l'Est.

ii) Sur le secteur granitique, à l'Ouest, le relief dominant du mont Koro Nidjan est bien préservé en profondeur, mais le bombement central du plateau autour de la vallée de Guilingoué disparaît complètement. On a même tendance à l'inversion de relief sous les sommets des plateaux par rapport aux versants et aux vallées adjacentes.

#### D. Conclusion

Les cartes hypsométriques du relief de la surface et du toit de la roche-mère montrent des reliefs aussi contrastés au sommet et à la base de la couverture latéritique avec des dénivelées maximums de l'ordre de 100m. Mais la morphologie de la surface est fortement modifiée par les variations latérales importantes d'épaisseur du profil d'altération, ces dernières étant comprises entre 50 et 100m environ. Globalement, il y a rectification du modelé de la surface au niveau du toit de la roche-mère entre les vallées et les plateaux. Mais ce phénomène n'est pas uniforme sur l'ensemble du secteur et il ne s'accompagne pas d'un aplanissement généralisé du relief à la base du profil d'altération. Des tendances très variées se manifestent localement d'un endroit à l'autre, sous les vallées comme sous les plateaux :

- conservation du relief dominant à l'Ouest du secteur, le mont Koro Nidjan ;
- inversion au niveau des vallées par rapport aux plateaux à l'Ouest du secteur ;
- inversion vers l'Est, par enfoncement du profil sous le plateau au niveau d'un couloir de fracturation et remontée de la roche-mère vers la vallée du Niger.

Il n'y a pas de limite nette entre le secteur granitique et le secteur schisteux.

## VI. CONCLUSIONS

Les résultats de ce chapitre montrent l'efficacité de l'application de la méthode du SE aux couvertures latéritiques épaisses (> 50m). Ces fortes épaisseurs ainsi que la grande profondeur de la nappe phréatique a permis de mettre en évidence huit niveaux géoélectriques différents : 1. l'horizon meuble de recouvrement, 2. la cuirasse, 3. la carapace, 4. les argiles tachetées, 5. la lithomarge non saturée "résistante", 6. la lithomarge non saturée "conductrice", 7. la lithomarge saturée et 8. la roche-mère.

Le SE permet donc de distinguer non seulement la zone non saturée et la zone saturée au sein de la lithomarge, mais aussi deux types de lithomarge non saturée dont la différenciation est certainement liée à leur teneur en eau puisque la lithomarge non saturée "conductrice" se localise préférentiellement à l'aplomb des vallées.

Le nombre important de SE réalisés sur le secteur permet de cartographier le profil latéritique à l'échelle du paysage, et donc d'étudier les répartitions et les épaisseurs de chaque horizon en fonction

du modelé, vallée et plateau, et de la roche-mère, granite et schiste.

Ainsi à part la lithomarge saturée présente en chaque station, sur tout le secteur, et avec une épaisseur relativement constante, les autres horizons du profil d'altération ont des répartitions et des épaisseurs variables.

Le secteur granitique apparaît plus homogène et plus uniforme que le secteur schisteux, sans qu'il y ait de différence systématique entre les profils. Sur schiste, les niveaux argileux de la zone non saturée sont les plus discontinus d'une station à l'autre. Ces variations latérales correspondent à des contrastes de faciès d'altération et de teneur en eau liés aux hétérogénéités de la roche-mère..

Les principales différenciations des profils observées sont en relation avec les deux unités du modelé, les vallées et les plateaux. Les profils de plateau sont en moyenne nettement plus épais (85m) que ceux des vallées (60m), à cause de l'épaississement des niveaux argileux non saturés (argiles tachetées, lithomarges non saturées "résistante" et "conductrice"). Et le cuirassement est plus développé sur les plateaux que dans les vallées.

Les coupes géoélectriques montrent clairement que les profils d'altération des plateaux sont entaillés au niveau des talus : les vallées se mettent donc en place lors de phase d'érosion mécanique majeure par enfoncement du réseau hydrographique. Les profils des vallées sont donc des profils de plateau tronqués. De plus, on distingue deux générations de vallées : la vallée la plus ancienne, c'est-à-dire la vallée principale du Kokoyon, se distingue des vallées plus jeunes par la présence d'un glacis cuirassé relativement important dû à une reprise de l'altération latéritique.

Dans un paysage latéritique comme celui de Banankoro, les phases de déséquilibre pédobioclimatique favorisent le développement des vallées qui mettent en relief les plateaux par enfoncement du réseau hydrographique et façonnent donc les deux unités du paysage actuel, les vallées et les plateaux.



## CONCLUSIONS GENERALES

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'application de la méthode du sondage électrique (SE) pour analyser l'organisation interne d'une ancienne couverture latéritique très cuirassée en Afrique de l'Ouest. Il s'agit d'abord de caractériser et d'identifier les différents niveaux géoélectriques qui se superposent dans des profils d'altération latéritique épais ( $> 50\text{m}$ ), pour étudier ensuite leurs variations spatiales à l'échelle de l'unité du modelé topographique sur un secteur de quelques dizaines de kilomètres carrés. Le site d'étude est centré sur un plateau allongé et ses vallées adjacentes, en bordure de la plaine du Niger, au Mali. A notre connaissance, c'est la première fois que cette méthode est utilisée de façon systématique avec une aussi forte densité de station, 127 sur environ  $50\text{ km}^2$ . Chaque SE a été interprété par un modèle tabulaire qui permet de décomposer le profil d'altération en une séquence verticale d'horizons superposés, caractérisés par leur épaisseur et leur résistivité. Les résultats obtenus mettent en évidence les différenciations latérales des niveaux géoélectriques à l'échelle du paysage en fonction de la morphologie du relief, vallée et plateau, ainsi qu'en fonction du type de roche-mère, schiste et granite.

### CARACTERISTIQUES GEOELECTRIQUES DES PROFILS LATERITIQUES

#### Les courbes de résistivité apparente

Les résistivités apparentes des profils d'altération ont été mesurées par un dispositif Schlumberger à différentes profondeurs pour onze écartements au minimum, compris entre  $AB/2 = 2\text{m}$  et  $AB/2 = 300\text{m}$ . Globalement les SE se ressemblent, et donc à l'échelle du secteur, les profils d'altération présentent le même type d'organisation verticale. Toutes les courbes ont une forme similaire : les résistivités apparentes diminuent régulièrement à travers le profil jusqu'à un minimum, puis elles augmentent lorsque la roche-mère est atteinte. Plus précisément, on distingue sur ces courbes quatre parties successives suivant la profondeur d'investigation :

- une partie superficielle très résistante (environ  $10000\Omega\text{m}$ ) ;
- une partie médiane de résistivité intermédiaire (environ  $1000\Omega\text{m}$ ) ;
- une partie profonde conductrice (environ  $50\Omega\text{m}$ ) ;
- à grande profondeur, une partie résistante correspondant à la roche-mère (environ  $300\Omega\text{m}$ ).

Mais l'étude de ces courbes apporte déjà des résultats importants car elle montre que les distributions des résistivités apparentes présentent à moyenne profondeur des différences significatives en fonction de la morphologie du paysage : les profils des plateaux sont plus résistants et ceux des vallées sont plus conducteurs. On parvient même à distinguer quatre catégories de profil géoélectrique en séparant les SE de type "résistant" et "conducteur", à moyenne profondeur, pour chaque unité morphologique, plateau et vallée. Dans les vallées, les SE de type "conducteur" sont plutôt localisés au centre, à proximité des axes de drainage, tandis que les SE de type "résistant" sont plutôt situés en périphérie. Sur les plateaux, les SE de type "résistant" caractérisent plutôt des bombements topographiques, tandis que les SE de type "conducteur" correspondent aux zones basses du relief.

Une simulation par un modèle tabulaire théorique, montre que cette différenciation des courbes de résistivité apparente correspond en fait à un épaissement de la partie résistante intermédiaire du profil, en relation avec la topographie de surface, depuis le centre des vallées jusqu'aux sommets des

plateaux. Les SE de la périphérie des vallées et ceux des zones basses des plateaux sont relativement plus proches entre eux que de ceux du centre des vallées ou des zones hautes des plateaux, ce qui tend à prouver une certaine continuité des profils d'altération entre les vallées et les plateaux, du moins quand la dénivelée du talus n'est pas trop forte.

### Les caractéristiques des huit niveaux géoélectriques

Les SE ont été interprétés par modèle tabulaire en se recalant sur les résultats de sondages magnéto-telluriques réalisés sur les mêmes stations de mesures, car la couverture latéritique est beaucoup trop épaisse pour que des puits atteignent la roche-mère, même sous les vallées. On met ainsi en évidence huit niveaux géoélectriques superposés le long d'un profil depuis la surface jusqu'à la roche-mère (Figure 115) :

- 1- L'horizon meuble de recouvrement, formé par les blocs et les gravillons ferrugineux issus du démantèlement de la cuirasse et de la carapace, et par les matériaux argilo-sableux remontés à la surface par les termites, présente des résistivités extrêmement variables :  $6700 \pm 9700 \Omega m$ .
- 2- La cuirasse ferrugineuse aux faciès massif, pseudo-nodulaire et nodulaire sur les plateaux, et massif scoriacé sur les glacis, est le niveau le plus résistant rencontré à Banankoro :  $18000 \pm 83000 \Omega m$ .
- 3- La carapace ferrugineuse, qui est soit massive sous les plateaux, soit nodulaire sous les glacis, est nettement moins résistante que la cuirasse :  $4500 \pm 2400 \Omega m$ .
- 4- Les argiles tachetées marquant le début des processus de ferruginisation par la formation de plages argileuses rouges au sein d'une matrice argileuse grise, présentent des résistivités de  $1100 \pm 1000 \Omega m$ .
- 5- Une lithomarge non saturée dite "résistante" constituée par un ensemble argileux clair de kaolinite où la plupart des structures de la roche-mère sont conservées, a des résistivités de  $650 \pm 600 \Omega m$ .
- 6- Une lithomarge non saturée dite "conductrice" de même nature que la précédente, mais dont la résistivité n'est que de  $190 \pm 65 \Omega m$ .
- 7- La lithomarge saturée, baignée par la nappe phréatique présente à la base du profil d'altération, se caractérise par les plus faibles résistivités :  $23 \pm 13 \Omega m$ .
- 8- La roche-mère plus ou moins saine, dont les résistivités sont de  $430 \pm 380 \Omega m$ .

Les trois premiers niveaux, les plus superficiels, ont des épaisseurs métriques : leur identification a pu se faire directement soit d'après les affleurements, soit d'après les profils de puits. Les cinq niveaux inférieurs ont des épaisseurs décamétriques et sont donc profonds. Leur caractérisation et leur identification sont faites indirectement d'après les carottes des forages qui ont été réalisés sur le secteur d'étude et par comparaison avec les résultats d'autres études réalisées sur les latérites par SE.

Pour la carapace, les argiles tachetées et la lithomarge non saturée "résistante", la dispersion des valeurs de résistivité apparente est relativement faible car leurs résistivités ont été homogénéisées autour d'une valeur caractéristique moyenne afin de faciliter l'interprétation en appliquant pour ces horizons un principe de continuité électrique d'une station à l'autre, avec des résistivités relativement uniformes et des variations d'épaisseur plus significatives.

C'est sans doute à cause des fortes épaisseurs du profil d'altération, ainsi que de la grande profondeur de la nappe que l'on a pu distinguer autant de niveaux géoélectriques pour le profil d'altération, alors que dans les travaux précédents le profil ne comprend que trois ou quatre niveaux.

A l'exception de la lithomarge saturée, toujours présente à la base du profil d'altération et dont l'épaisseur est relativement constante (environ 36m), les autres niveaux du profil latéritique ont des répartitions et des épaisseurs très variables. On observe d'ailleurs rarement une séquence complète avec l'ensemble des huit niveaux, comme celle de la figure 115.

Au sommet du profil, les horizons les plus évolués, cuirasse, carapace et argiles tachetées, présentent une assez large extension à l'échelle du secteur (70 à 80% de la superficie totale), mais les profils apparaissent nettement plus complets et plus épais sous les plateaux que dans les vallées. Ces variations s'expliquent donc par un processus d'érosion différentielle qui décape plus ou moins profondément les

horizons superficiels du profil d'altération.

En revanche, dans les vallées, l'horizon meuble de recouvrement est nettement plus étendu et plus épais que sous les plateaux. De plus, la cuirasse s'amincit et tend à disparaître lorsque l'épaisseur du recouvrement augmente. Cette zonalité inverse de distribution de ces deux horizons résulte certainement de deux processus distincts. Il y a d'abord un effet d'accumulation des sédiments fins silto-argileux, transportés par le ruissellement superficiel pendant la saison des pluies, dans les dépressions de la surface topographique découpée par l'érosion. L'horizon de recouvrement, qui peut atteindre plusieurs mètres d'épaisseur, évolue ensuite sur place par développement d'un milieu hydromorphe, responsable de la dégradation chimique de la cuirasse (FREYSSINET, 1990).

De plus, ces deux niveaux superficiels présentent des résistivités élevées avec de larges intervalles de variation qui se recouvrent en partie, si bien que la cuirasse n'est pas toujours facilement identifiable sous un horizon de recouvrement épais.

L'horizon des argiles tachetées s'épaissit considérablement sous les plateaux, et il atteint fréquemment plus de 20m sur le secteur granitique à l'Ouest, et plus de 40m sur le secteur schisteux à l'Est. Ces épaisseurs paraissent nettement surestimées par rapport aux mesures effectuées sur les profils de puits (15m au maximum). La limite inférieure établie pour ce niveau géoélectrique semble descendre plus bas que celle repérée sur le terrain pour cet horizon, et elle englobe aussi la partie supérieure relativement plus résistante de la lithomarge. L'apparition des taches ferrugineuses caractéristiques ne correspond sans doute pas à un contraste très net de résistivité. La méthode géoélectrique serait plus sensible vis-à-vis d'autres paramètres physiques, comme la porosité et la teneur en eau, ce qui modifie les critères de distinction et les limites apparentes entre les horizons.

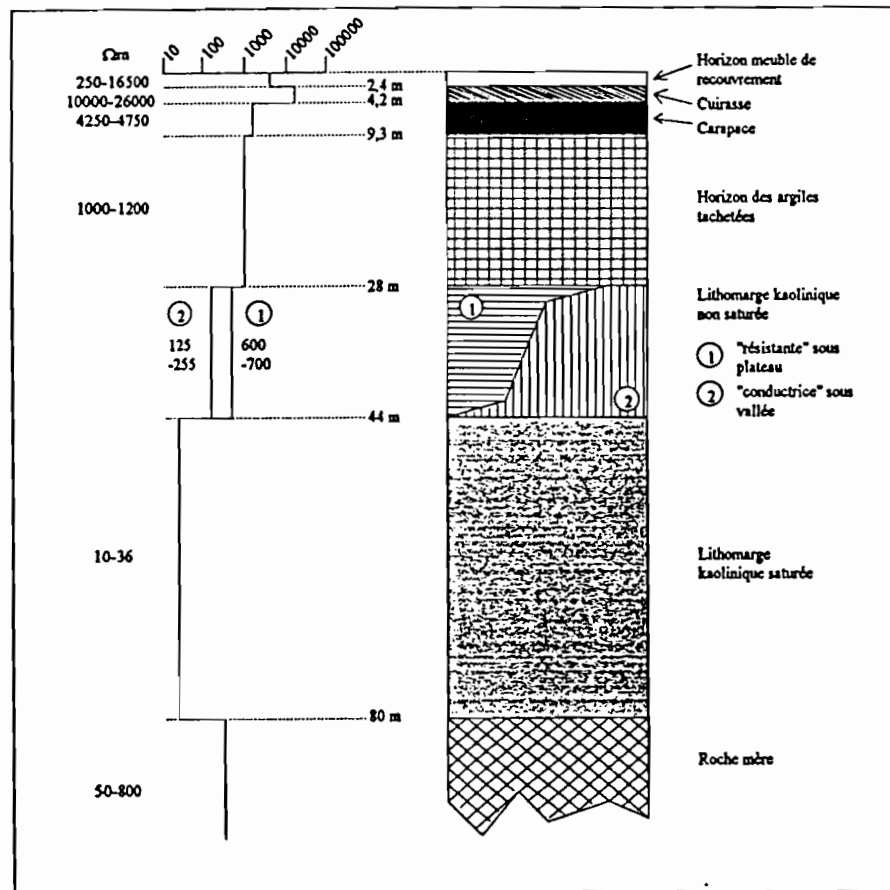


Figure 115 : Schéma d'un profil géoélectrique complet du secteur de Banankoro, avec les intervalles de dispersion des résistivités et les profondeurs moyennes de chaque niveau.

La distinction des deux niveaux, "résistant" et "conducteur", de la lithomarge non saturée traduit essentiellement une différenciation latérale au sein de cet horizon : le niveau "conducteur" apparaît très



localement, il se développe dans les vallées du secteur schisteux où il tend à remplacer le niveau "résistant". Il se prolonge fréquemment de part et d'autre des vallées sous le niveau "résistant" en bordure de plateau. La signification de cette différenciation de la lithomarge non saturée n'est pas clairement élucidée, elle marque peut-être un assèchement moins important de la lithomarge dans certaines parties des vallées au cours de la saison sèche.

Les résultats de cette étude montrent que la cartographie par SE est une méthode de reconnaissance efficace pour analyser la structure des couvertures latéritiques cuirassées. Des investigations complémentaires permettraient sans doute de préciser la signification des limites observées entre les horizons, notamment dans la zone argileuse non saturée :

- des diagraphies électriques dans des trous de forages carottés permettraient de suivre les variations de résistivité verticales en fonction des paramètres pétrographiques des horizons du profil d'altération ;
- une série chronologique de mesures étalées sur un cycle climatique annuel, pour quelques SE, serait également intéressante pour suivre l'évolution du profil hydrique sur les courbes de résistivité apparente.

## DIFFERENCIATION LATÉRALE DES COUVERTURES LATÉRITIQUES A L'ECHELLE D'UN INTERFLUVE

### Lithodépendance du profil d'altération

L'interprétation des SE ne met pas en évidence de différence systématique entre les profils d'altération développés sur les deux types de roche-mère, schiste et granite, identifiés sur le secteur par les sondages magnéto-telluriques (PHAM *et al.*, 1989). On note cependant que seules les argiles tachetées ont tendance à s'épaissir sur le secteur schisteux par rapport au secteur granitique. De plus, la lithomarge non saturée "conductrice" est présente localement sur le secteur schisteux, mais n'est jamais observée sur le secteur granitique, sauf pour une station isolée.

Cependant à l'échelle du paysage, les profils géoélectriques du secteur granitique sont plus homogènes : les différents niveaux qui forment le profil d'altération sont plus continus et ont des épaisseurs plus uniformes que sur schiste. Ce sont les horizons argileux non saturés, (argiles tachetées, lithomarges "résistante" et "conductrice"), qui ont les répartitions et les épaisseurs les plus variables sur schiste. De plus, la topographie du toit du granite forme globalement un vaste bombement à l'échelle du secteur, alors que celle du toit des schistes est beaucoup plus irrégulière : elle présente plusieurs bombements et dépressions. Ces variations reflètent sans doute en partie la structure hétérogène de la roche-mère sur le secteur schisteux : elle appartient en effet à une série volcano-sédimentaire formée par des alternances de schistes plus ou moins gréseux et de tufs, traversée par un large couloir de fracturation avec un réseau de quartz filonien très développé. Ces hétérogénéités peuvent donc induire localement des changements importants dans les teneurs en eau des différents horizons et donc des variations importantes des niveaux géoélectriques d'une station à l'autre.

Sur le plateau de Banankoro, à proximité d'importantes anomalies en or et arsenic, les SE mettent en évidence une structure linéaire correspondant à un approfondissement notable du profil d'altération (> 100m), au niveau du layon L2. Le couloir de fracturation ainsi révélé montre l'intérêt de la méthode du SE comme outil de prospection tactique en milieu latéritique.

### Morphodépendance du profil d'altération

Les différenciations du profil d'altération latéritique, sur le secteur de Banankoro, sont clairement associées aux variations de la morphologie de surface. Les profils de plateau apparaissent nettement plus épais (environ 85m) que les profils de vallée (environ 60m).

Il y a donc une tendance générale à la rectification du modelé de surface, avec un effacement du contraste morphologique entre plateau et vallée au niveau du toit de la roche-mère, à la base du profil d'altération.

Mais le contraste entre les deux unités morphologiques, plateau et vallée, est nettement plus fort pour les horizons intermédiaires de la zone non saturée, depuis la carapace jusqu'à la lithomarge, que pour les autres horizons.

Les coupes géoélectriques montrent clairement que les talus en bordure des plateaux correspondent à

une entaille de la partie supérieure du profil d'altération. Les reliefs formés par les plateaux actuels ont donc été dégagés par un enfoncement du réseau hydrographique et l'élargissement des vallées au cours d'une phase d'érosion mécanique intense. Ce processus d'érosion est également responsable de la mise en place des placers aurifères alluviaux dans les vallées (FREYSSINET, 1990).

La présence d'un glacis cuirassé dans les vallées du réseau hydrographique principal, comme celle du Kokoyon, indique que cette phase d'érosion majeure est ancienne et a été suivie par une reprise de l'altération latéritique favorisant le développement d'une nouvelle génération de cuirasse au sommet des profils tronqués des vallées.

La cartographie géoélectrique montre que les cuirasses les plus anciennes, conservées à la surface des plateaux, ont une extension plus large que les glacis cuirassés des vallées, mais leur épaisseur maximum (3 à 4m) n'est pas plus forte contrairement à celle de la carapace en-dessous. Cette similitude d'épaisseur entre les deux générations de cuirasse, se retrouve d'ailleurs au niveau de leur composition et notamment de leur teneur en fer (FREYSSINET, 1990). Ceci confirme que le développement du cuirassement au sommet du profil d'altération a été plus rapide dans les vallées que sur les plateaux. Cette différence s'explique notamment par un développement, une dégradation et une érosion plus intense des cuirasses affleurantes à la surface des plateaux, au relief plus accentué.

L'absence de glacis cuirassé dans les petites vallées du réseau hydrographique secondaire s'explique sans doute par un développement plus récent, lié à la progression du processus d'érosion régressive en bordure de plateau.

La tendance à la rectification de la morphologie de surface à la base du profil d'altération n'est pas systématique, et le relief du bedrock est aussi accentué que celui de la surface. D'un secteur à l'autre de la zone d'étude, on observe plusieurs types de transformation du relief par altération différentielle, allant de la conservation jusqu'à l'inversion des dénivelées de la surface topographique et du bedrock :

- A l'Ouest, sur le secteur granitique, les profils sont relativement uniformes et le relief du mont Koro Nidjan est bien préservé. On observe cependant une inversion de relief sur ce secteur, liée à l'entaille d'un bombement topographique par la vallée de Guilingoué.

- A l'Est, sur le secteur schisteux, les profils d'altération sont plus hétérogènes et on observe deux exemples d'inversion correspondant à une altération profonde le long d'une structure minéralisée, et à une remontée du toit de la roche-mère sous les vallées près du Niger.

Ainsi à l'échelle du secteur d'étude, l'enfoncement du front d'altération apparaît très irrégulier et ne montre pas de tendance vers une régularisation du relief suivant le concept de nivellement hydrostatique, illustré par les schémas d'aplanissement du substratum des régions tropicales (MILLOT *et al.*, 1977 ; MILLOT, 1983). La rectification de la morphologie de la surface, qui tend à effacer les reliefs des plateaux, n'est pas uniforme et elle s'accompagne d'une transformation importante du modelé topographique à la base du profil d'altération. Dans ce cas, le rôle de l'altération pourrait conduire vers l'émergence d'une morphologie nouvelle, indépendante du relief actuel. Cette évolution potentielle ne se réalisera effectivement qu'après démantèlement des horizons indurés, cuirasse et carapace, puis ablation des horizons d'altération argileux jusqu'à la base de la lithomarge. Elle nécessite donc un changement de climat vers des conditions plus arides (TARDY, 1993), entraînant un déséquilibre pédobioclimatique, marqué par l'accentuation des processus d'érosion mécanique en surface et le ralentissement des processus d'altération en profondeur.

### Evolution du paysage latéritique

D'après le schéma général proposé par TARDY (1993) sur la biogéodynamique du paysage tropical, les profils latéritiques du secteur de Banankoro font partie des témoins des altérations, des pédogenèses et des érosions qui ont affecté l'Afrique de l'Ouest, sous des climats qui ont évolués depuis une tendance tropicale humide du Crétacé à l'Eocène à une tendance contrastée pendant toute la seconde partie du Tertiaire.

Ainsi l'histoire du secteur de Banankoro commence à la fin de l'Eocène : un profil d'altération de type sol latéritique meuble s'est développé sur des roches acides et sous un climat chaud et humide. Il fonctionne depuis déjà plusieurs millions d'années, et il a donc une épaisseur relativement importante. La nappe est assez profonde et le milieu est bien drainé. Le modelé est proche des demi-oranges du domaine tropical (bloc diagramme A).

A partir de l'Oligocène, le climat devient contrasté. Le profil d'altération évolue : les sols tachetées

et/ou nodulaires se mettent en place et, sous l'effet de la durée des conditions climatiques, ils vont jusqu'à former des carapaces puis des cuirasses ferrugineuses qui ont sans doute recouvert tout le paysage. Les horizons s'enfoncent verticalement les uns dans les autres, il y a approfondissement et épaissement du profil d'altération. La profondeur de la nappe augmente. Le modelé s'adoucit à cause du cuirassement (bloc diagramme B).

Une phase majeure de déséquilibre pédobioclimatique, où l'érosion mécanique l'emporte sur l'érosion chimique, provoque l'enfoncement des vallées. Les horizons indurés sont démantelés, et les horizons argileux supérieurs sont décapés. Un talus se forme et les parties restées intactes du paysage sont mises en relief sous forme de plateaux (bloc diagramme C). Cet abaissement du niveau de base peut-être soit d'origine climatique, et correspondre à une phase plus aride, soit d'origine tectonique, et être provoquée par un surélévement.

Puis les conditions initiales sont à nouveau réunies, et il y a reprise du cuirassement, qui se développe dans les vallées sur des profils tronqués et qui continue sur les plateaux. L'enfoncement vertical des horizons reprend, et le profil s'épaissit (bloc diagramme D).

Mais le climat est de plus en plus contrasté, et il a tendance à s'assécher. La nappe devient très profonde. L'érosion mécanique commence localement à l'emporter sur l'érosion chimique et à marquer le modelé : les talus reculent, en conséquence de quoi les anciennes vallées s'élargissent, mais ne s'approfondissent pas, et les plateaux se réduisent. Le recul des talus dans les plateaux peut aller jusqu'à la formation de nouvelles vallées. Les bombements des plateaux portent aussi mais très localement des traces d'érosion : le cuirassement est biseauté, démantelé par des cirques et des gouttières d'érosion (bloc diagramme E).

Globalement, le secteur de Banankoro correspond à la longue évolution d'un profil latéritique sous un climat tropical contrasté persistant sur toute la seconde moitié du tertiaire. Les plateaux de la région en sont les témoins vivaces, car ils sont le trait majeur du paysage en couvrant encore de larges superficies. Les mises en place des vallées restent des épisodes brefs et restreints, qui n'aboutissent pas à la formation d'une nouvelle surface d'aplanissement.

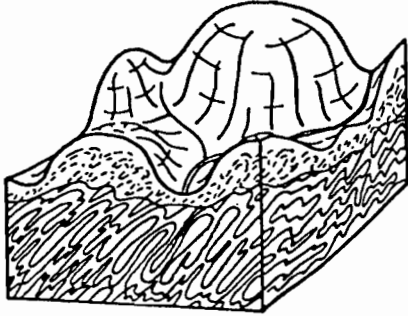
## PERSPECTIVES

Pour compléter l'étude du secteur de Banankoro, il faudrait encore délimiter l'extension du granite avec un réseau plus resserré de station comme sur les schistes ; et il faudrait aussi étudier les prolongements du profil d'altération jusque dans la plaine du Niger même, en particulier pour les vallées cuirassées. On pourrait aussi réaliser une étude plus régionale, depuis les monts Mandingues au Nord, où des bauxites se sont formées sur des dolérites, jusqu'à la plaine du Niger, le long d'un transect, toujours en association avec les sondages magnéto-telluriques afin de caractériser les grands domaines d'altération qui se succèdent de l'amont vers l'aval en fonction de la morphologie du paysage, du réseau hydrographique (bassin du Sénégal et celui du Niger) et des roches-mères.

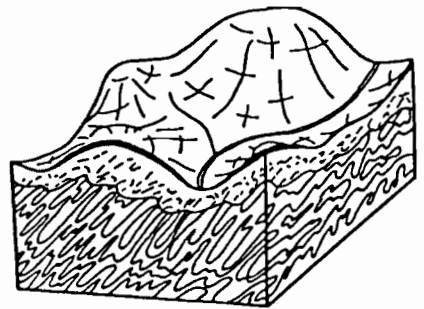
Cette méthode peut encore être appliquée de manière plus fine, pour l'étude des niveaux les plus superficiels comme le cuirassement en fonction de l'état de surface (végétation, pente, recouvrement, termitière), ou bien comme les changements temporels de résistivité du profil en fonction des données climatiques, et surtout en fonction des précipitations pour suivre l'infiltration de l'eau à travers le profil, on peut encore suivre l'évolution des résistivités des niveaux superficiels en fonction de l'état de la végétation (développement, croissance, stress hydrique).

En complément à ces études, il faut alors acquérir de nouvelles données, par des mesures directes de résistivité dans les puits, les fosses ou les forages selon la profondeur du problème étudié, de manière à obtenir les meilleurs recalages possibles directement sur le terrain. Dans le même but, il faut aussi effectuer des mesures en laboratoire sur des échantillons pour étudier les changements de résistivité en fonction de différents paramètres comme la teneur en eau et la température soit comme étude préliminaire avant d'entreprendre une campagne sur le terrain, soit comme étude complémentaire afin d'expliquer certains faits observés sur le terrain.

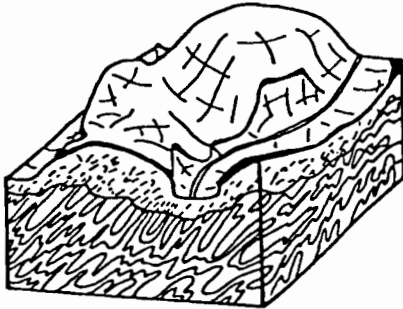
Bloc diagramme A



Bloc diagramme B



Bloc diagramme C



Bloc diagramme D



Bloc diagramme E





## BIBLIOGRAPHIE

- ALBOUY Y., PION J.C. et WACKERMANN J.M. (1970) - Application de la prospection électrique à l'étude des niveaux d'altération. *Cah. ORSTOM, sér. Géol., II, p. 161-170.*
- AMBROSI J.P., NAHON D. et HERBILLON A.J. (1986) - The epigenetic replacement of kaolinite by hematite in laterite. Petrographic evidence and the mechanisms involved. *Geoderma, 37, p. 283-294.*
- BARDOSSY G. (1982) - Karst bauxites. Bauxites deposits on carbonate rocks. *Development in Economy Geology, 14, Elsevier, Amsterdam, 441p.*
- BASSOT J.P. (1966) - Etude géologique du Sénégal Oriental et de ses confins guinéo-maliens. Thèse Fac. Sci., Clermont-Ferrand (1963), *Mém. BRGM, 40, 322p.*
- BASSOT J.P., MELVOUX J. et TRAORE H. (1981) - Notice explicative carte géologique au 1/1 500 000<sup>ème</sup> de la République du Mali. *Ed. B.R.G.M., Orléans, 137p..*
- BERNARDI A. et MOUTON J. (1980-81) - Les recherches d'eau dans le socle africain. Apport de la géophysique. *Bull. BRGM, série 2, section III, 4, p. 293-309.*
- BESSELES B. (1977) - Géologie de l'Afrique. Le Craton ouest Africain. *Mém. B.R.G.M., 88, 402 p.*
- BLACK R. (1967) - Sur l'ordonnance des chaînes métamorphiques en Afrique Occidentale. *Chron. Mines, 364, p. 225-238.*
- BLOT A., LEPRUN J.C. et PION J.C. (1976) - Originalité de l'altération et du cuirassement des dykes basiques dans le massif de Saraya (Sénégal oriental). *Bull. Soc. géol. Fr., 18, p. 45-49.*
- BLOT A., LEPRUN J.C. et PION J.C. (1978) - Corrélations géochimiques entre les cuirasses ferrugineuses et les roches du socle cristallin au Sénégal et en Haute-Volta. Lithodépendance et héritage géochimique. *C. R. Acad. Sci., Paris, sér. D, 286, p. 1331-1334.*
- BOCQUIER G., MULLER J.P. et BOULANGE B. (1984) - Les latérites. Connaissances et perspectives actuelles sur les mécanismes de leur différenciation. Livre jubilaire du cinquantenaire de l'AFES, Paris, p. 123-138.
- BOEGLIN J.L. (1990) - Evolution minéralogique et géochimique des cuirasses ferrugineuses de la région de Gaoua. Thèse Sci., Univ. L. Pasteur, Strasbourg, 175p.
- BONHOMME M. (1962) - Contribution à l'étude géochronologique de la plate-forme Ouest-Africaine. Thèse Fac. Sci., Clermont-Ferrand, 5, 62p.
- BOULANGE B. et CARN M. (1971) - Prospection électrique appliquée à l'étude des cuirasses en Côte d'Ivoire. *Rapp. ORSTOM, Adiopodoumé, 14 p.*
- BOULET R. (1978) - Existence de systèmes à forte différenciation latérale en milieu ferrallitique guyanais : un nouvel exemple de couvertures pédologiques en déséquilibre. *Sci. Sol, 2, p. 75-82.*
- BOURDEAU A. (1991) - Les bauxites du Mali. Géochimie et minéralogie. Thèse Géologie, Univ. L. Pasteur, 294p.
- BRUNET-MORET Y., CHAPERON P., LAMAGAT J.P. et MOLINIER M. (1986) - Monographie hydrologique du fleuve Niger. T. I - Niger supérieur. T. 2 - Niger moyen. *Monographies hydrologiques, Ed. ORSTOM, Paris, 8, 396p.*
- BUCHSTEIN M., CISSE S. et SISSOKO I. (1973) - Recherches géologiques et minières dans la région de Bougouni-Sikasso-Yanfolila. Rapport de fin de campagne 1972-1973. *Rapp. BRGM 73 DAK 001 (inédit). Arch. Min. Dével. ind. et T.P., République du Mali.*
- BUCHSTEIN M., CISSE S., MAILLARD J. et LESAGE P. (1973) - Recherches géologiques et minières dans la région de Bougouni-Sikasso-Yanfolila. Rapport de fin de campagne 1973-1974. *Rapp. BRGM 74 DAK 001BIS (inédit). Arch. Min. Dével. ind. et T.P., République du Mali.*

- CAGNIARD L. (1953) - Principe de la méthode magnéto-tellurique, nouvelle méthode de prospection géophysique. *Ann. Géophys.*, 9, p. 95-125.
- CARRERE J.M. (1974) - Fracturation dans les grès du Protérozoïque supérieur des Monts Mandingues (Mali). *Bull. Soc. géol. Fr.*, XVI, 5, p. 570-574.
- CARRERE J.M. (1975) - Le Mali géologique dans son contexte ouest-africain. Publ. multigr., 2 vol., Bamako, Mali, 270p.
- Carte topographique à 1/200 000 Bamako-ouest, feuille ND-29-Iv. Ed. Inst. Nat. Géogr., Paris, 1961.
- Carte topographique à 1/200 000 Yanfolila, feuille NC-29-XXII. Ed. Inst. Nat. Géogr., Paris, 1964.
- CHUDEAU R. (1910) - Note sur la géologie du Soudan. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 4, 10, p. 317-332.
- COTTARD P., DOMMANGET A., KEITA M. et ZEEGERS H. (1981) - Prospection d'or. Campagne 1975-1981. District de Kangaba. *Rapp. B.R.G.M.*, 81 RDM 003 AF (inédit).
- COUTURE R. (1968) - Carte géologique au 1/500 000, feuille odienné. Dir. Mines Géol. Côte-d'Ivoire, Abidjan.
- DELAITRE E., ROQUIN C., NOVIKOFF A., PHAM V.N. et TARDY Y. (1993) - Caractérisation d'une couverture latéritique épaisse par sondage électrique dans la région de Kangaba au Sud-Mali. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 316, Série II, p. 1587-1593.
- DORBATH C., FROIDEVAUX P., BLOT A. et CARN M. (1975) - Application des propriétés de résistivité des terrains d'altération à la connaissance de la tectonique du massif de Saraya (Sénégal Oriental). *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, VII, p. 111-123.
- ENGALENC M. (1978) - Méthode d'étude et de recherches de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. *C.I.E.H., Géohydraulique*, 299 p.
- ESCHENBRENNER V. (1987) - Les glébules des sols de Côte-d'Ivoire. Thèse Univ. Bourgogne, Dijon, 1, 498p. ; 2, 282p.
- FREYSSINET P. (1990) - Géochimie et minéralogie des latérites du Sud-Mali. Evolution du paysage et prospection géochimique de l'or. Thèse Sci., Géol., univ. L. Pasteur, Strasbourg (1990). *Doc. BRGM*, 203, 277p.
- FRITZ B. (1975) - Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. *Sci. Géol. Mém.*, strasbourg, 41, 152p.
- FURON R. (1960) - Géologie de l'Afrique. 2<sup>ème</sup> édit. Payot (Ed.), Paris, 400p.
- GAC J.Y. (1980) - Géochimie du bassin du lac Tchad. Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation. *Trav. Doc. ORSTOM*, Paris, 123, 251p.
- GAC J.Y. et TARDY Y. (1980) - Géochimie d'un paysage tropical. Le bassin du lac Tchad. In "Géochimie des interactions entre les eaux, les minéraux et les roches", TARDY Y. (Ed), SARL, Eléments, Tarbes, p.199-239.
- GOLOUBINOW R. (1936a) - Géologie et ressource en or du Nord-Est de la Guinée Française. *Thèse Sciences, Univ. Nancy*, 140 p.
- GOLOUBINOW R. (1936b) - Notice carte géol. au 1/1 500 000<sup>ème</sup> Kankan-Est. *Serv. Carte Géol. A.O.F.*, NC 29.
- GOLOUBINOW R. (1938) - Relations des terrains métamorphiques redressés et des granites dans la région guinéo-soudanaise. *Bull. Serv. Mines AOF, Dakar*, 1, p. 83-88.
- GOLOUBINOW R. (1947) - Carte géologique de reconnaissance de l'AOF à 1/500 000. Feuille de Bougouni Ouest. *Serv. Mines AOF, Dakar*.
- GOLOUBINOW R. (1950a) - Notice explicative sur la feuille Bougouni Ouest. Carte géol. de reconnaissance à 1/500 000. *Gouvern. Génér. AOF, Dakar*, 23p.
- GOLOUBINOW R. (1950b) - Notice explicative sur la feuille Kankan Est. Carte géol. à 1/500 000. *Gouvern. Génér. AOF, Dakar*, 28p.
- GOLOUBINOW R. et NICKLES M. (1946) - Notice explicative de la carte géologique de reconnaissance à 1/500 000. Feuille Kankan Ouest. Levés effectués de 1931 à 1939. *Gouvern. Génér. AOF, Imp. Nat.*, Paris, 29p.
- GRANDIN G. (1976) - Aplaniissement cuirassés et enrichissement des gisements de Mn. *Mém. ORSTOM*, 82, 268p.
- GRANIER C. (1980) - Biogéographie. Atlas du Mali, Ed. Jeune Afrique, Paris, p. 18-22.
- KAMATE C. (1980) - Climat. Atlas du Mali, Ed. Jeune Afrique, Paris, p. 14-17.
- KHALAF A.M. (1986) - Essai de caractérisation des minerais métalliques par les propriétés électriques. *Thèse Sciences, Géophysique, I.N.P.L. Nancy*, 161 p.



- KOBILSEK B. (1990) - Géochimie et pétrographie des bauxites latéritiques d'Amazonie brésilienne. Comparaison avec l'Afrique, l'Inde et l'Australie. Thèse Sciences, Géologie, Univ. L. Pasteur, Strasbourg, 189p.
- LASFARGUES P. (1957) - Prospection électrique par courants continus. Carte de potentiel, résistivité, polarisation spontanée, polarisation induite. *Manuel de prospection géophysique*, Ed. Masson, Paris, 290 p.
- LEGOUX P. (1939) - Esquisse géologique de l'Afrique Occidentale française. *Bull. Serv. Mines AOF, Dakar*, 4, 134p.
- LENEUF N. (1959) - L'altération des granites calco-alkalins et des granodiorites en Côte-d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. Thèse Sci., Paris, 210p.
- LEPRUN J.C. (1979) - Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche : genèse, transformations, dégradation. *Thèse Sciences, Géologie, Univ. Strasbourg*, 203 p. ; *Mém. Sci. Géol., Strasbourg*, 58, 224 p.
- LEROUX M. (1980) - Le climat de l'Afrique tropicale. Thèse Lettres, Géographie, Univ. Dakar, 1427p.
- LUCAS Y. (1989) - Systèmes pédologiques en Amazonie brésilienne. Equilibres, déséquilibres et transformations. Thèse Univ. Poitiers, 157p.
- MARSAL D. (1987) - Statistics for Geoscientists. Pergamon Press, Oxford, 156p.
- MATHIEZ J.P. et HUOT G. (1966) - Prospection géophysique et recherches d'eaux souterraines. Exemples d'application en Afrique Occidentale. *C.I.E.H., série Hydrogéologie*, 154 p.
- Mc FARLANE M.J. (1976) - Laterite and landscape. Academic press, London, 151p.
- MECHLER P. (1982) - Les méthodes de la géophysique. *Dunod Université, Bordas, Paris*, 200 p.
- MICHEL P. (1973) - Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. *Mém. ORSTOM, Paris*, 63, 1, 2, 3, 752p.
- MICHEL P. (1980) - Relief. Atlas du Mali, Ed. Jeune Afrique, Paris, p. 6-9.
- MILESI J.P., FEYBESSE J.L., LEDRU P., DOMMANGET A., OUEDRAOGO M.F., MARCOUX E., PROST A., VINCHON C., SYLVAIN J.P., JOHAN V., TEGYEY M., CALVEZ J.Y. et LAGNY P. (1989) - Les minéralisations aurifères d'Afrique de l'Ouest. Leur évolution lithostructurale au Protérozoïque inférieur. *Chron. rech. min.*, 497, p. 3-98.
- MILLOT G. (1964) - Géologie des argiles. Masson, Paris, 499p.
- MILLOT G. (1977) - Géochimie de la surface et formes du relief. Présentation. *Sci. Géol., Bull., strasbourg*, 30, p. 229-233.
- MILLOT G. (1983) - Planation of continents by intertropical weathering and pedogenetic processes. In "Laterisation Processes", Melfi J.A. and Carvalho A. (Eds), Sao Paulo, (USP), Brésil, p. 53-63.
- MORICE F. et CHARTIER E. (1954) - Méthode statistique. Analyse statistique. *Inst. Nat. Stat., Paris*, t. II, 508p.
- NABIGHIAN M.N. and ELLIOT C.L. (1976) - Negative induced polarisation effects from layered media. *Geophysics*, 41, p. 1236-1255.
- NAHON D. (1986) - Evolution of iron crusts in tropical landscapes. COLMAN S.M. and DETHIER D.P. (Eds), Rates of Chemical Weathering of Rocks and Mineral, Academic Press, London, p. 169-191.
- NAHON D. et LAPPARTIENT J.R. (1977) - Time factor and geochemistry in iron crust genesis. *Catena*, 4, p. 249-254.
- OBERMULLER A. (1941) - Description pétrographique et étude géologique de la région forestière de la Guinée française. Thèse Sci., univ. Alger, 186p.
- ORANGE D. (1990) - Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique. Thèse Sciences, Géologie/Géochimie, Univ. L. Pasteur, Strasbourg, 203p.
- OULOLOGUEM, CAMARA, DIANE et TRAORE (1991) - Carte du plateau de Banankoro (cercle de Kangaba, Mali) au 1/10000<sup>ème</sup>. Programme "Latérite", ORSTOM-Bamako (inédit)
- PALACKY G.J. and KADEKARU K. (1979) - Effet of tropical weathering on electrical and electromagnetic measurements. *Geophysics*, 44, p. 69-88.
- PALACKY G.J., RITSEMA I.L. and DE JONG S.J. (1981) - Electromagnetic prospecting for groundwater in Precambrien terrains in the Republic of Upper Volta. *Geoph. Prospect.*, 29, p. 932-955.
- PARASNIS D.S. (1956) - The electrical resistivity of some sulfide and oxide minerals and their ores. *Geoph. Prospect.*, 4, p. 249-278.
- PARRISH J.T., ZIEGLER A.M. and SCOTese C.R. (1982) - Rainfall patterns and the distribution of coals and evaporites in the Mesozoic and Cenozoic. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 40, p. 67-101.
- PEREBASKINE V. (1932) - Contribution à l'étude géologique du Soudan oriental. Thèse, univ. Strasbourg.



- PERIC M. (1981) - Exploration of Burundi nickeliferous laterites by electrical methods. *Geoph. Prospect.*, 29, p. 274-287.
- PHAM V.N. et BOYER D. (1988) - Propriétés électriques et structure des différentes formations latéritiques et du substratum dans le secteur de Banankoro (Sud Mali) d'après les résultats de cartographie magnéto-tellurique. *C.R. ATP "Latérites"/CNRS, LA.GAS, ENSG, Nancy*, 64 p.
- PHAM V.N., BOYER D., FREYSSINET P. et TARDY Y. (1988) - Cartographie magnéto-tellurique des profils d'altération épais. Relations entre la nature et la structure du substratum profond et la morphologie du paysage latéritique au Sud Mali. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 307, série II, p. 1355-1362.
- PHAM V.N., BOYER D., NOVIKOFF A. et TARDY Y. (1989) - Distinction par les propriétés électriques de deux types de roche-mère sous une épaisse couverture latéritique au Sud Mali. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 309, série II, p. 1287-1293.
- PION J.C. (1979) - Altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale sèche. Etude de quelques toposéquences en Haute-Volta. *Thèse Sciences, Géologie, Univ. strasbourg*, 202 p. ; *Mém. Sci. Géol., Strasbourg*, 57, 220 p.
- REICHELT R. (1960) - Recherches géologiques et hydrogéologiques dans la boucle du Niger-Gourma (campagne fin 1959-1960). Arch. Dir. Fédér. des T.P., Fédération du Mali, Rapp. inéd., BRGM, Dakar.
- REICHELT R. (1962a) - Géologie et hydrogéologie du Gourma. (Rapp. fin campagne 1960-1961). Arch. Minist. T.P., Mines, Hydraulique., Rép. du Niger, Rapp. inéd., BRGM, Dakar.
- REICHELT R. (1962b) - Géologie et hydrogéologie de la bordure sud-est du Gourma. (Rapp. fin campagne 1961-1962). Arch. Minist. T.P., Mines, Habitat. et Ress. Energ., Rép. du Mali, Rapp. inéd., BRGM, Dakar.
- REUCHLIN M. (1987) - Précis de statistique. Présentation notionnelle. Press. Univ. Fr., Paris, 4e éd., 251p.
- ROQUES M. (1948) - Le Précambrien de l'Afrique Occidentale française. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 5, 18, p. 589-628.
- ROQUES M. (1951) - Observations nouvelles sur le Précambrien de l'Afrique Occidentale française et du Togo. Rapp. ann. Dir. Mines AOF, Dakar, p. 22-26.
- ROQUIN C., DANDJINOUE T., FREYSSINET P. et PION J.C. (1989) - The correlation between geochemical and SPOT satellite imagery of lateritic terrain in southern Mali. In "Geochemical Exploration", Jenness S.E. (Ed), 1987. *J. Geochem. Explor.*, 32, p. 149-168.
- ROY K.K. et ELLIOT H.M. (1981) - Some observations regarding depth of exploration in D.C. electrical methods. *Geoexploration*, 19, p. 1-13.
- SCHELLMANN W. (1986) - A new definition of laterites. *Geol. Surv. India, Mém.*, 120, p. 1-7
- SEGUIN M.K. (1971) - La géophysique et les propriétés physiques des roches. *Presses de l'Université de Laval, Québec, Canada*, 561 p.
- SIMON B., BRISSET A., ROUSSEL J. et SOUGY J. (1982) - Confrontation de la télédétection (analyse numérique et analogique, téléinterprétation à petite échelle) avec la cartographie géologique classique et les données gravimétriques du Mali Sud Occidentale (Afrique de l'Ouest). *Bull. Soc. géol. Fr.*, XXIV, 1, p. 13-22.
- SPINDLER J.P. (1952) - Rapport géologique. fin de campagne 1950-1951 (feuille Bougouni Est). Arch. Dir. Mines AOF, Dakar, 124p. (inédit).
- SPINDLER J.P. (1962) - Carte géologique de reconnaissance à 1/500 000, feuille Bougouni Est. Dir. Géol. Mines Mali, Bamako.
- TARDY Y. (1969) - Géochimie de altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Mém. serv. Carte géol. Als. Lorr., Strasbourg*, 31, 199p.
- TARDY Y. (1992) - Diversity and terminology of lateritic profiles. In "Weathering, Soils and Paleosols", MARTINY I.P. and CHESWORTH W. (Eds), Elsevier, Amsterdam, p. 379-405.
- TARDY Y. (1993) - Climats, paléoclimats et biogéodynamique du paysage tropical. In "Sédimentologie et Géochimie de la Surface - Colloque à la mémoire de G. MILLOT ; 27 et 28 avril 1993", Colloques Acad. Sci. Cadas, PAQUET H. et CLAUSER N. (Eds), Strasbourg, p. 141-175.
- TARDY Y. et ROQUIN C. (1992) - Geochemistry and evolution of lateritic landscapes. In "Weathering, Soils and Paleosols", MARTINY I.P. and CHESWORTH W. (Eds), Elsevier, Amsterdam, p. 407-443.
- TARDY Y., MELFI A.J. et VALETON I. (1988) - Climats et paléoclimats tropicaux périallantiques. Rôles des facteurs climatiques et thermodynamiques : température et activité de l'eau, sur la répartition et la composition minéralogiques des bauxites et des cuirasses ferrugineuses au Brésil et en Afrique. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 306, sér. II, p. 289-295

- TARDY Y., N'KOUNKOU R. et PROBST J.L. (1989) - The global water cycle and continental erosion during Phanerozoic times. *Amer. J. Sci., The Garrels issue*, 289, p. 455-485.
- TARDY Y., KOBILSEK B. and PAQUET H. (1991) - Mineralogical composition and geographical distribution of African and Brazilian periatlantic laterites. The influence of continental drift and tropical paleoclimates during the last 150 million years and implications for india and australia. *J. African. Earth Sci.*, 12, 1/2, p. 283-295.
- TELFORD W.M., GELDART L.P., SHERIFF R.E. and KEYS D.A. (1976) - *Applied Geophysics. Cambridge University Press, 860 p.*
- TRICART J. (1965) - Rapport de la mission de reconnaissance géomorphologique de la vallée moyenne du Niger. *Mém. Inst. Fr. Afr. Noire, Dakar*, 72, 196p.
- TROMPETTE R. (1973) - Le Précambrien supérieur et le Paléozoïque inférieur de l'Adrar de Mauritanie (bordure occidentale du bassin de Taoudeni, Afrique de l'Ouest) : un exemple de sédimentation de craton. Etude stratigraphique et sédimentologique. Thèse doctorat d'état, univ. Provence, Marseille, T.1, 211p.
- VALETON I. (1972) - Bauxites. Development in soil Science. Elsevier, Amsterdam, 226p.
- VERNET Y., DAMANGO G., DIALLO M. et LARRIBE D. (1988) - Suivi de la campagne du FED, permis de Kéniéba-Kangaba (Mali). Campagne 1987-1988. Rap. BRGM 88 MLI 191, 101 p. (inédit)
- WACKERMANN J.M. (1975) - L'altération des massif cristallins basiques en zone tropicale semi-aride. Etude minéralogique et géochimique des arènes du Sénégal oriental. Conséquences pour la cartographie et la prospection. Thèse Sci., Strasbourg, 373p.
- WEBBER B.N. (1972) - Supergene nickel deposits. *Transactions, SME-American Institute of Mining Engineers Transactions*, 252, p. 333-347.

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION .....	1
<b>CHAPITRE I</b>	<b>CADRE NATUREL.....3</b>
I. Cadre climatique .....	3
A. Pluviométrie et température .....	4
B. Hygrométrie .....	6
C. Conclusion .....	6
II. Cadre géologique .....	6
A. Le Birrimien en Afrique de l'Ouest .....	6
B. Les formations birrimiennes de la région de Banankoro .....	8
1. L'unité birrimienne de Siguiri-Kankan .....	8
2. L'ensemble birrimien de Bougouni .....	9
3. La limite nord du Birrimien .....	10
III. La morphologie du paysage .....	10
A. Le bas pays .....	10
B. Les hauts plateaux .....	10
C. Le bassin du Niger .....	10
D. La région de Banankoro .....	11
E. Le secteur d'étude .....	12
1. Le plateau de Banankoro .....	12
2. Les vallées adjacentes .....	12
3. Les versants .....	16
4. Le cuirassement .....	16
5. La végétation .....	17
IV. Les latérites .....	18
A. Le profil d'altération latéritique .....	18
B. Dynamique du paysage latéritique .....	20
C. Les résultats de la géochimie et de la minéralogie obtenus à Banankoro .....	21
<b>CHAPITRE II</b>	<b>LE SONDAGE ELECTRIQUE ..... 25</b>
I. Introduction .....	25
II. Les propriétés électriques des roches .....	26
A. Les différents types de conduction électrique .....	26
B. Les unités de mesure de la conductivité .....	26
III. La méthode du sondage électrique .....	27
A. Le circuit d'émission .....	27
B. Le circuit de réception .....	28
C. La résistivité apparente .....	28
1. La définition de la résistivité électrique .....	28
2. La distribution du courant continu dans un sous-sol homogène et isotrope ...	29
3. La notion de résistivité apparente .....	30
D. La profondeur d'investigation .....	30
E. Le dispositif des électrodes .....	33
F. Les caractéristiques des courbes obtenues par sondage électrique .....	33
G. L'interprétation des courbes de sondage électrique .....	34
1. La loi de similitude en courant continu .....	34
2. Le principe d'équivalence .....	37
3. Le principe de suppression .....	38
H. Conclusion .....	38

IV. Présentation des appareils utilisés pour les sondages électriques .....	39
A. L'émetteur .....	40
B. Le récepteur.....	41
C. Le système de synchronisation .....	41
D. Conclusion.....	41
V. Les caractéristiques opératoires des sondages électriques sur des profils latéritiques .....	42
A. Les écartements entre AB et MN .....	42
B. Les caractéristiques du signal émis .....	44
C. L'emploi d'eau salée pour les contacts électrodes-sol .....	44
D. L'emploi de bobines supplémentaires pour les grandes longueurs AB .....	44
E. L'entretien des batteries .....	45
F. L'entretien des câbles .....	45
G. La vérification des contacts électrodes-sol .....	45
H. L'emploi de plaques métalliques comme électrode.....	45
I. Conclusion .....	46
VI. Les caractéristiques géoélectriques du milieu latéritique.....	46
A. Des exemples de sondages électriques concernant les latérites.....	46
1. Mathiez et Huot (1966) .....	46
2. Albouy, Pion et Wackermann (1970).....	47
3. Boulangé et Carn (1971) .....	47
4. Dorbath, Froidevaux, Blot et Carn (1975) .....	48
5. Engalenc (1978) .....	50
6. Palacky et Kadekaru (1979) .....	50
7. Bernardi et Mouton (1981) .....	51
8. Peric (1981) .....	51
9. Palacky, Ritsema et De Jong (1981).....	52
B. Conclusion .....	53
C. Les travaux réalisés sur le secteur de Banankoro par la méthode des sondages magnéto-telluriques.....	53
1. La méthode magnéto-tellurique.....	53
2. Les résultats de la méthode magnéto-tellurique.....	55
D. Discussion sur les résultats apportés par la méthode des sondages magnéto-telluriques.....	60
E. Conclusion .....	63
VII. Conclusions.....	64
CHAPITRE III LES RESISTIVITES APPARENTES DES PROFILS LATERITIQUES .....	67
I. Les stations de sondage électrique.....	67
A. L'implantation des stations .....	67
B. La numérotation des stations .....	70
C. La configuration des électrodes .....	72
II. Les courbes de résistivité apparente.....	73
A. Les caractéristiques globales des 127 SE.....	73
1. Les maxima et les minima des résistivités apparentes .....	73
2. Les résistivités apparentes moyennes et leurs écarts-types .....	77
3. La distribution des résistivités apparentes pour chaque écartement.....	79
4. Les sondages électriques anormalement résistants .....	81
B. Les cartes de résistivité apparente .....	86
1. Les cartes de résistivité apparente de faible profondeur .....	86
2. Les cartes de résistivité apparente de moyenne profondeur .....	88
3. Les cartes de résistivité apparente de grande profondeur .....	91
4. Conclusion.....	93
C. Les principales familles de SE .....	94
1. Comparaison des SE de plateau et de vallée.....	94
2. Comparaison entre les SE de plateau "résistants" et "conducteurs" à moyenne profondeur .....	95

3. Comparaison des SE du plateau de Banankoro de type "conducteur" sur les deux roches-mères .....	98
4. Comparaison des SE du plateau de Banankoro de type "résistant" sur les deux roches-mères .....	99
5. Comparaison des SE de la vallée du Kokoyon de type "résistant" et "conducteur" à moyenne profondeur .....	99
6. Comparaison entre les SE de la vallée du Kokoyon du type "résistant" et les SE du plateau de Banankoro du type "conducteur" .....	104
7. Comparaison des SE de la vallée du Kokoyon sur les deux types de roche-mère .....	104
8. Comparaison entre les SE de la vallée du Kokoyon et ceux des autres vallées .....	105
10. Conclusions sur les SE des vallées .....	108
11. Conclusions sur les principales familles de SE mises en évidence sur le secteur de Banankoro .....	109
III. Comparaisons avec d'autres SE obtenus dans plusieurs régions d'Afrique .....	111
A. Les SE du secteur de Kobada au Mali .....	111
B. Les SE du secteur de Famansa au Mali .....	112
C. Les SE du massif granitique de Saraya au Sénégal .....	113
D. Les SE du Burkina Faso .....	114
E. Les SE du Burundi .....	114
F. Les SE de la Côte-d'Ivoire .....	115
G. Conclusion .....	117
IV. L'isotropie d'un SE de direction E-W et N-S .....	118
V. Comparaison de deux SE suivant leur position topographique .....	119
VI. Comparaison des courbes de résistivité des SE et des SMT .....	120
VII. Conclusions .....	121

## CHAPITRE IV

## INTERPRETATION DES SONDAGES ELECTRIQUES

PAR MODELE TABULAIRE .....	125
I. L'interprétation des sondages électriques .....	125
A. La méthode classique d'interprétation des SE .....	125
B. La méthode d'interprétation des SE utilisée dans ce travail .....	126
C. Le programme d'interprétation des SE utilisé dans ce travail .....	126
II. Les caractéristiques des niveaux géoélectriques .....	127
A. Les niveaux superficiels .....	130
1. Le niveau 1 .....	130
2. Le niveau 2 .....	131
3. Le niveau 3 .....	132
B. Les niveaux profonds .....	132
1. Le niveau 4 .....	133
2. Le niveau 5 .....	134
3. Le niveau 6 .....	135
4. Le niveau 7 .....	135
5. Le niveau 8 .....	136
6. Conclusion .....	136
C. Discussion : morphodépendance et lithodépendance des niveaux géoélectriques ...	137
1. Epaisseurs des niveaux géoélectriques .....	137
2. Les séquences géoélectriques .....	142
III. Les coupes géoélectriques sur le secteur granitique .....	144
A. La coupe géoélectrique du layon L6 .....	144
1. Les stations du plateau .....	144
2. Les stations des vallées .....	145
3. Discussion à propos de la coupe L6 .....	145
B. Les autres coupes géoélectriques situées sur granite .....	147
1. Les coupes géoélectriques L7, L8 et L9 à l'Ouest de la coupe L6 .....	147
2. Les coupes géoélectriques L4 et L5 à l'Est de la coupe L6 .....	147

C. Conclusion .....	148
IV. Les coupes géoélectriques sur le secteur schisteux .....	149
A. La coupe géoélectrique du layon L3 .....	149
1. Les stations des plateaux .....	149
2. Les stations des vallées .....	149
3. Discussion à propos de la coupe L3 .....	150
B. Les autres coupes géoélectriques situées sur schiste .....	150
1. Les coupes géoélectriques L2, L1 et L0 à l'Est de la coupe L3 .....	150
2. Les coupes géoélectriques L4 et L5 à l'Ouest de la coupe L3 .....	152
C. Conclusion .....	152
V. Enfoncement du profil d'altération dans le paysage .....	153
A. Cartes du relief et de l'épaisseur de la couverture latéritique .....	153
B. Distribution des altitudes de la surface, des épaisseurs du profil et des altitudes de la roche-mère .....	154
C. Transformation du relief par altération .....	156
D. Conclusion .....	160
VI. Conclusions .....	160
CONCLUSIONS GENERALES .....	163
BIBLIOGRAPHIE .....	171
TABLE DES MATIERES .....	176
LISTE DES FIGURES .....	180
LISTE DES TABLEAUX .....	185
LISTE DES ANNEXES .....	186
ANNEXES .....	187

## LISTE DES FIGURES

Figure 1	..... Plan de situation du secteur d'étude.	3
Figure 2	..... Mouvements du front intertropical (FIT), d'après Kamaté 1980.	4
Figure 3	..... Zones de type de temps associées au FIT et leur balancement pendant l'année, d'après Kamaté (1980).	5
Figure 4	..... Précipitations et températures, en moyenne mensuelle, pour la station de Bamako, d'après Kamaté (1980).	5
Figure 5	..... Localisation du secteur d'étude sur la carte schématique des grandes unités structurales de l'Afrique de l'Ouest, d'après Trompette (1973).	7
Figure 6	..... Carte géologique schématique du sud-Ouest du Mali, d'après Bassot <i>et al.</i> (1981).	8
Figure 7	..... Le modelé du Mali occidental, d'après Michel (1980).	11
Figure 8	..... Coupe topographique sud-nord, du village de Dioulafoundou dans la plaine du Niger au plateau de Famansa dans les monts Mandingues, d'après les cartes topographiques IGN à 1/200 000 de Yanfolila et de Bamako-ouest.	13
Figure 9	..... Carte topographique du secteur d'étude, réalisée par interpolation sur les altitudes des stations de géophysique, mesurées au clinomètre et au topofil d'après la carte topographique IGN à 1/200 000 de Yanfolila.	14
Figure 10	..... Carte topographique de la partie orientale du plateau de Banankoro, d'après la carte ORSTOM levée à 1/10 000 (inédite).	15
Figure 11	..... Schéma des deux principaux types de vallée, d'après Freyssinet (1990).	16
Figure 12	..... Coupe topographique SW-NE, parallèle au Niger, montrant la répartition des surfaces cuirassées, d'après Freyssinet (1990).	17
Figure 13	..... Représentations schématiques d'un profil latéritique couvert par une ferricrête, d'après Tardy (1993).	18
Figure 14	..... Migration du continent africain par rapport à l'équateur et aux différentes zones climatiques, et distribution potentielle des bauxites en zone équatoriale et des cuirasses ferrugineuses en climat tropical contrasté (d'après Tardy, Melfi et Valetton, 1988 ; Tardy, Kobilsek et Paquet, 1991 ; Tardy et Roquin, 1992)	22
Figure 15	..... Schéma des circuits d'émission et de réception mis en place pour un sondage électrique.	28
Figure 16	..... Distribution du courant dans un milieu homogène semi-infini à partir de l'électrode d'injection A.	29
Figure 17	..... Allure des lignes de courant dans le sol.	31
Figure 18	..... Représentation géométrique pour la densité de courant horizontale en un point P du sol.	31
Figure 19	..... Profondeur d'investigation en fonction de l'écartement des électrodes A et B.	32
Figure 20	..... Profondeur d'investigation des lignes de courant dans le sous-sol selon sa résistivité.	32
Figure 21	..... Schéma du dispositif de type Wenner avec $AM=MN=NB=a$ croissant.	33
Figure 22	..... Schéma du dispositif de type Schlumberger avec $MN=1$ , $AB=2L+1$ et $MN \leq AB/10$ .	33
Figure 23	..... Exemple de courbe de sondage électrique où l'on distingue de la surface vers la profondeur un niveau résistant (1), puis un niveau conducteur (2), et enfin un niveau résistant (3).	34
Figure 24	..... Exemple de courbe de sondage électrique avec sa courbe théorique calculée par ordinateur à partir d'un modèle à 5 couches horizontales : $\rho_1 = 3000\Omega m$ et $H_1 = 3.6m$ , $\rho_2 = 700\Omega m$ et $H_2 = 11m$ , $\rho_3 = 230\Omega m$ et $H_3 = 28m$ , $\rho_4 = 12\Omega m$ et $H_4 = 22m$ , $\rho_5 = 200\Omega m$ .	35
Figure 26	..... Principe de conservation de la forme de la courbe d'un modèle à n couches horizontales quand les paramètres résistivité et épaisseur sont multipliés par un même facteur.	36
Figure 27	..... Modification de la courbe des résistivités apparentes pour un terrain résistant placé entre deux terrains conducteurs.	37



Figure 28.....	Modification de la courbe des résistivités apparentes pour un terrain conducteur placé entre deux terrains résistants.....	38
Figure 29.....	Modification de la courbe des résistivités apparentes par le principe de suppression avec un faible contraste entre les résistivités et les épaisseurs.....	39
Figure 30.....	Modification de la courbe des résistivités apparentes par le principe de suppression avec un fort contraste entre les résistivités et les épaisseurs.....	39
Figure 31.....	Type de signal électrique créé par l'émetteur.....	40
Figure 32.....	Exemple de sondage électrique obtenu sur le secteur de Banankoro.....	44
Figure 33.....	Exemple de sondage électrique réalisé sur granite d'après Albouy <i>et al.</i> , 1970.....	47
Figure 34.....	Exemples de sondages électriques réalisés sur dolérite, sur granite et sur granite très altéré d'après Dorbath <i>et al.</i> , 1975.....	48
Figure 35.....	Exemple de coupe géoélectrique dans une latérite nickélique d'après Palacky et Kadokaru, 1979.....	50
Figure 36.....	Exemple de sondage électrique réalisé sur granite en Haute-Volta d'après Bernardi et Mouton, 1981.....	51
Figure 37.....	Exemple de sondage électrique réalisé sur des latérites nickéliques au Burundi d'après Peric, 1981.....	52
Figure 38.....	Exemples de sondage électrique réalisé sur schistes et sur granite en Haute-Volta d'après Palacky <i>et al.</i> , 1981.....	52
Figure 39.....	Exemple de coupe géoélectrique montrant les niveaux superficiels "ensemble cuirasse et argiles tachetées" et "lithomarge kaolinique" pour le layon L1, d'après Pham et Boyer, 1988.....	56
Figure 40.....	Carte des résistivités en $\Omega m$ de l'ensemble "cuirasse et argiles tachetées", qui est plus résistant sous les plateaux que sous les vallées, d'après Pham et Boyer, 1988.....	57
Figure 41.....	Carte des épaisseurs en mètre de l'ensemble "cuirasse et argiles tachetées", qui est plus épais sous les plateaux que sous les vallées, d'après Pham et Boyer, 1988.....	58
Figure 42.....	Exemples de courbe isotrope caractéristique du secteur occidental (A) et de courbe anisotrope caractéristique du secteur oriental (B), d'après Pham <i>et al.</i> , 1989.....	59
Figure 43.....	Limite entre le secteur occidental isotrope et le secteur oriental anisotrope en fonction de la morphologie du paysage et de l'emplacement des stations de géophysique, d'après Pham <i>et al.</i> , 1989.....	59
Figure 44.....	A- coupe géoélectrique complète du layon L1 appartenant au secteur oriental anisotrope, réalisées avec les mesures EW, montrant les schistes birrimiens, le conducteur profond et le socle granitique ; B- coupe géoélectrique complète du layon L1 appartenant au secteur oriental anisotrope, réalisées avec les mesures NS, montrant l'anisotropie des schistes birrimiens, et sa décomposition en trois niveaux pour la direction NS, d'après Pham <i>et al.</i> , 1988.....	61
Figure 45.....	Carte de la profondeur du toit du socle pour le secteur oriental anisotrope, avec ses hauts-fonds plutôt au niveau des plateaux qu'au niveau des vallées, d'après Pham et Boyer, 1988.....	62
Figure 46.....	Carte de localisation des layons et des stations sur le secteur de Banankoro.....	68
Figure 47.....	Répartition des stations de SE sur les dix layons avec la topographie du secteur de Banankoro.....	69
Figure 48.....	Numérotation et localisation des stations de SE implantées sur les layons.....	71
Figure 49.....	Numérotation et localisation des stations de SE isolées.....	71
Figure 50.....	Courbes des maxima et des minima des résistivités apparentes de Banankoro.....	74
Figure 51.....	Courbes des résistivités apparentes du SE L3-1600S qui présente des maxima de $AB/2=4m$ à $AB/2=15m$ , et du SE L4-1100S qui présente des maxima pour $AB/2=150m$ et $AB/2=200m$ .....	75
Figure 52.....	Courbes des résistivités apparentes des SE L0-500N, L2-750N, L3-150N et L9-1600N qui possèdent les minima de $AB/2=30m$ à $AB/2=100m$ .....	76
Figure 53.....	Courbes des résistivités apparentes des stations L2-2300S et 400E-1600S qui possèdent les minima pour $AB/2=150, 200, 300$ et $400m$ .....	77
Figure 54.....	Courbes des résistivités apparentes des stations L2-2050S, L2-2550S, L2-2800S et L3-850S qui possèdent les minima pour $AB/2=400, 450$ et $500m$ .....	77



Figure 55.....	Les courbes de résistivités apparentes moyennes et les intervalles de dispersion pour l'ensemble des stations, en fonction de AB/2. ....	78
Figure 56.....	Valeurs du coefficient de variation (rapport "écart-type/moyenne") pour l'ensemble des stations, en fonction de AB/2. ....	79
Figure 57.....	Distribution des résistivités apparentes de l'ensemble des SE, pour chaque AB/2. ...	80
Figure 58.....	Distribution des résistivités apparentes des SE de vallée pour chaque AB/2.....	81
Figure 59.....	Distribution des résistivités apparentes des SE de plateau pour chaque AB/2. ....	81
Figure 60.....	Localisation des stations de type "très résistant". ....	82
Figure 61.....	Les cinq stations qui sont les plus résistantes, c'est-à-dire qui ont des résistivités apparentes supérieures à la valeur " $M + \sigma$ " pour au moins dix AB/2. ....	84
Figure 62.....	Courbes des deux SE de vallée de type "très résistant". ....	84
Figure 63.....	Les quinze SE résistants du plateau de Banankoro, qui présentent une remontée finale à partir de AB/2 = 200m. ....	85
Figure 64.....	Les huit SE résistants du plateau de Banankoro, qui ne présentent pas de remontée finale jusqu'à AB/2 = 450 et 500m. ....	85
Figure 65.....	Les différences de résistivités apparentes entre les SE de la partie est du plateau de Banankoro situés sur l'axe résistant et les SE situés à une altitude inférieure à 390m. ....	89
Figure 66.....	Corrélations entre les résistivités apparentes et les altitudes des stations, pour chaque AB/2, en distinguant les vallées et les plateaux. ....	90
Figure 67.....	Comparaison entre les courbes des SE des vallées qui deviennent résistantes à grande profondeur, et celles des SE des plateaux qui deviennent conductrices à grande profondeur, avec l'exemple des stations L4-650N pour les vallées et L3-1350S. ....	91
Figure 68.....	Différences entre les courbes de SE des stations de l'axe résistant de la partie est du plateau de Banankoro qui restent résistantes à grande profondeur, et celles qui deviennent conductrices, en représentant les courbes de AB/2 = 2m à AB/2 = 30. ....	92
Figure 69.....	Détail de la figure 68 pour les AB/2 de 100, 200 et 300m. ....	92
Figure 70.....	Comparaison des courbes de résistivité apparente moyenne des SE de plateau et de vallée. ....	94
Figure 71.....	Comparaison entre les courbes de résistivité apparente moyenne des SE de plateau de type "résistant" et "conducteur" à moyenne profondeur. ....	95
Figure 72.....	Localisation des 39 stations de plateau résistantes à moyenne profondeur. ....	96
Figure 73.....	Localisation des 29 stations de plateau conductrices à moyenne profondeur. ....	96
Figure 74.....	Comparaison entre les courbes de résistivité apparente moyenne des SE de vallée et de plateau de type "conducteur" à moyenne profondeur. ....	97
Figure 75.....	Comparaison entre les courbes de résistivité apparente moyenne des SE du plateau de Banankoro de type "conducteur", sur la zone granitique et sur la zone schisteuse. ....	98
Figure 76.....	Comparaison entre les courbes de résistivité apparente moyenne des SE du plateau de Banankoro de type "résistant" à moyenne profondeur, sur la zone granitique et sur la zone schisteuse. ....	99
Figure 77.....	Les 33 SE de la vallée du Kokoyon. ....	100
Figure 78.....	Les 16 SE de la vallée du Kokoyon de type "conducteur". ....	100
Figure 79.....	Les 17 SE de la vallée du Kokoyon de type "résistant", plus celui de la station L2-250S. ....	101
Figure 80.....	Comparaison entre les courbes de résistivité apparente moyenne des SE de la vallée du Kokoyon de type "conducteur" et de type "résistant". ....	101
Figure 81.....	Localisation des SE de la vallée du Kokoyon de type "conducteur" à moyenne profondeur. ....	103
Figure 82.....	Localisation des SE de la vallée du Kokoyon de type "résistant" à moyenne profondeur. ....	103
Figure 83.....	Comparaison entre les courbes de résistivité apparente moyenne des SE de la vallée du Kokoyon "résistants" à moyenne profondeur et des SE du plateau de Banankoro "conducteurs" à moyenne profondeur. ....	104
Figure 84.....	Comparaison entre les SE "conducteurs" de la vallée du Kokoyon situés sur la zone granitique et sur la zone schisteuse. ....	105

Figure 85.....	Comparaison entre les SE "résistants" de la vallée du Kokoyon situés sur la zone granitique et sur la zone schisteuse.....	105
Figure 86.....	Comparaison des SE "conducteurs" à moyenne profondeur entre la vallée du Kokoyon et les autres vallées. ....	106
Figure 87.....	Comparaison des SE "résistants" à moyenne profondeur entre la vallée du Kokoyon et les autres vallées. ....	106
Figure 88.....	Localisation des SE du type "conducteur" dans les vallées autres que celle du Kokoyon. ....	107
Figure 89.....	Localisation des SE du type "résistant" dans les vallées autres que celle du Kokoyon. ....	107
Figure 90.....	Les quatre grandes familles de SE mises en évidence sur le secteur de Banankoro...110	
Figure 91.....	Exemple d'un modèle tabulaire à quatre niveaux géoélectriques, du type résistant-conducteur-résistant, avec un niveau résistant intermédiaire dont l'épaisseur varie. .110	
Figure 92.....	Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et le SE 1600S-140 du secteur de Kobada au Mali.....	111
Figure 93.....	Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et le SE 1800S-0 du secteur de Kobada au Mali.....	112
Figure 94.....	Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et le SE du kerkour du plateau bauxitique de Famansa, dans les Monts Mandingues (Mali). ....	112
Figure 95.....	Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et le SE du puits d'alimentation en eau du plateau bauxitique de Famansa dans les Monts Mandingues (Mali). ....	113
Figure 96.....	Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et trois exemples de SE réalisés dans le massif de Saraya (Sénégal), sur dolérites, granites et granites altérés, d'après Dorbath <i>et al.</i> (1975). ....	114
Figure 97.....	Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et quatre exemples de SE réalisés au Burkina Faso sur des granites et des séries volcano-sédimentaires d'après Albouy <i>et al.</i> (1970), Bernardi et Mouton (1981) et Palacky <i>et al.</i> (1981)...115	
Figure 98.....	Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et un exemple de SE réalisé au Burundi sur des péridotites, d'après Peric (1981). ....	115
Figure 99.....	Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et le SE S10 réalisé en Côte-d'Ivoire, appartenant au moyen-glacis et situé sur des amphibolites, d'après Boulangé et Carn (1971). ....	116
Figure 100 ...	Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et le SE S11 réalisé en Côte-d'Ivoire, appartenant au haut-glacis et situé sur des amphibolites, d'après Boulangé et Carn (1971). ....	117
Figure 101 ...	Comparaison entre les quatre familles de SE de Banankoro et le SE S9 réalisé en Côte-d'Ivoire, appartenant à la surface intermédiaire et situé sur des amphibolites, d'après Boulangé et Carn (1971). ....	117
Figure 102 ...	Comparaison entre le SE de direction EW et celui de direction NS pour la station L2-1550S du plateau de Banankoro. ....	118
Figure 103 ...	Comparaison sur le plateau de Banankoro entre le SE 5450W-1600N, situé sur un bombement topographique, et le SE 5500W-1600N, situé dans un creux topographique.....	120
Figure 104 ...	Les résistivités et les épaisseurs moyennes des huit niveaux géoélectriques, mis en évidence par les SE. ....	127
Figure 105 ...	Épaisseurs moyennes et écarts-types des niveaux géoélectriques en distinguant les profils de vallée et de plateau, sur les deux types de roche-mère, granite et schiste. ....	138
Figure 106 ...	Distribution des épaisseurs des niveaux géoélectriques en distinguant les profils de vallée et de plateau, sur les deux types de roche-mère. ....	139
Figure 107 ...	Séquences géoélectriques des profils latéritiques de plateau et de vallée, sur le secteur schisteux. ....	140
Figure 108 ...	Séquences géoélectriques des profils latéritiques de plateau et de vallée, sur le secteur granitique.....	141
Figure 109 ...	Deux exemples de coupe géoélectrique le layon L6 caractéristique du secteur granitique et le layon L3 situé sur le secteur schisteux.....	146

Figure 110 ...	Comparaison entre le SE L2-2300S pour lequel le niveau 4 disparaît brutalement et celui L2-2050S situé à côté, dont le niveau 4 atteint 45m. ....	151
Figure 111 ...	Courbes de fréquences cumulées (a) des altitudes de la surface topographique, (b) des épaisseurs du profil d'altération et (c) des altitudes du toit de la roche-mère, en distinguant les vallées et les plateaux sur les deux secteurs, schisteux et granitique .....	154
Figure 112 ...	Relation entre l'altitude de la surface topographique et l'altitude du toit de la roche-mère.....	155
Figure 113 ...	Relation entre l'épaisseur du profil d'altération et l'altitude de la surface topographique.....	157
Figure 114 ...	Relation entre l'épaisseur du profil d'altération et l'altitude du toit de la roche-mère.....	159
Figure 115 ...	Schéma d'un profil géoélectrique complet du secteur de Banankoro, avec les intervalles de dispersion des résistivités et les profondeurs moyennes de chaque niveau. ....	165

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.....Exemples de résistivité pour des minéraux.....	27
Tableau 2.....Exemples de résistivité pour des roches.....	27
Tableau 3.....Les différentes méthodes géoélectriques.....	28
Tableau 4.....Ecartements choisis entre AB et MN, et leurs fréquences d'utilisation.....	42
Tableau 5.....Relations entre les résistivités apparentes et les horizons des différentes surfaces cuirassées selon Boulangé et Carn, 1971.....	49
Tableau 6.....Exemples de valeur de la profondeur de pénétration en fonction de la résistivité du sol et de la période du signal.....	54
Tableau 7.....Répartition des stations de SE par layon en fonction du relief.....	70
Tableau 8.....Les configurations d'électrode les plus utilisées.....	72
Tableau 9.....Etendue de la gamme des résistivités apparentes mesurées.....	74
Tableau 10...Noms des stations des maxima et leurs situations en fonction du modelé du paysage.....	74
Tableau 11...Noms des stations des minima et leurs situations en fonction du modelé du paysage.....	75
Tableau 12...Données sur les moyennes et les écarts-types des résistivités apparentes pour l'ensemble des stations, en fonction de AB/2.....	78
Tableau 13...Liste des stations de type "très résistant" dont les résistivités apparentes dépassent au moins cinq fois la valeur " $M + \sigma$ " en fonction de AB/2.....	83
Tableau 14...Répartition des stations très conductrices ( $\rho_a < M - \sigma$ ) pour les cartes de résistivité apparente en AB/2 de 2m, 4m, 7m et 10m, en distinguant les vallées et les plateaux.....	87
Tableau 15...Répartition des stations très résistantes ( $\rho_a > M + \sigma$ ) pour les cartes de résistivité apparente en AB/2 de 2m, 4m, 7m et 10m, en distinguant les vallées et les plateaux.....	87
Tableau 16...Valeurs supérieures et inférieures des résistivités apparentes qui délimitent les SE des plateaux de ceux des vallées, pour les AB/2 de 20m à 100m.....	89
Tableau 17...Résistivités apparentes des SE L2-1550S de direction EW et NS.....	119
Tableau 18...Les caractéristiques des huit niveaux géoélectriques des 127 SE.....	127
Tableau 19...Exemples de résistivités obtenues sur des profils d'altération latéritiques.....	128
Tableau 20...Epaisseurs moyennes des niveaux géoélectriques sous les vallées et sous les plateaux, en distinguant le secteur sur granite et celui sur schiste.....	138

## LISTE DES ANNEXES

### ANNEXE-A

#### CARTES DE LOCALISATION DES LAYONS ET DES STATIONS

- Carte 1..... Localisation des layons et des stations de géophysique.  
 Carte 2..... Numérotation et localisation des stations de SE implantées sur les layons.  
 Carte 3..... Numérotation et localisation des stations de SE isolées.

### ANNEXE-B

#### CARTES DES RESISTIVITES APPARENTES

- Carte 4..... Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=2m$ .  
 Carte 5..... Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=4m$ .  
 Carte 6..... Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=7m$ .  
 Carte 7..... Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=10m$ .  
 Carte 8..... Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=20m$ .  
 Carte 9..... Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=30m$ .  
 Carte 10..... Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=50m$ .  
 Carte 11..... Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=70m$ .  
 Carte 12..... Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=100m$ .  
 Carte 13..... Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=200m$ .  
 Carte 14..... Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=300m$ .

### ANNEXE-C

#### CARTES DES EPAISSEURS DES NIVEAUX GEOELECTRIQUES

- Carte 15..... Distribution des épaisseurs du niveau 1 (formation meuble de recouvrement).  
 Carte 16..... Distribution des épaisseurs du niveau 2 (cuirasse).  
 Carte 17..... Distribution des épaisseurs du niveau 3 (carapace).  
 Carte 18..... Distribution des épaisseurs du niveau 4 (argiles tachetées).  
 Carte 19..... Distribution des épaisseurs du niveau 5 (lithomarge non saturée "résistante").  
 Carte 20..... Distribution des épaisseurs du niveau 6 (lithomarge non saturée "conductrice").  
 Carte 21..... Distribution des épaisseurs du niveau 7 (lithomarge saturée).

### ANNEXE-D

#### COUPES GEOELECTRIQUES

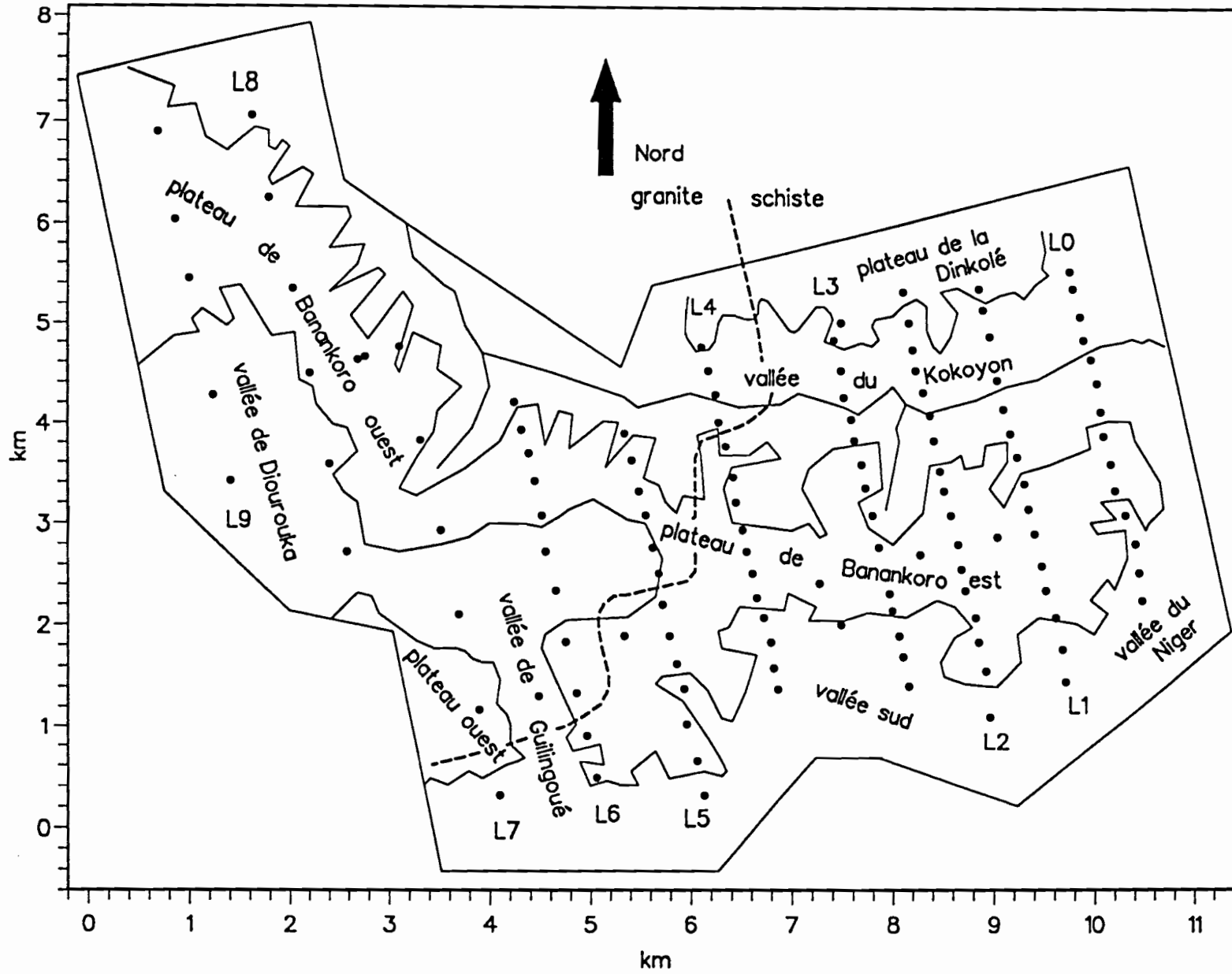
- Figure 1..... Coupe géoélectrique du layon L0.  
 Figure 2..... Coupe géoélectrique du layon L1.  
 Figure 3..... Coupe géoélectrique du layon L2.  
 Figure 4..... Coupe géoélectrique du layon L3.  
 Figure 5..... Coupe géoélectrique du layon L4.  
 Figure 6..... Coupe géoélectrique du layon L5.  
 Figure 7..... Coupe géoélectrique du layon L6.  
 Figure 8..... Coupe géoélectrique du layon L7.  
 Figure 9..... Coupe géoélectrique du layon L8.  
 Figure 10.... Coupe géoélectrique du layon L9.

### ANNEXE-E

#### CARTES DES ALTITUDES DE LA SURFACE TOPOGRAPHIQUE, DES EPAISSEURS DU PROFIL LATERITIQUE ET DES ALTITUDES DU TOIT DE LA ROCHE-MERE

- Carte 22..... Relief de la surface topographique de l'ensemble du secteur d'après les altitudes des stations.  
 Carte 23..... Distribution des épaisseurs du profil d'altération sur l'ensemble du secteur.  
 Carte 24..... Altitude du toit de la roche-mère sur l'ensemble du secteur.

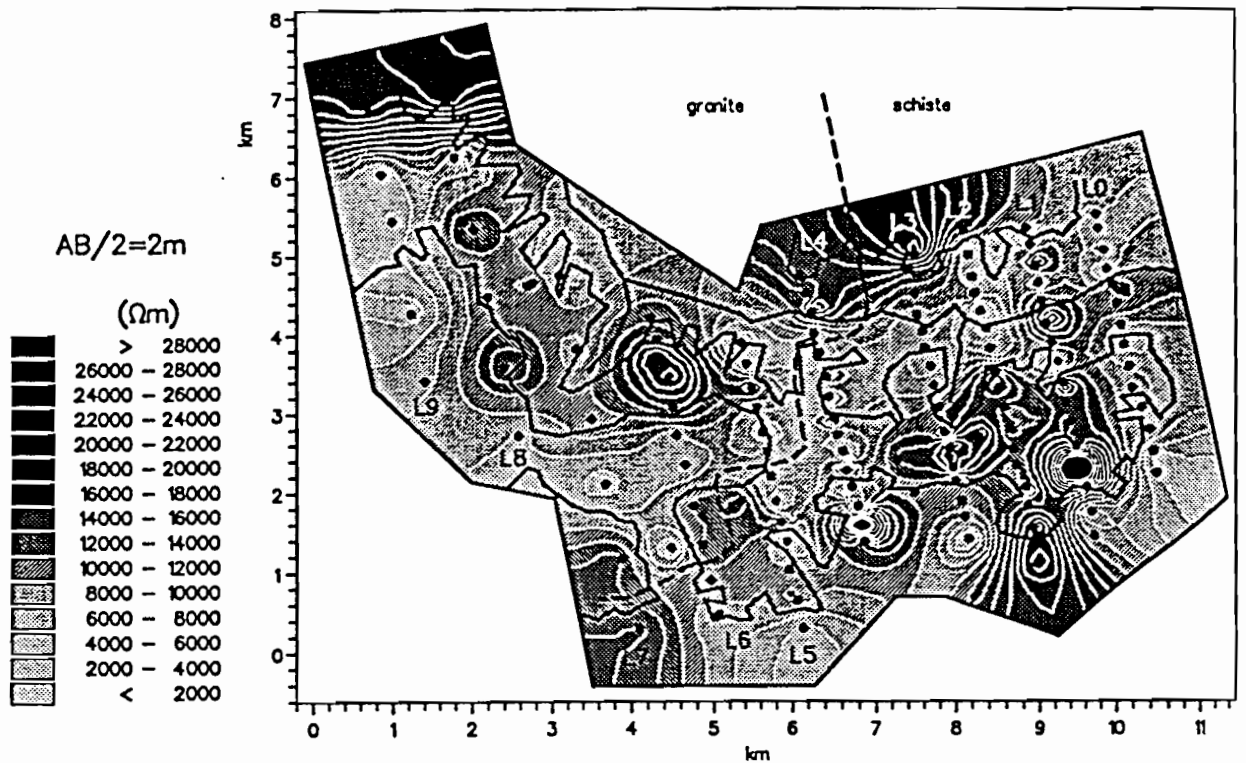
**ANNEXES**



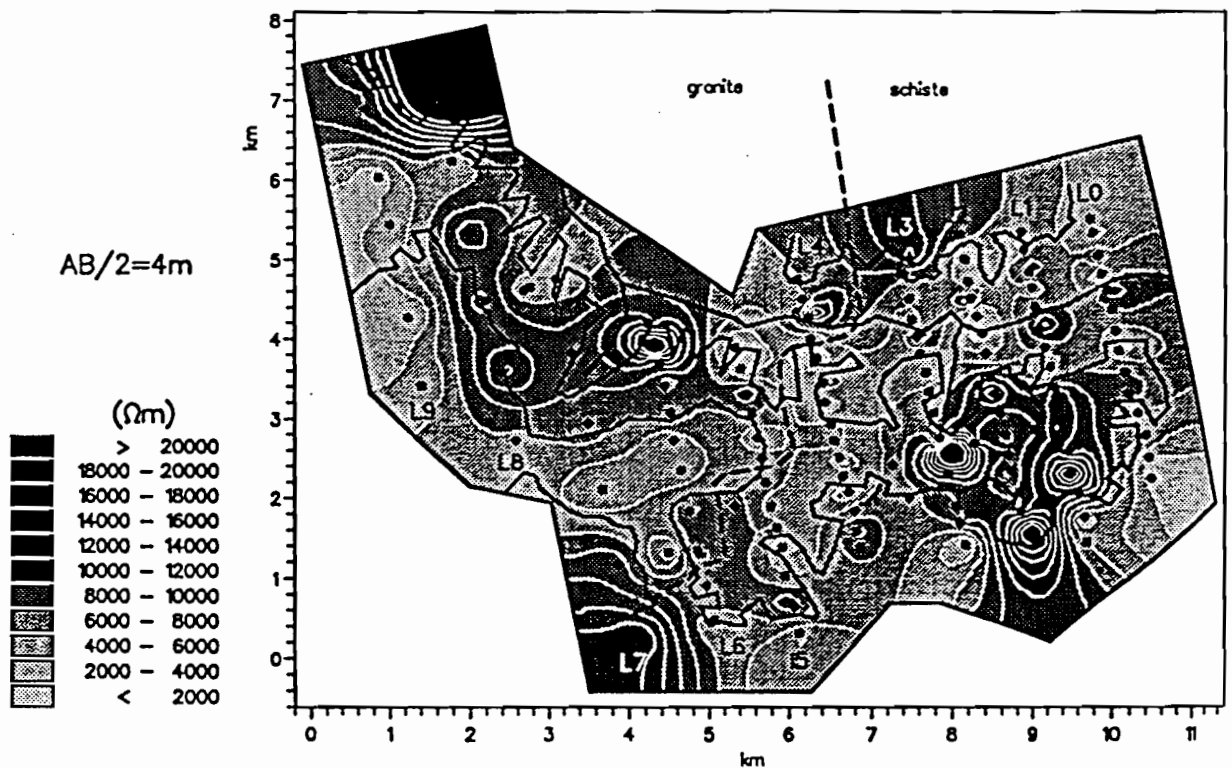
Carte 1 : Localisation des layons et des stations de géophysique.



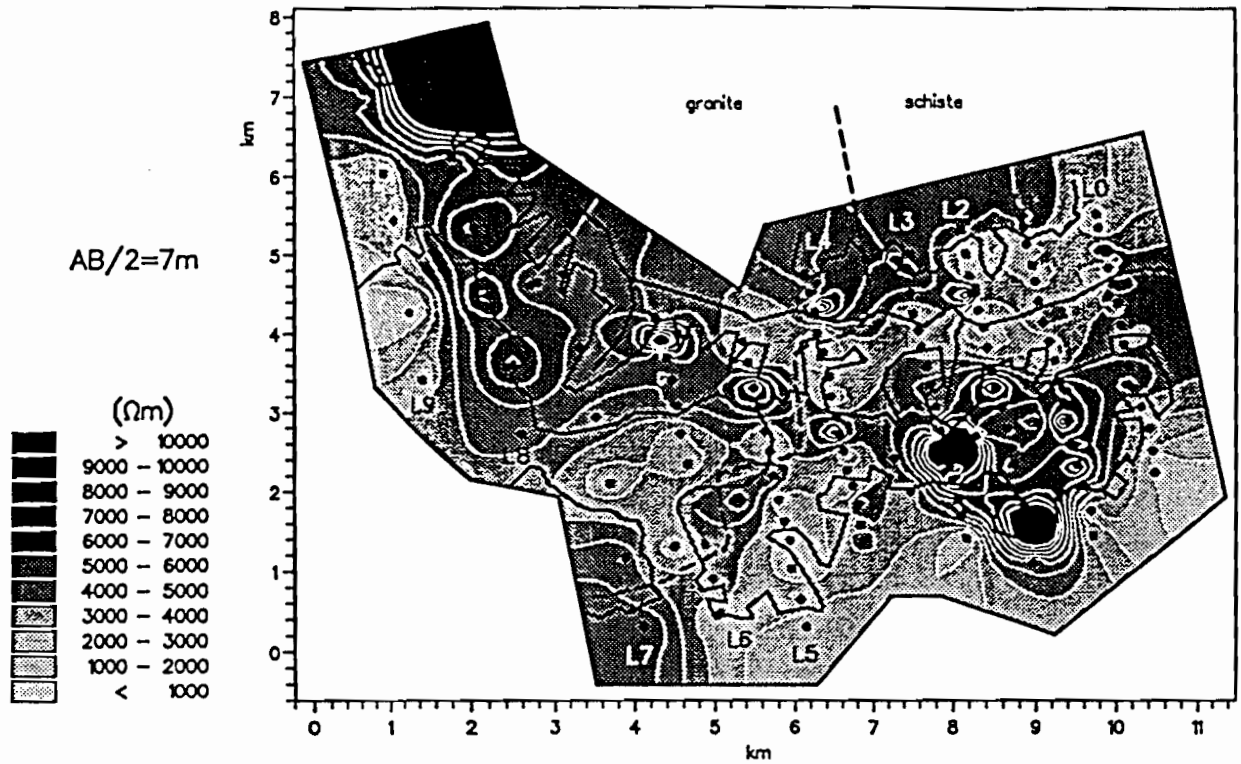




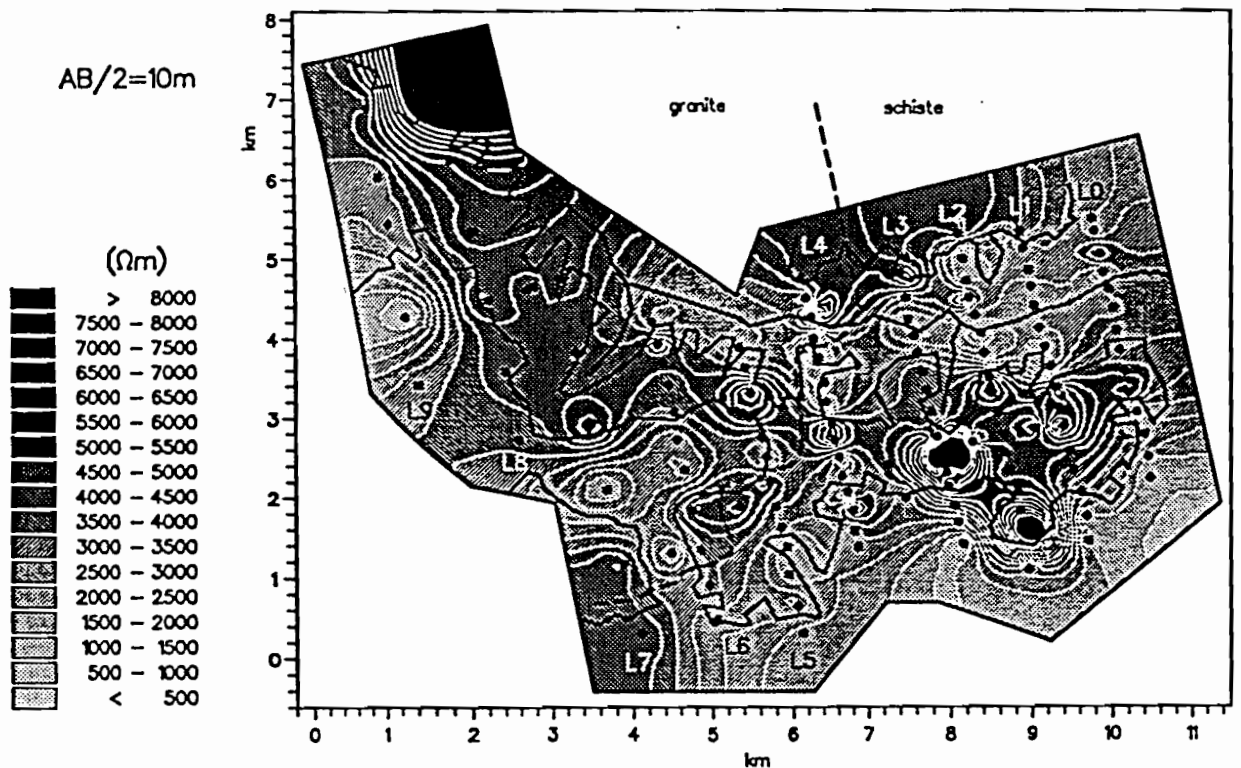
Carte 4 : Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=2m$ .



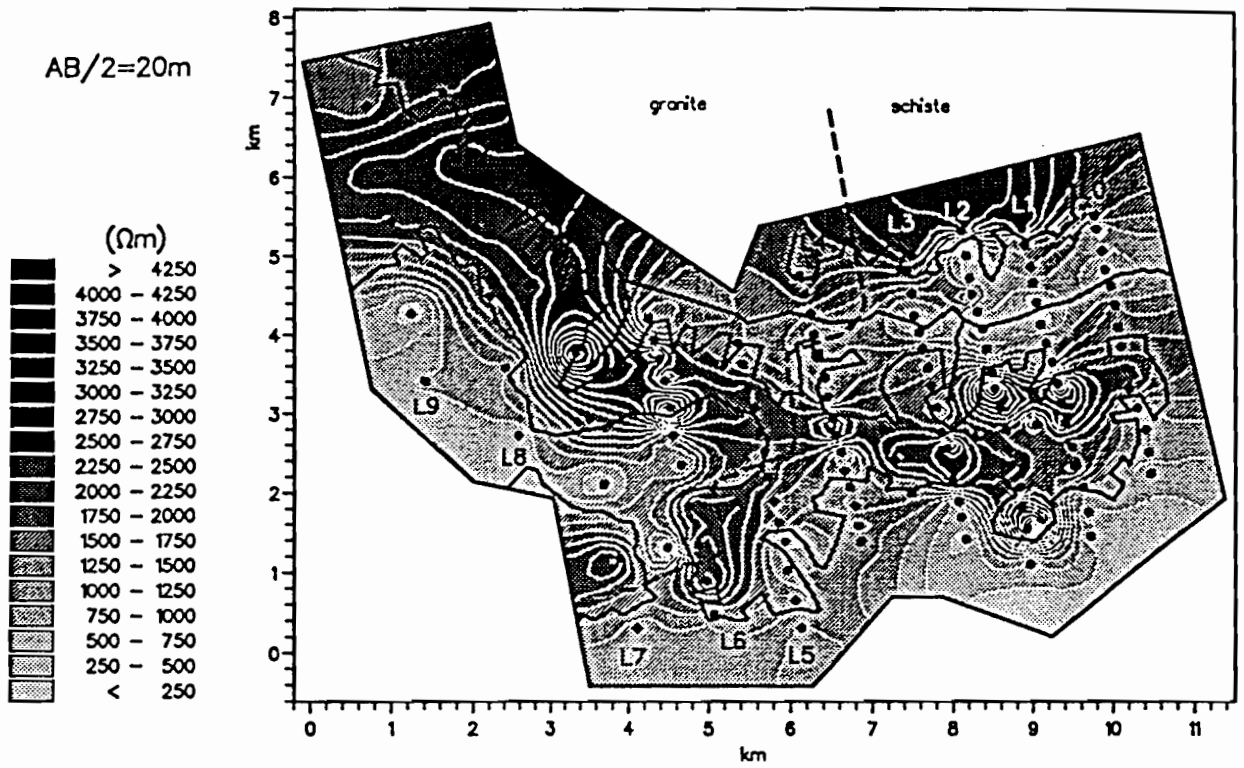
Carte 5 : Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=4m$ .



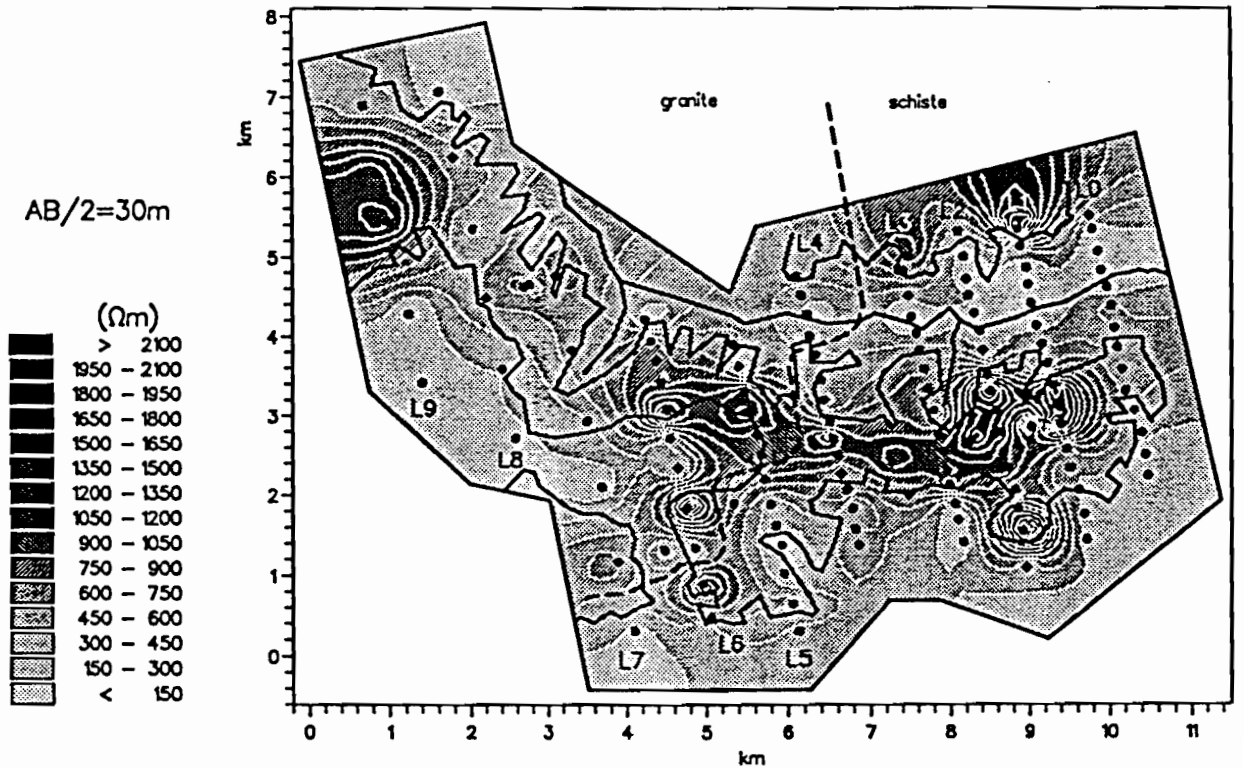
Carte 6 : Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=7m$ .



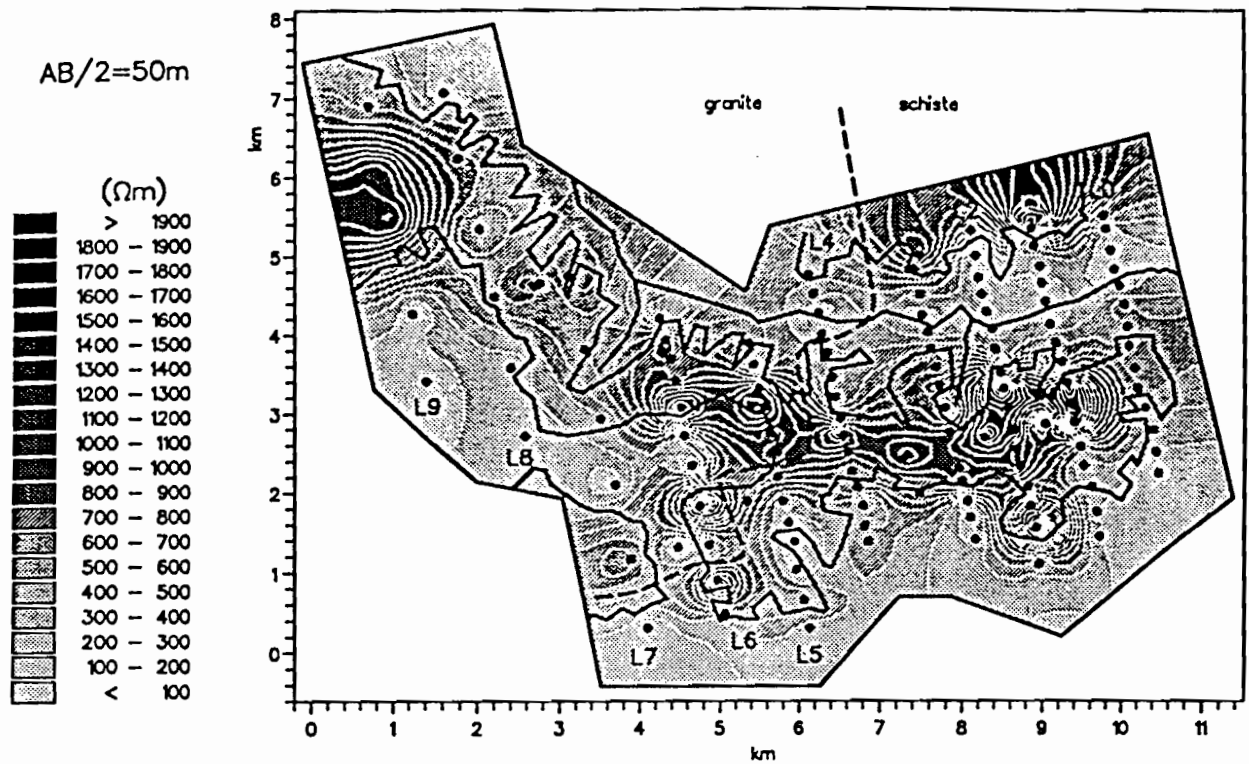
Carte 7 : Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=10m$ .



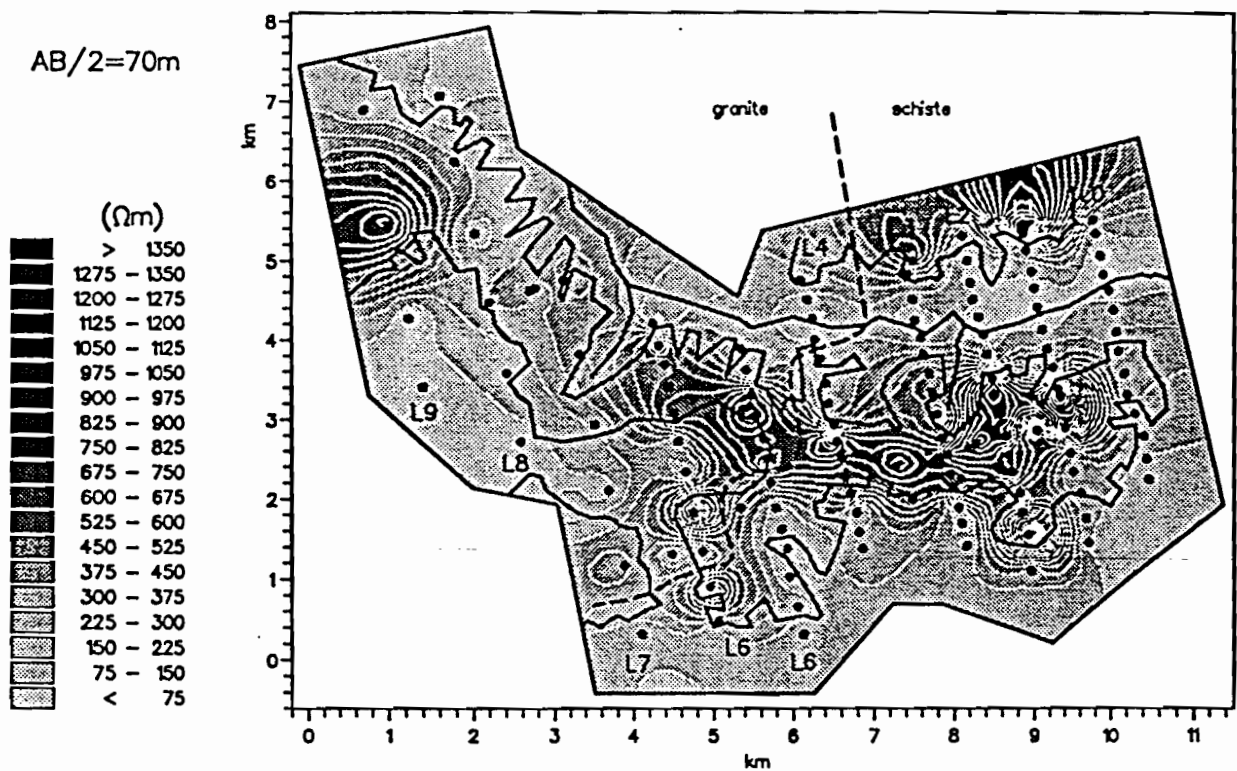
Carte 8 : Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de AB/2=20m.



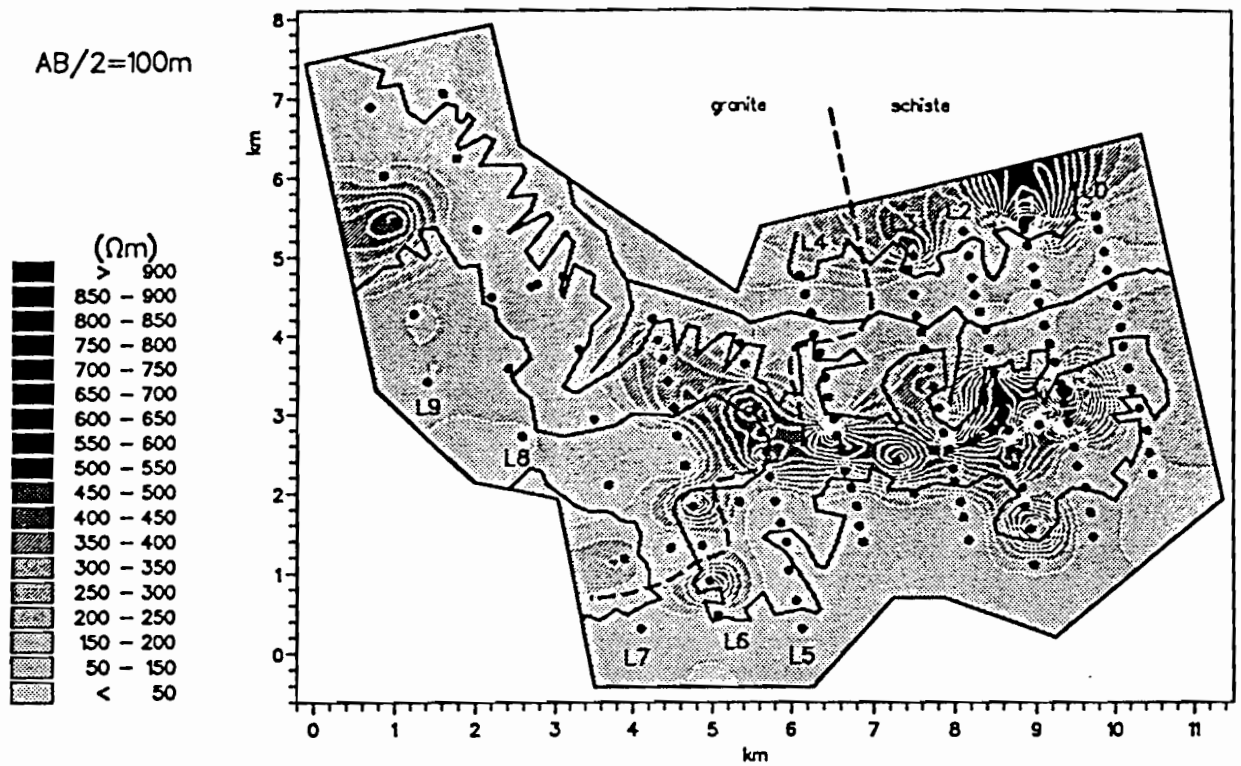
Carte 9 : Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de AB/2=30m.



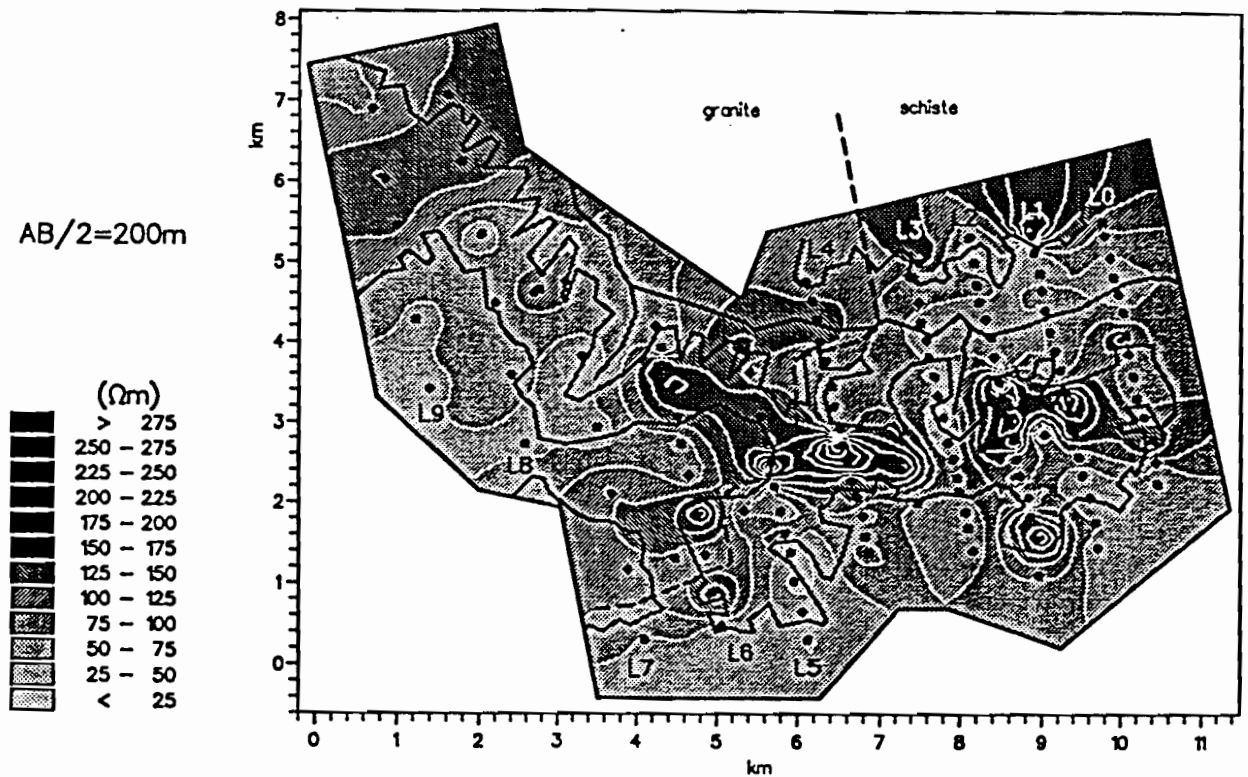
Carte 10 : Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=50m$ .



Carte 11 : Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=70m$ .

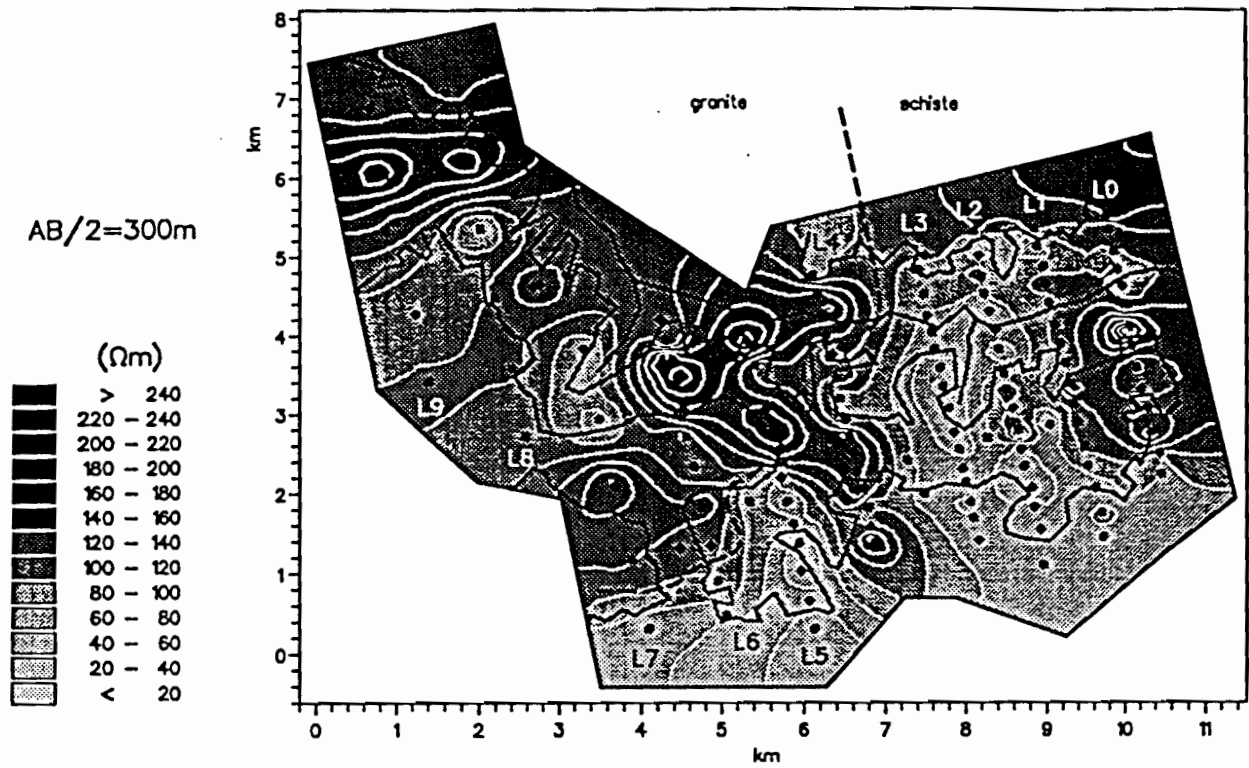


Carte 12 : Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=100m$ .

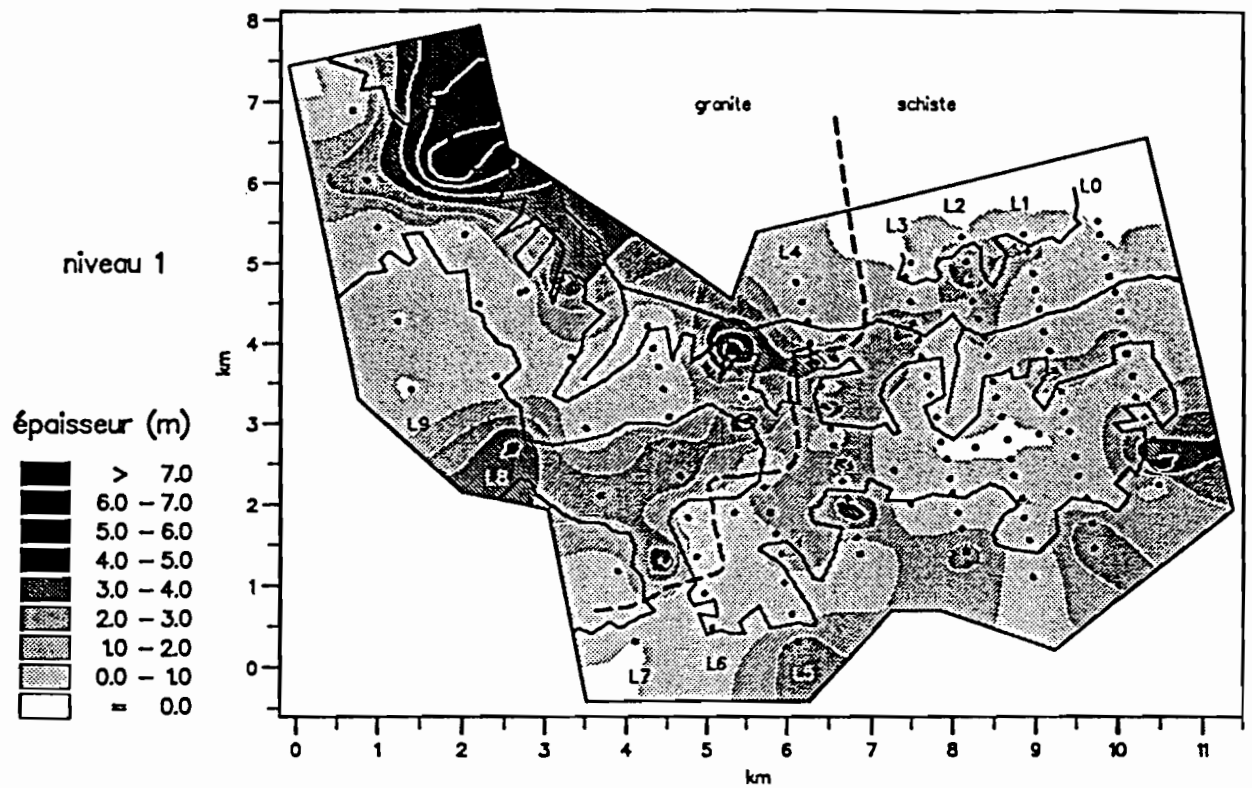


Carte 13 : Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=200m$ .

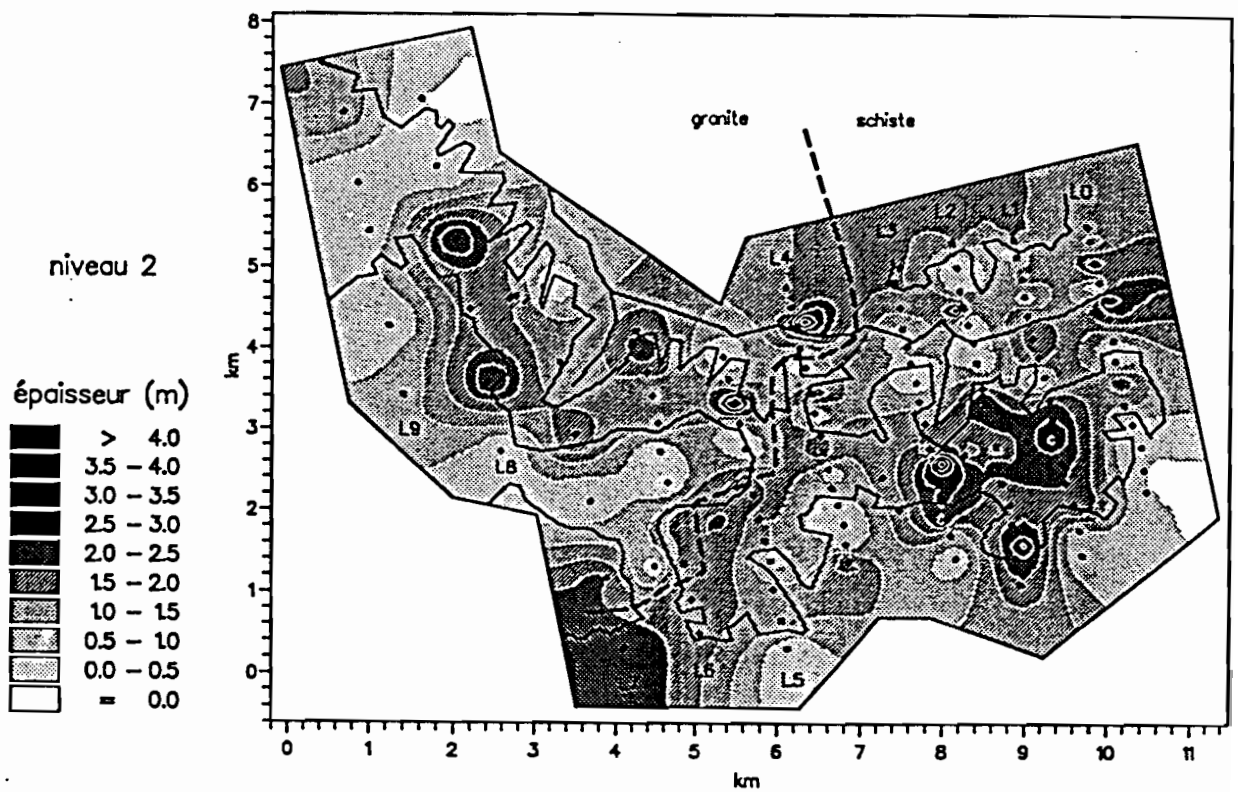




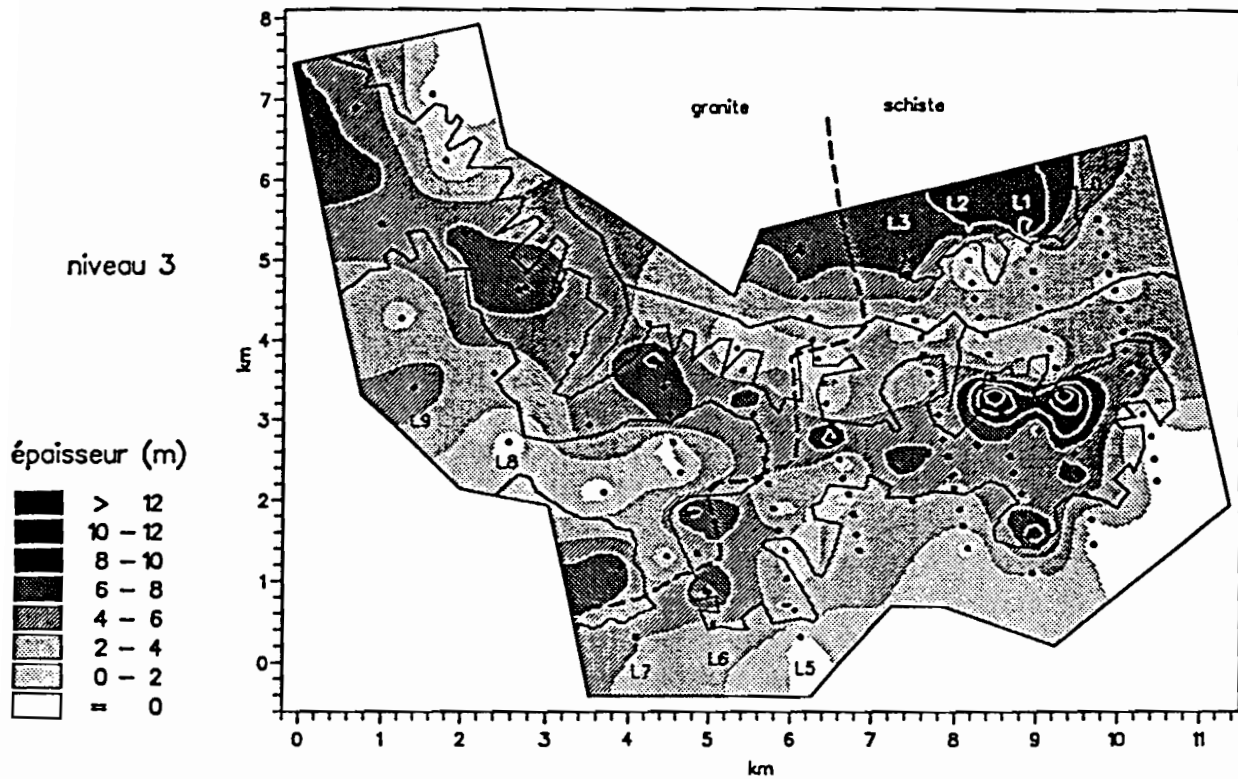
Carte 14 : Distribution des résistivités apparentes pour un écartement de  $AB/2=300m$ .



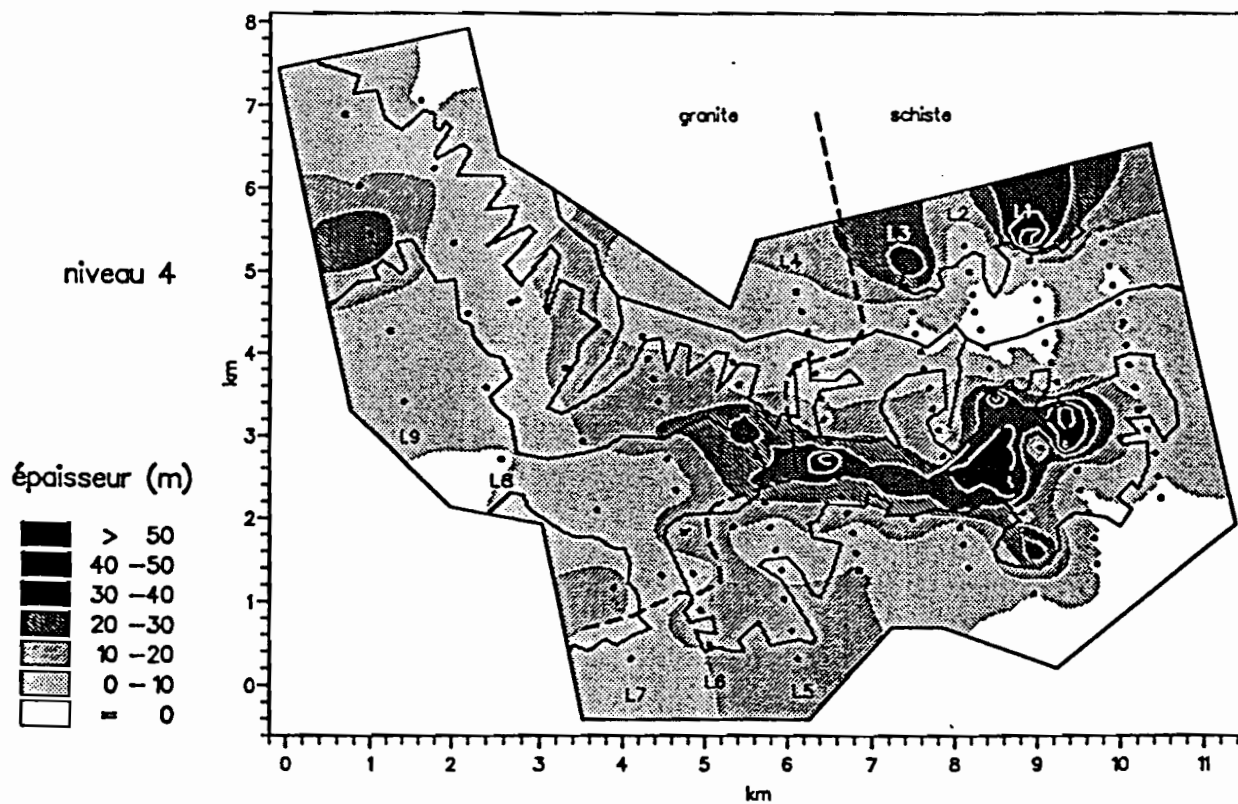
Carte 15 : Distribution des épaisseurs du niveau 1 (formation meuble de recouvrement).



Carte 16 : Distribution des épaisseurs du niveau 2 (cuirasse).

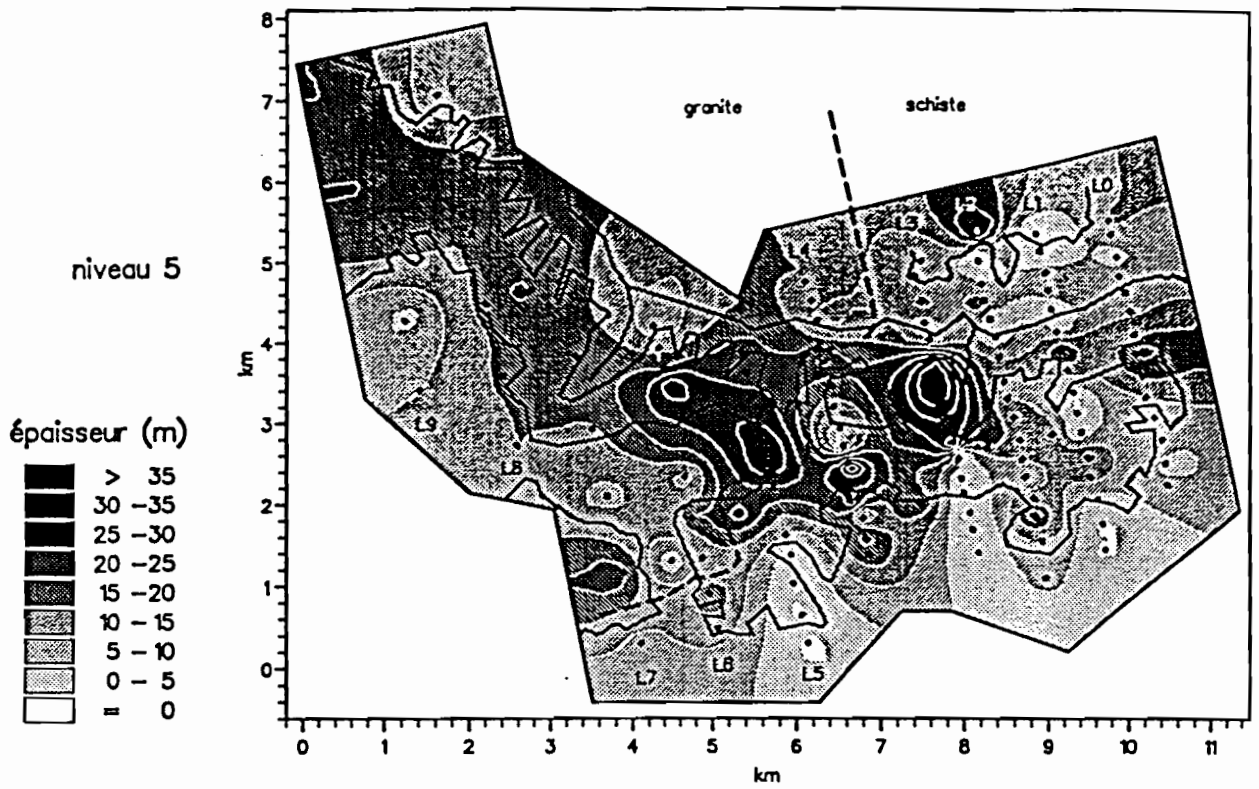


Carte 17 : Distribution des épaisseurs du niveau 3 (carapace).

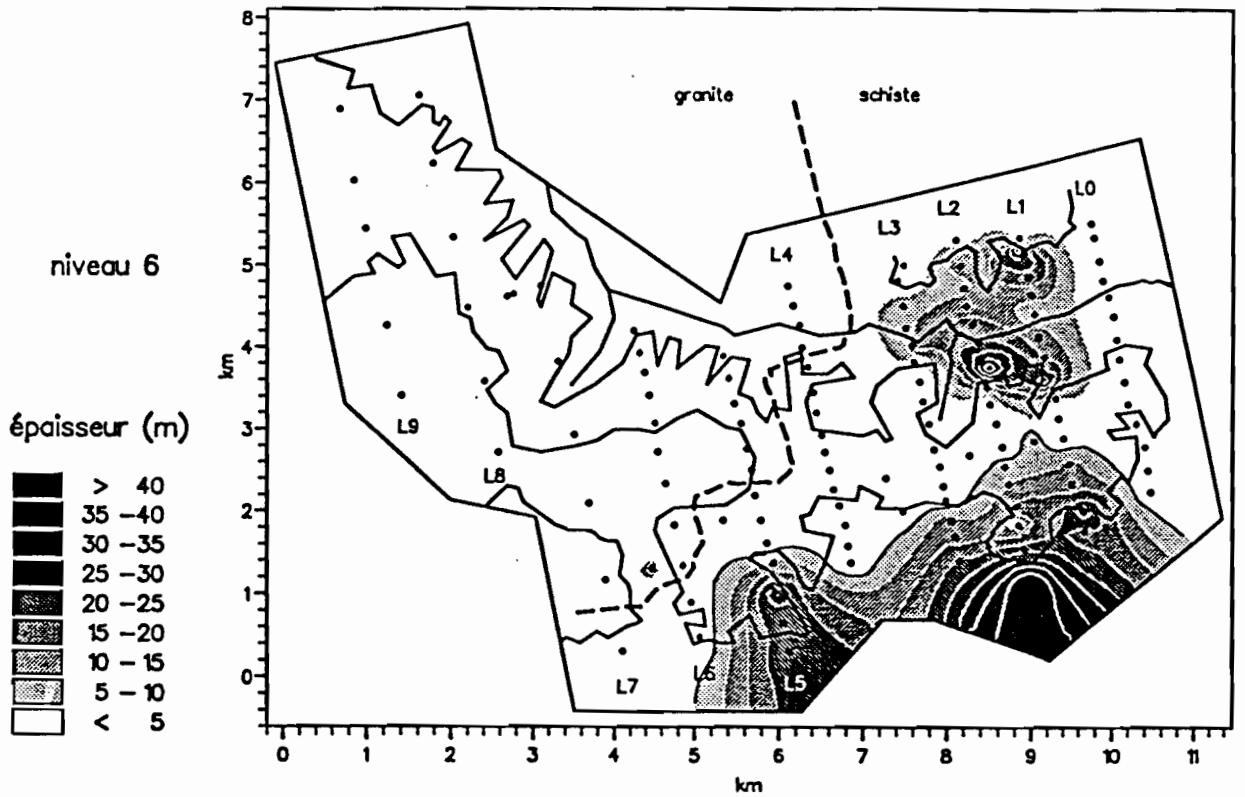


Carte 18 : Distribution des épaisseurs du niveau 4 (argiles tachetées).

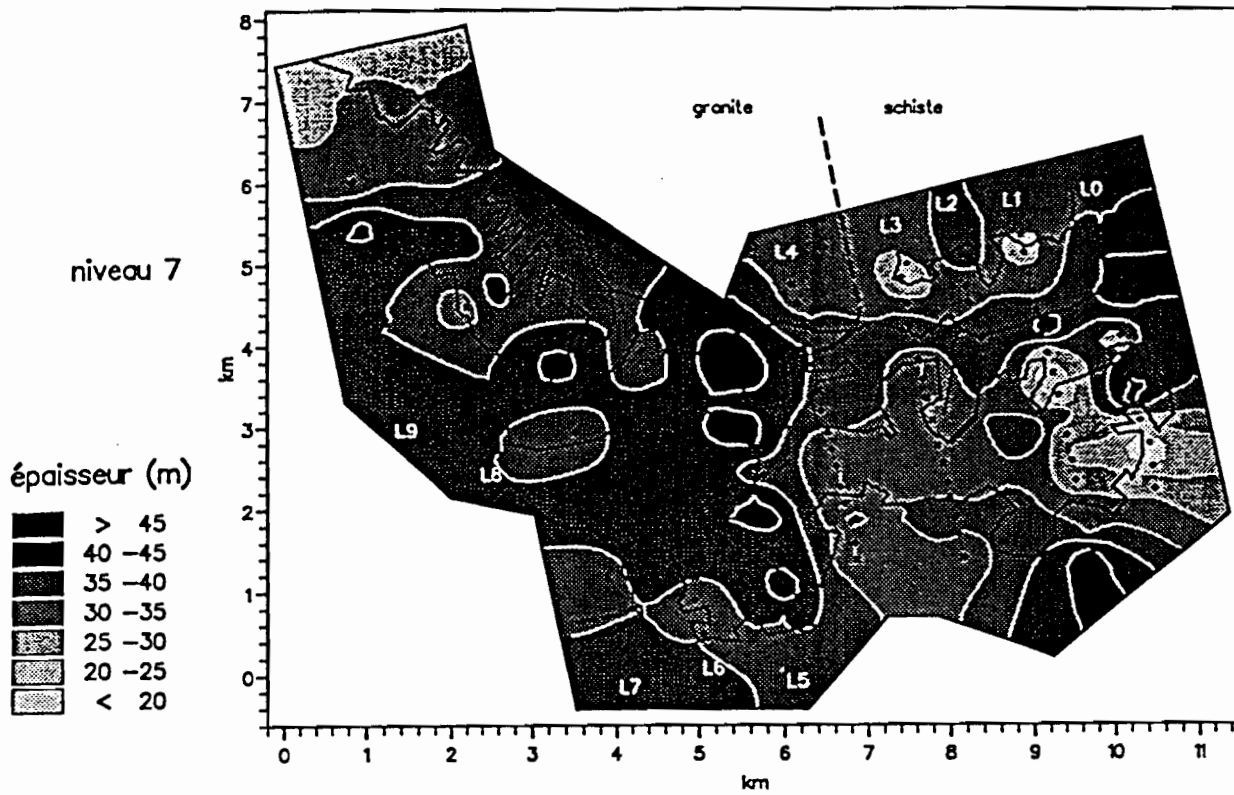




Carte 19 : Distribution des épaisseurs du niveau 5 (lithomarge non saturée "résistante").



Carte 20 : Distribution des épaisseurs du niveau 6 (lithomarge non saturée "conductrice").



Carte 21 : Distribution des épaisseurs du niveau 7 (lithomarge saturée).

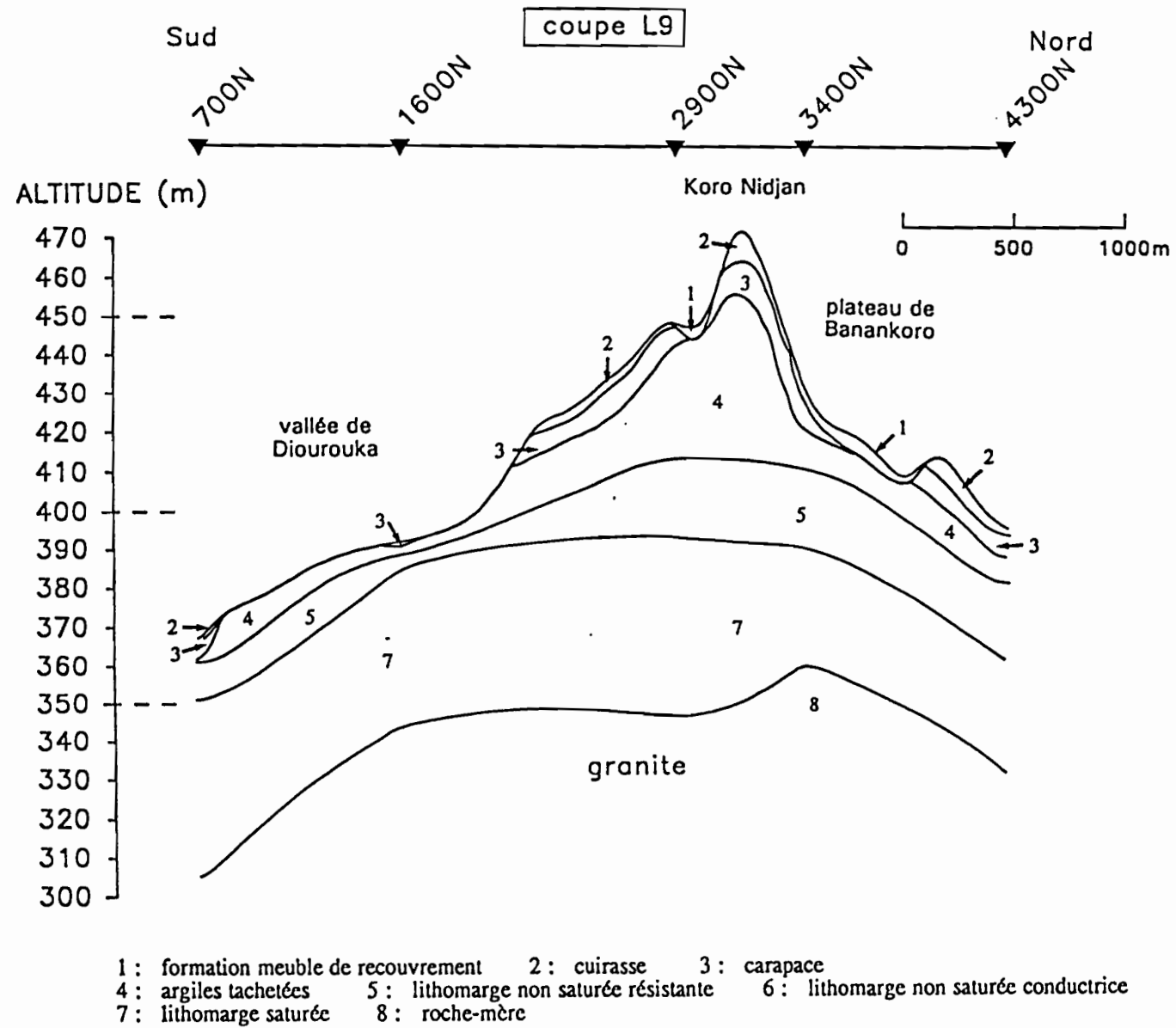


Figure 10 : Coupe géoélectrique du layon L9.

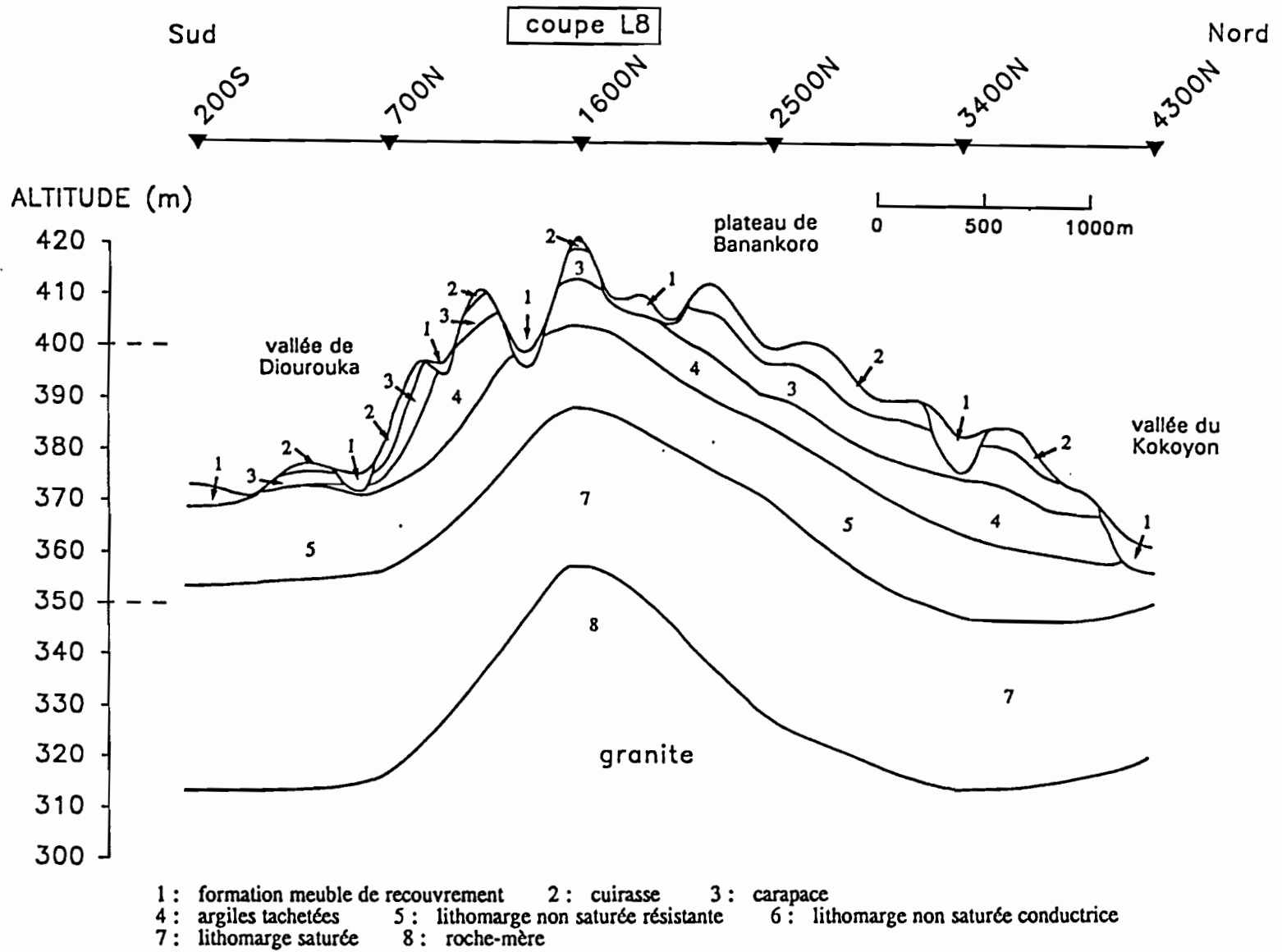


Figure 9 : Coupe géoélectrique du layon L8.

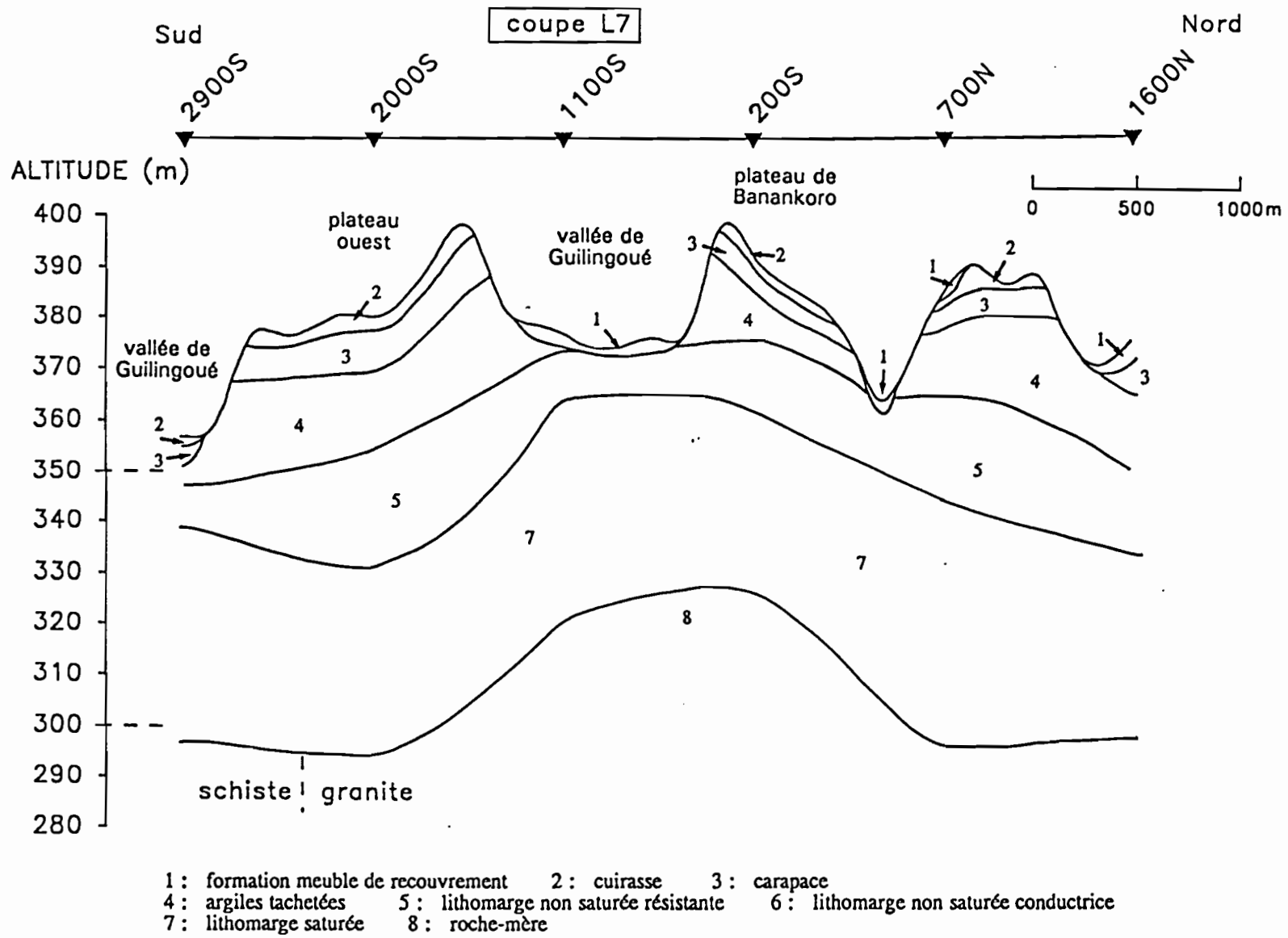


Figure 8 : Coupe géoélectrique du layon L7.



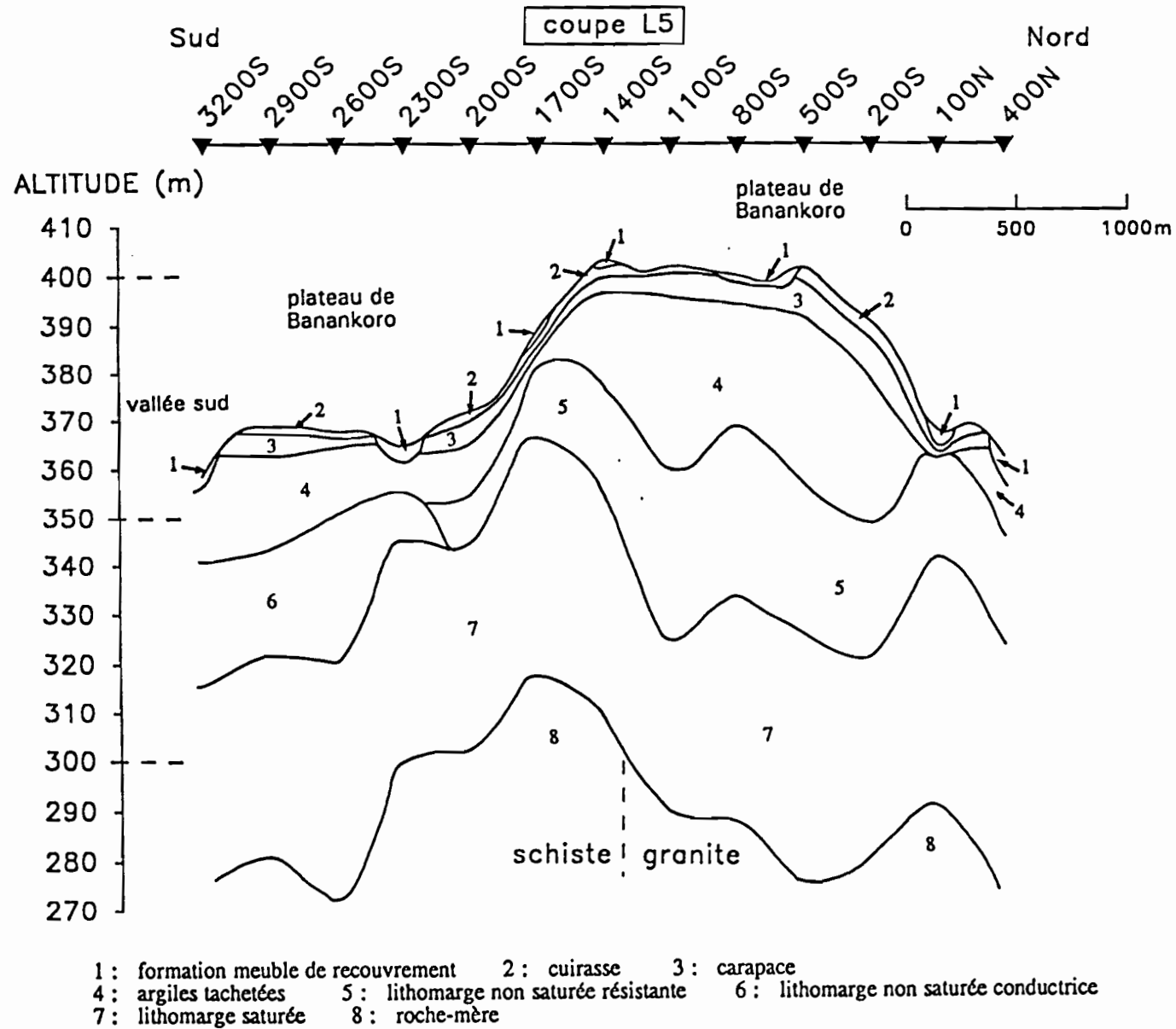


Figure 6 : Coupe géoélectrique du layon L5.

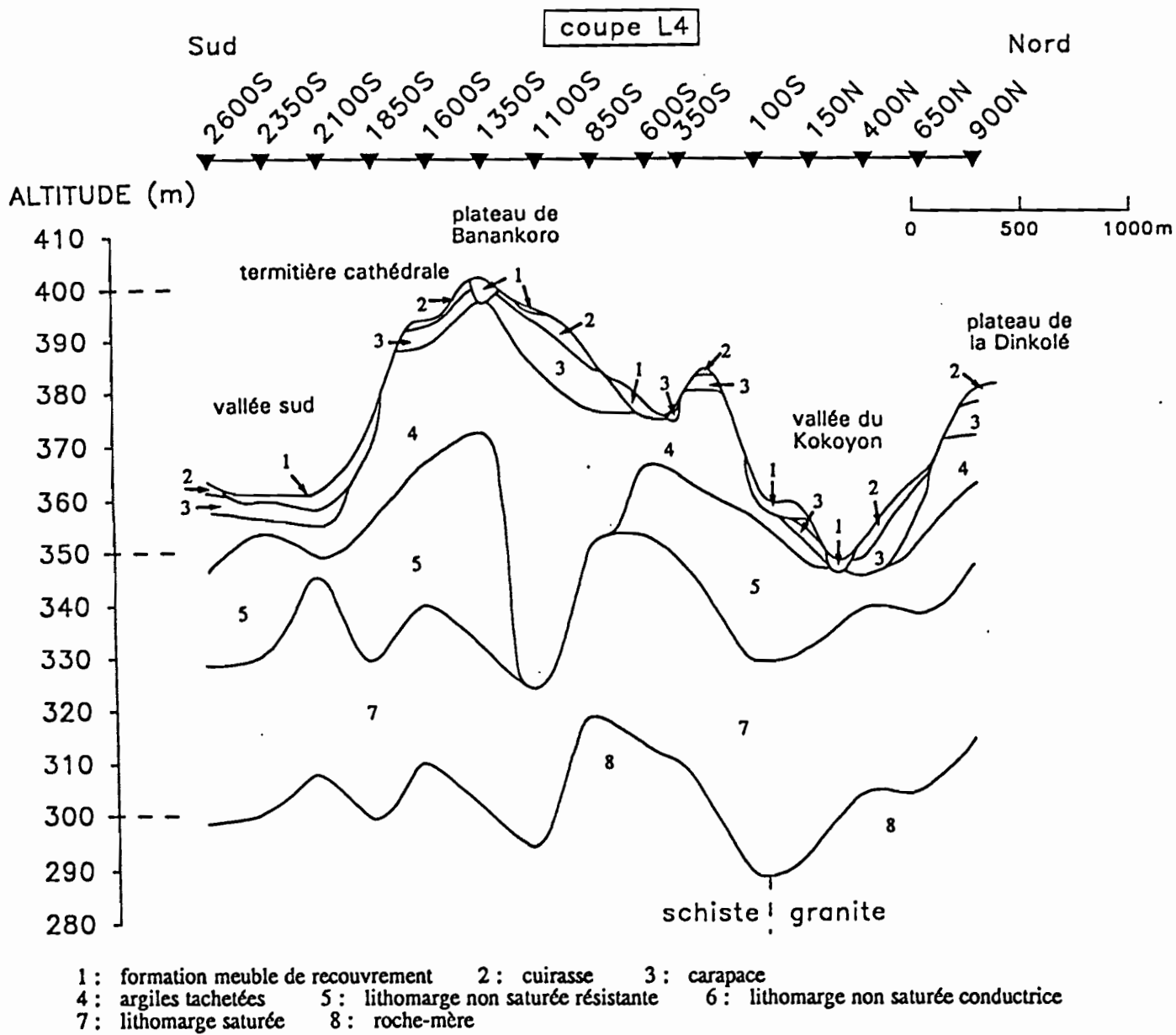


Figure 5 : Coupe géoélectrique du layon L4.



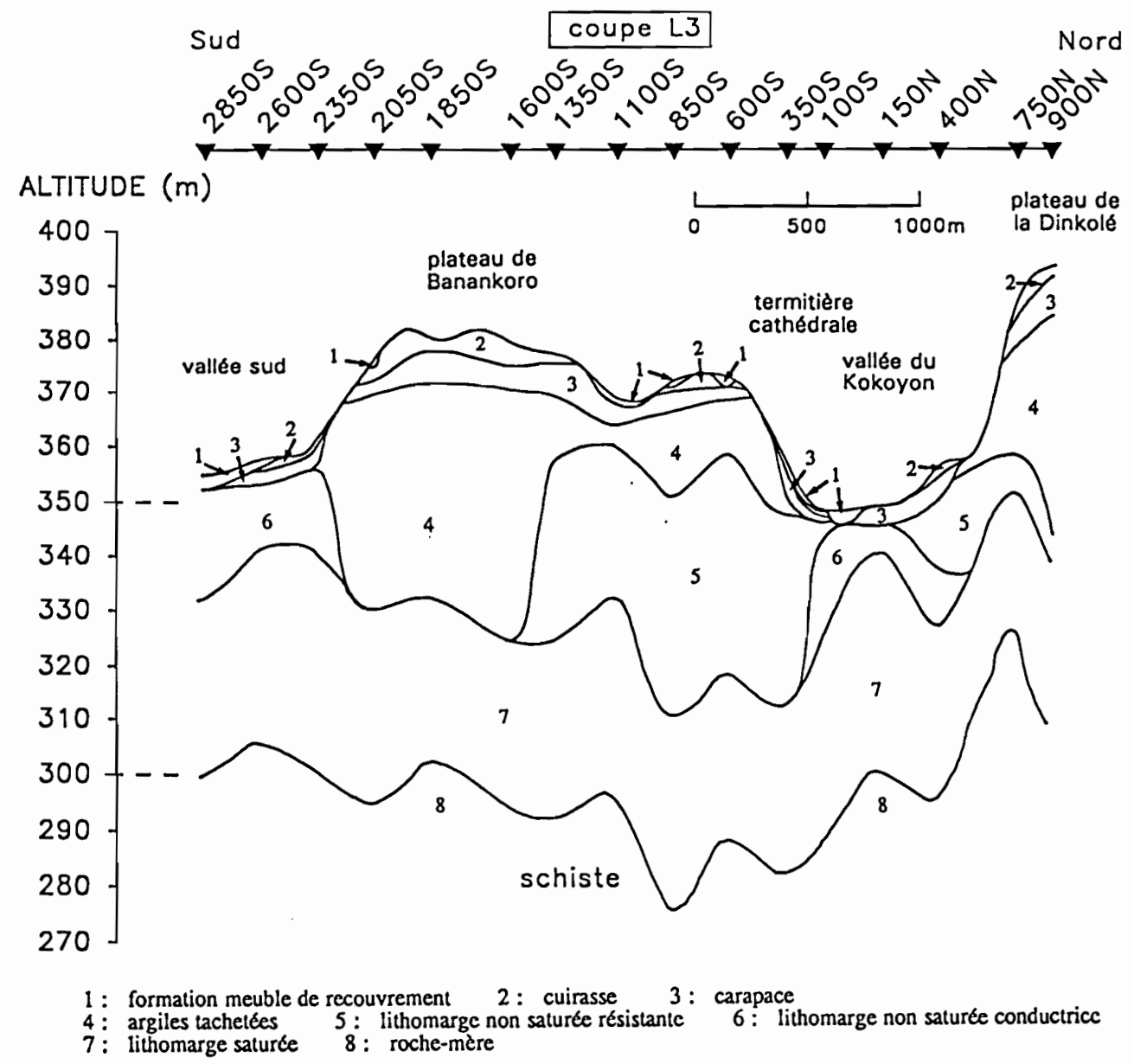
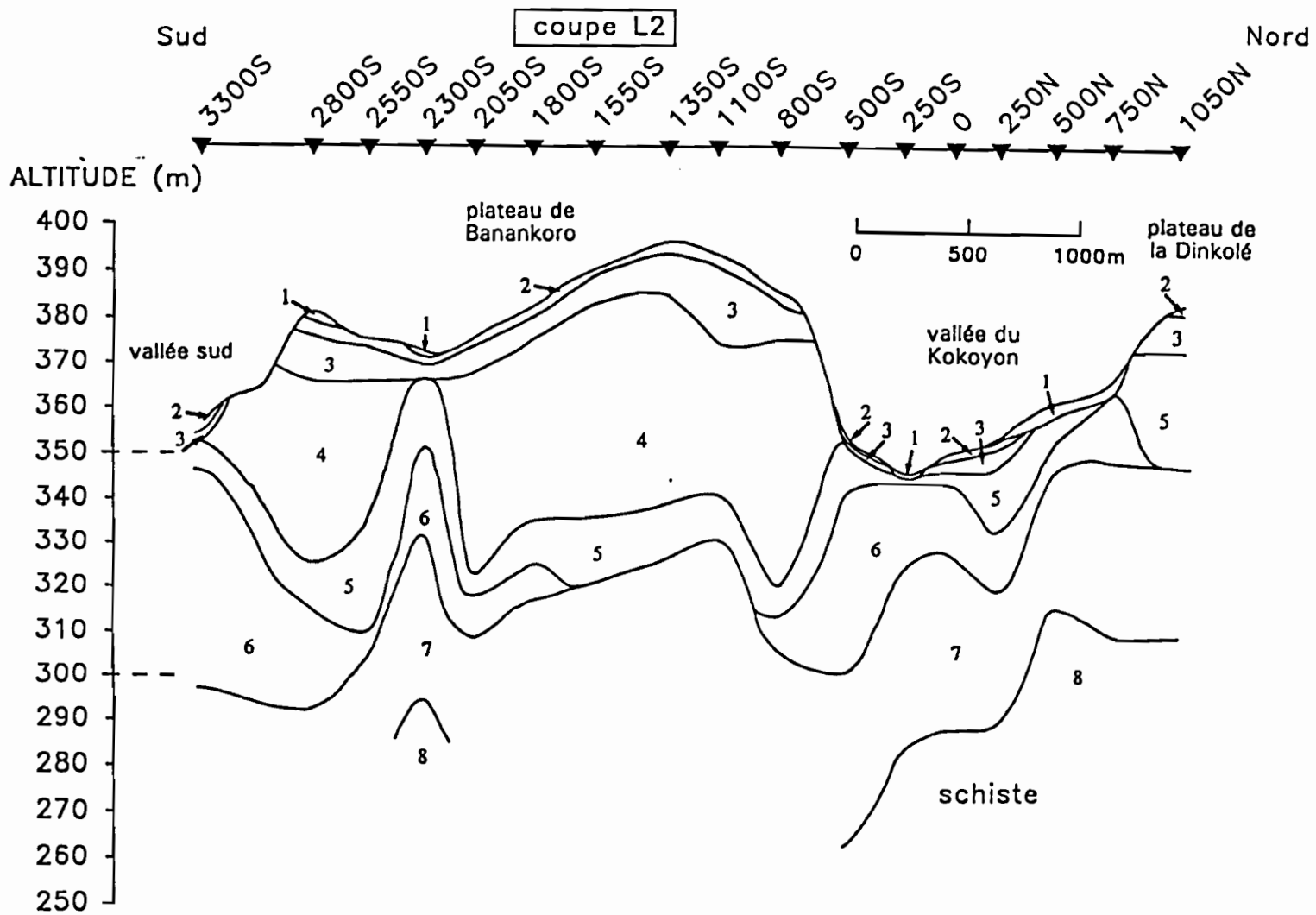


Figure 4 : Coupe géoélectrique du layon L3.



- 1 : formation meuble de recouvrement
- 2 : cuirasse
- 3 : carapace
- 4 : argiles tachetées
- 5 : lithomarge non saturée résistante
- 6 : lithomarge non saturée conductrice
- 7 : lithomarge saturée
- 8 : roche-mère

Figure 3 : Coupe géoélectrique du layon L2.

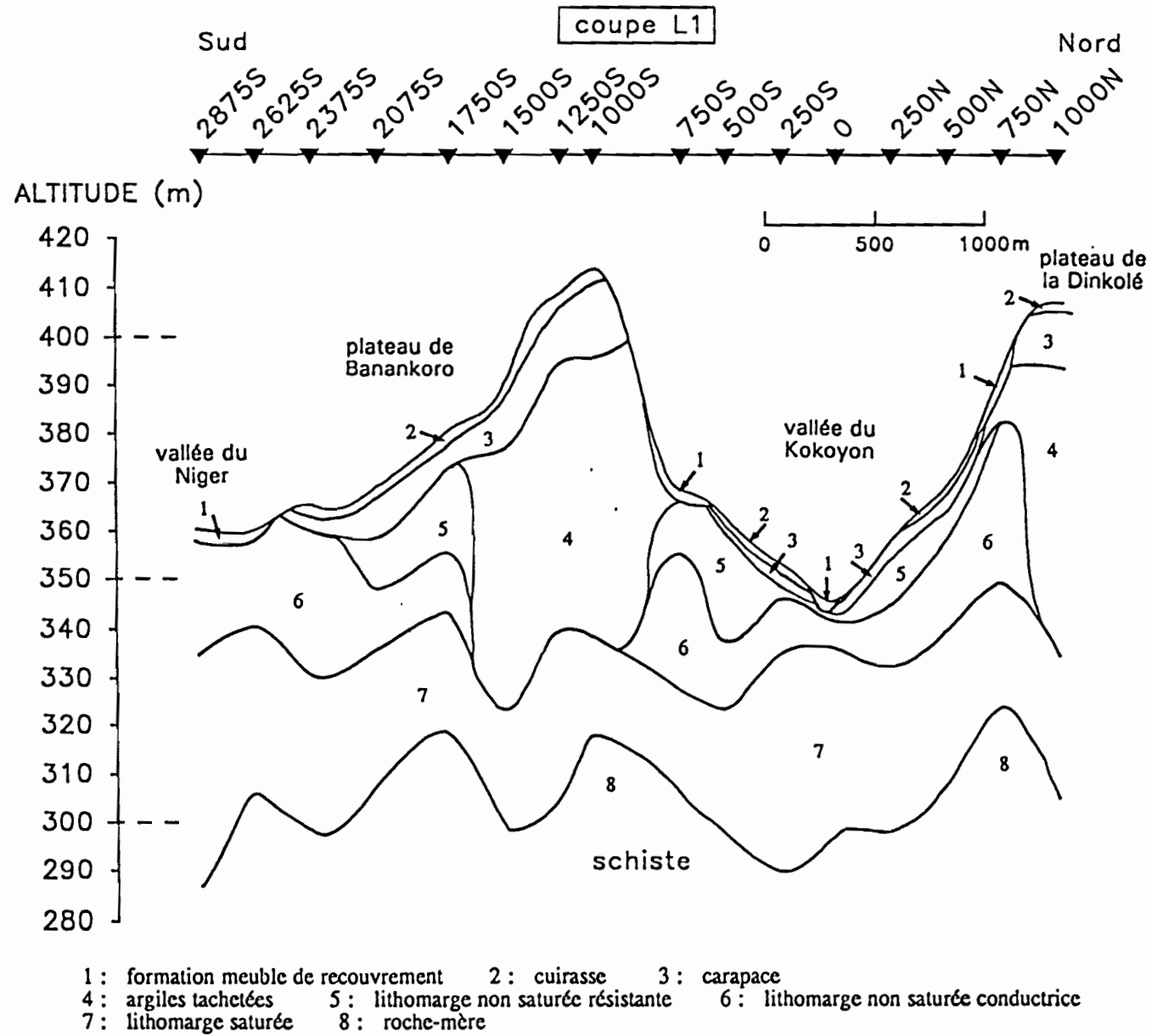


Figure 2 : Coupe géoélectrique du layon L1.

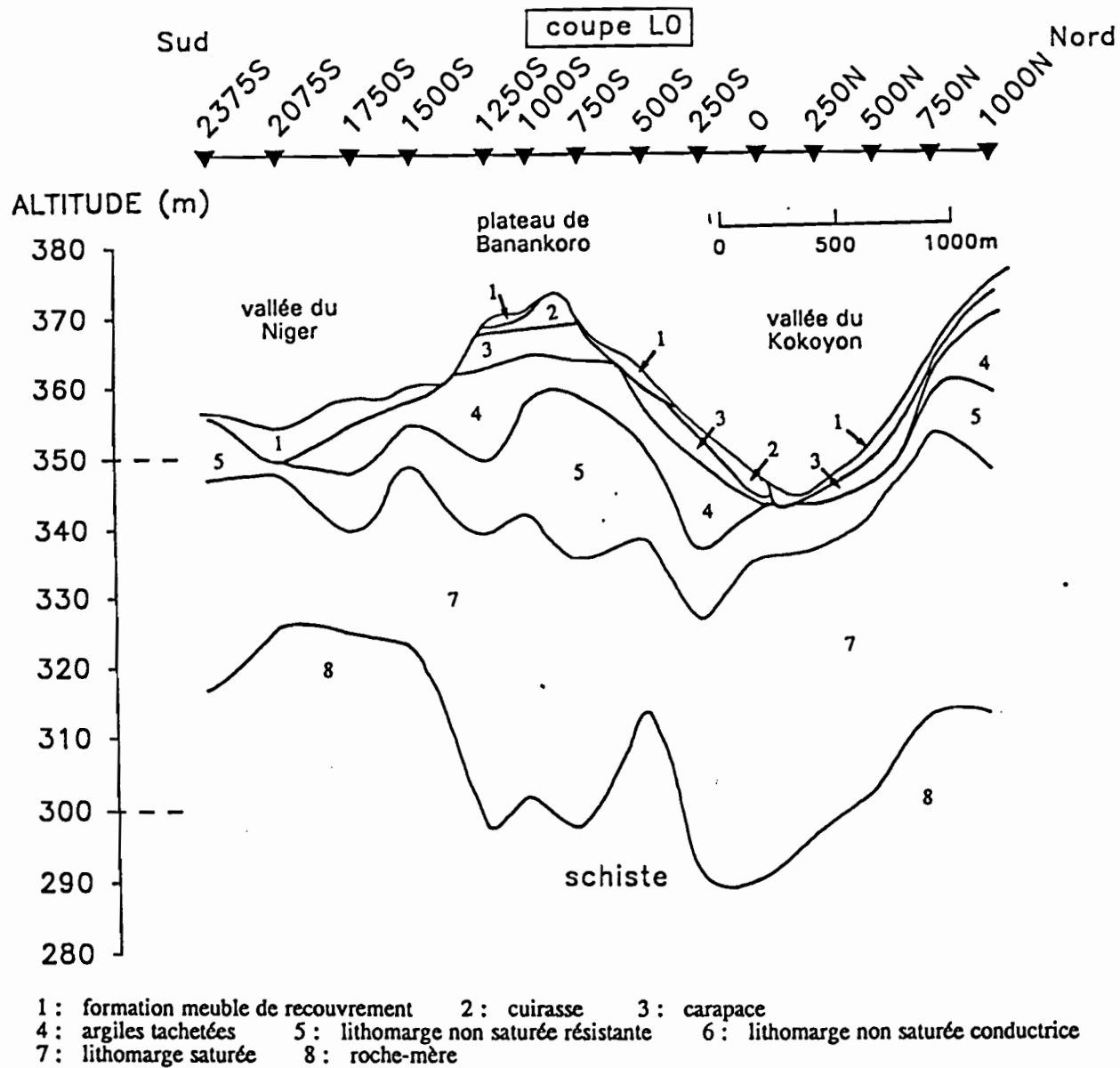
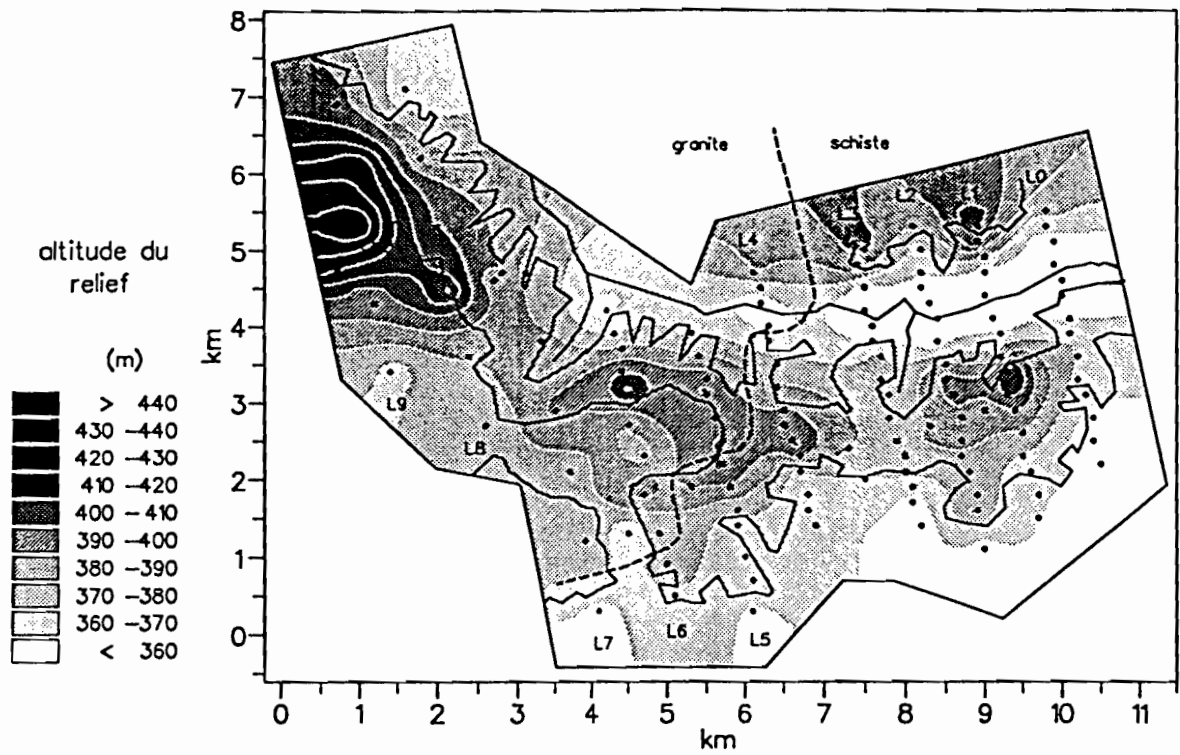
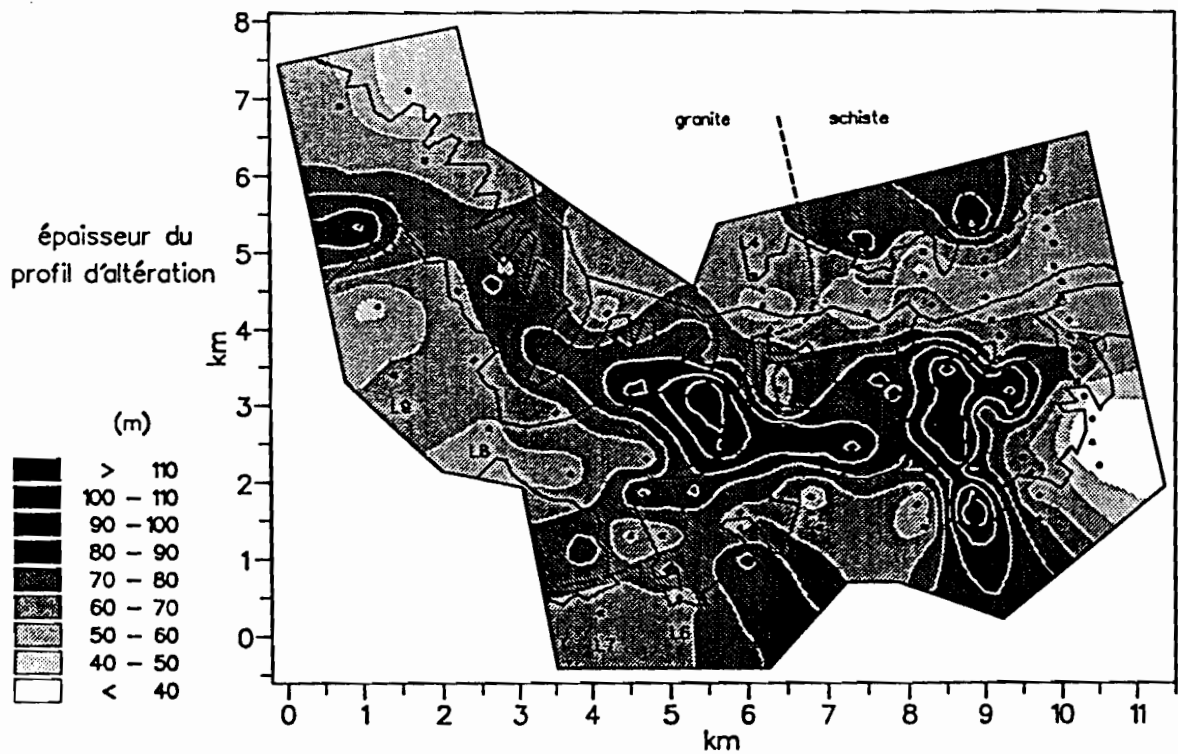


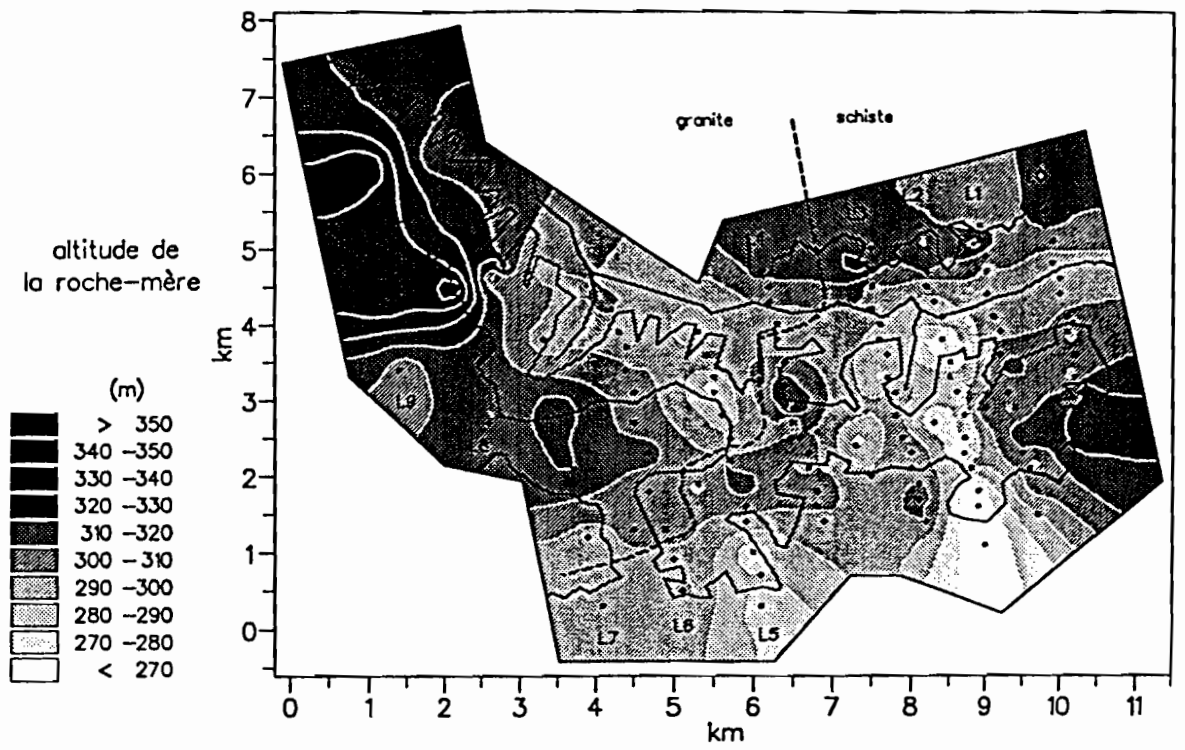
Figure 1 : Coupe géoélectrique du layon L0.



Carte 22 : Relief de la surface topographique de l'ensemble du secteur d'après les altitudes des stations.



Carte 23 : Distribution des épaisseurs du profil d'altération sur l'ensemble du secteur.



Carte 24 : Altitude du toit de la roche-mère sur l'ensemble du secteur.

## RESUME

Les méthodes géophysiques légères comme le sondage magnéto-tellurique et le sondage électrique permettent d'étudier l'organisation des profils d'altération latéritiques très développés, par la mesure des résistivités électriques à différentes profondeurs, suivie de l'interprétation de la courbe obtenue par un modèle tabulaire qui décompose le profil en une succession de niveaux caractérisés chacun par une épaisseur et une résistivité. Le travail présenté dans ce mémoire montre l'application du sondage électrique sur une ancienne couverture latéritique cuirassée et très épaisse (> 50m), située au Sud-Mali, au bord de la plaine du Niger. Le secteur d'étude, d'une superficie de 50km<sup>2</sup> environ, centré sur un plateau allongé et ses vallées adjacentes, est couvert par 127 stations de mesure, implantées le long de dix layons. Il s'agit d'abord de caractériser et d'identifier les différents niveaux géoélectriques qui se superposent dans le profil d'altération, pour ensuite étudier leurs variations spatiales à l'échelle du paysage, en fonction de la morphologie du relief et du type de roche-mère, schiste et granite.

Pour chaque station, les résistivités apparentes du profil d'altération ont été mesurées par un dispositif Schlumberger en prenant au minimum onze écartements d'électrodes, compris entre 4 et 600m. D'une manière générale, les résistivités sont très fortes en surface (environ 10000 $\Omega$ m), puis elles diminuent régulièrement à travers le profil jusqu'à un minimum (moins de 100 $\Omega$ m), et augmentent finalement lorsque la roche-mère est atteinte. A moyenne profondeur, pour des écartements compris entre 40 et 200m, des différences de résistivité significatives apparaissent en fonction de la morphologie du paysage : les profils de plateau sont plus résistants que ceux de vallée. On distingue ainsi quatre catégories de profils géoélectriques, de résistivités apparentes croissantes à moyenne profondeur : 1) les profils conducteurs situés au centre des vallées, à proximité des axes de drainage, 2) les profils moins conducteurs localisés en périphérie des vallées, 3) les profils plus résistants des zones basses des plateaux et 4) les profils très résistants des bombements topographiques des plateaux. Une simulation par un modèle tabulaire montre que cette différenciation géoélectrique correspond à un épaississement de la partie médiane du profil d'altération depuis le centre des vallées jusqu'au sommet des plateaux.

Toutes les courbes de sondage électrique ont été interprétées par un modèle tabulaire en se recalant sur les résultats de sondages magnéto-telluriques effectués sur les mêmes stations. Huit niveaux géoélectriques sont mis en évidence pour l'ensemble du secteur : 1) l'horizon meuble de recouvrement produit par le démantèlement superficiel des horizons indurés et des termitières (7000 $\Omega$ m), 2) la cuirasse ferrugineuse (18000 $\Omega$ m), 3) la carapace ferrugineuse (4500 $\Omega$ m), 4) les argiles tachetées (1100 $\Omega$ m), 5) la lithomarge non saturée "résistante" (650 $\Omega$ m), 6) la lithomarge non saturée "conductrice", 7) la lithomarge saturée (23 $\Omega$ m) et 8) la roche-mère (430 $\Omega$ m). Les trois premiers niveaux ont des épaisseurs moyennes métriques, les quatre suivants sont décimétriques. A l'exception de la lithomarge saturée, les autres niveaux du profil ont des répartitions et des épaisseurs très variables. Il n'y a pas de différence systématique entre les profils développés sur schiste et ceux sur granite. Mais à l'échelle du paysage, les profils du secteur granitique sont plus homogènes, surtout pour les niveaux argileux non saturés. La lithomarge non saturée "conductrice" se localise préférentiellement dans les vallées du secteur schisteux où elle tend à remplacer la lithomarge non saturée "résistante". Les profils des plateaux apparaissent nettement plus complets et plus épais que ceux des vallées, respectivement 80 et 60m en moyenne. Les coupes géoélectriques montrent que les reliefs formés par les plateaux actuels ont été dégagés par l'enfoncement du réseau hydrographique et l'élargissement des vallées au cours d'une phase d'érosion mécanique majeure. Il y a une tendance générale à la rectification de la morphologie de la surface entre les plateaux et les vallées à la base du profil d'altération. Mais cette tendance ne s'accompagne pas d'un nivellement systématique du front d'altération et on observe plusieurs types de transformation du relief par altération différentielle. Sur le secteur granitique, le bombement topographique des plateaux est préservé au niveau du toit de la roche-mère, tandis que sur le secteur schisteux, la présence d'une structure minéralisée se traduit par une inversion de relief due à l'approfondissement du profil d'altération.

**Mots-clés :** latérites, sondage électrique, profil d'altération, résistivité, érosion, morphodépendance, lithodépendance, dynamique du paysage, Mali.