

SOMMAIRE

REMERCIEMENT

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ANNEXES

INTRODUCTION

CHAPITRE I : Glissement du terrain

CHAPITRE II : Présentation de la zone d'étude

CHAPITRE III : Méthodologie appliquée à l'étude

CHAPITRE IV : Interprétations et résultats

CONCLUSION

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

TABLE DES MATIERES

RESUME

LISTE DE FIGURES

Figure 1: Représentation du glissement du terrain.....	2
Figure 2: Distance de parcours.....	4
Figure 3: Glissement rocheux de type rotationnel	10
Figure 4: Glissement rocheux de type creep-fauchage	10
Figure 5: Chute de blocs rocheux, basculement de blocs	11
Figure 6: Glissement plans.....	12
Figure 7: Glissement de coins ou dièdre	12
Figure 8: Toppling.....	13
Figure 9: Carte de localisation du site d'étude.....	14
Figure 10: Extrait de la carte géologique de la zone d'étude	18
Figure 11: Coupe profile de ligne ferroviaire de la FCE	19
Figure 12: Dispositif de mesure de résistivité électrique	20
Figure 13: Quadripôle AMNB en sondage électrique.....	21
Figure 14: Le résistivimètre Syscal R2 et ses accessoires en mode multi-électrodes.....	22
Figure 15: Séquences de mesures	23
Figure 16: Principe de l'inversion des données	24
Figure 17: Plan de masse des travaux géophysiques	26
Figure 18: Interprétation de sondage électrique.....	27
Figure 19: Coupe géo-électrique de profil 01	28
Figure 20: Coupe géo-électrique de profil 02	29
Figure 21: Coupe géo-électrique de profil 02	29
Figure 22: Coupe géo-électrique de profil 03	30
Figure 23: Coupe géo-électrique de profil 04	30

LISTE DES ABREVIATIONS

°C : degré Celsius

2D : Deux dimensions

ESPA : Ecole supérieure polytechnique d'Antananarivo

FCE : Fianarantsoa Cote Est

LNTPB : Laboratoire Nationale des Travaux Publics et des Bâtiments

m : mètre

mm : millimètre

PK : Point Kilométrique

SEV : Sondage électrique verticale

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Paysages dominant dans la région 16

Photo 2: Cadre géomorphologique..... 17

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristique des lignes électriques 25

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1: Photo de résistivimètre et ses accessoires 33

Annexe 2: Tableau représentant les porosités, perméabilités et résistivités des différentes roches 34

Annexe 3: Figure représentant le résistivité des roches 35

Annexe 4: Photo de forage du reconnaissance par LNTPB 35

INTRODUCTION

Pendant la période coloniale, plusieurs chemins de fer ont été faits par le colon à Madagascar. Ils sont faits pour transporter des matériaux lourds, des matières premières à exporter ou des produits finis arrivés. Même si on peut dire maintenant que la voie de circulation est moderne, l'utilisation des chemins de fer est toujours nécessaire car plusieurs lieux ne sont pas accessibles par la voie routière. Parmi eux, le FCE est une voie ferrée qui relie Fianarantsoa et Manakara.

Mais, actuellement, ce chemin a un problème par ce qu'il y a une partie ripée dans le village de Madiorano qui se trouve entre ces deux villes. Ce ripage peut entraîner un risque d'endommager le train qui circule sur cette voie. L'objectif de cette étude est de chercher alors la cause de cette déviation. La première possibilité dans la pensée est un glissement de bloc qui la provoque, donc il faut faire un travail de prospection autour de la zone d'étude afin de déterminer la nature des roches, la recherche de tout ce qui provoque ce glissement pour justifier notre raisonnement. D'où ce mémoire s'intitule : « Etude de glissement de terrain par méthode géophysique sur la ligne FCE à PK46+600 province de Fianarantsoa ».

Pour cela, cet ouvrage est articulé en quatre chapitres ; en premier chapitre, on va voir les généralités sur ce que l'on appelle glissement. Au deuxième chapitre, nous allons détailler le contexte de la zone d'étude, en troisième chapitre, nous allons parler de la méthodologie appliquée pour la réalisation de cette tâche. Et le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats de cette étude et ses interprétations y afférentes.

CHAPITRE I : GLISSEMENT DE TERRAIN

Dans le cas général, le glissement est toujours un mauvais phénomène sur la vie quotidienne, il est donc nécessaire d'avoir une meilleure connaissance pour gérer cette situation. Alors, pour mieux avoir une bonne compréhension sur ce thème, nous allons voir dans ce chapitre les généralités, les causes et les différents types de l'instabilité de massif rocheux.

I-1 Définition

C'est la rupture d'une partie d'un talus qui se manifeste habituellement par un déplacement en bloc ou en particule solide du massif vers la zone inférieure. En outre, le glissement peut être invisible, c'est-à-dire le bloc de roche se déplace à l'intérieur d'elle-même, mais sa conséquence que nous voyons. Il peut entraîner une catastrophe sur les infrastructures ou dans la vie humaine.

I-2 Aspect général d'un glissement de terrain [8]

La surface de glissement est assimilable à une surface cylindrique. On fera donc l'étude pour des tranches de massif, découpées perpendiculairement à l'axe de la surface de rupture. Si on représente la coupe transversale du terrain (donc une tranche), l'aspect de la surface de rupture sera donc un arc de cercle. Le sommet du talus s'affaisse et il se forme un bourrelet de pied.

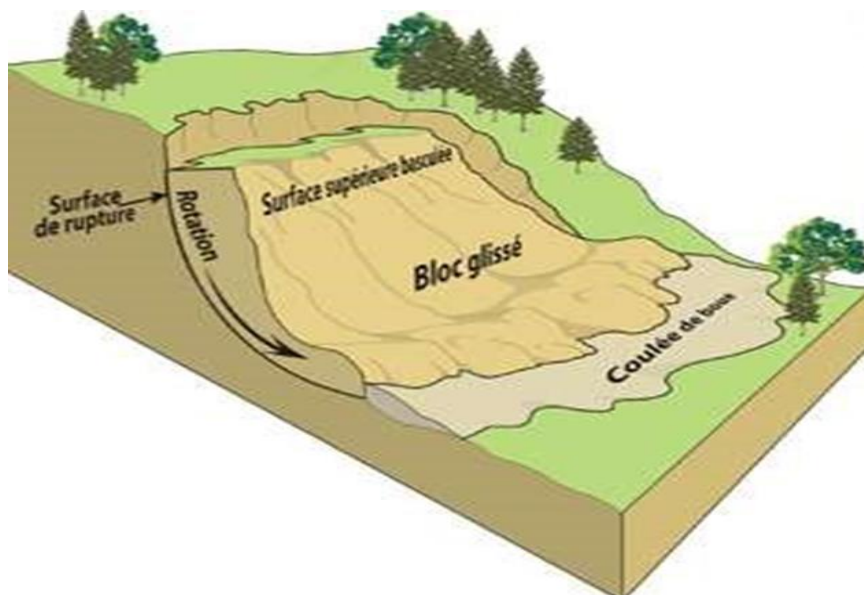


Figure 1: Représentation du glissement du terrain

En générale, la stabilité dépend :

- des moments résistants (pris par rapport au centre du cercle de rupture), dus à la résistance au cisaillement le long de la ligne de rupture ;
- des moments moteurs dus principalement au poids du massif en déplacement.

Dans tous les cas, la propagation des blocs (éloignement de la zone instable de la zone vulnérable, trajet parcouru, distance qu'un ensemble de blocs rocheux en mouvement est susceptible de parcourir) sont des éléments importants aussi bien dans l'appréciation du risque que dans le choix et le dimensionnement des mesures confortatives.

I-2-1 Proximité du risque

La distance entre le risque et la zone vulnérable conditionne les stratégies de sécurité à adopter. On distingue deux configurations de risques (toutes les configurations intermédiaires pouvant, bien entendu, exister) :

- risque proche : le massif rocheux instable menace directement les biens vulnérables.
- risque lointain : la zone de départ des blocs est nettement séparée de la zone vulnérable et les blocs n'atteindront les biens à protéger qu'après un parcours plus ou moins long. L'étude de cette propagation constitue une part non négligeable des études à réaliser.

I-2-2 Trajectoire

La propagation dont il vient d'être question est influencée par différents éléments :

- morphologie des éléments ;
- nature du terrain sur lequel ils se déplacent ;
- morphologie du versant (existence de replats pouvant jouer le rôle de tremplins etc.) ;
- présence de couvert végétal, boisement...

Une étude trajectographique est nécessaire pour déterminer cette propagation.

Des logiciels spécialisés existent pour modéliser la situation et déterminer entre autres, la distance de parcours, les hauteurs de rebonds, les vitesses au point d'impact. Elle tient

compte des éléments cités ci-dessus et nécessite, entre autres, un lever topographique très précis de la zone à étudier.

I-2-3 Distance de parcours

Il existe un certain nombre de théories et modélisations permettant d'apprécier cette distance, en ce qui concerne les chutes de blocs et les écroulements rocheux.

Comme pour toutes les théories appliquées à des éléments naturels, il convient de les appliquer avec discernement en gardant à l'esprit les hypothèses sur lesquelles elles sont fondées et les exceptions qui pourraient se présenter. Toutefois, elles apportent suffisamment des éléments de réponse pour pouvoir être utilisées en pratique.

La distance de parcours de tels mouvements est bien caractérisée par l'angle de déplacement défini à la figure 2. Sur cette figure, on note la position de la masse déplacée, avant (Source) et après le dépôt (Deposit). Entre le pied du dépôt et le sommet de l'arrachement, la distance verticale est appelée H et la distance horizontale est désignée par L. L'angle de déplacement α est donné par : $\text{tg}\alpha = H/L = F$.

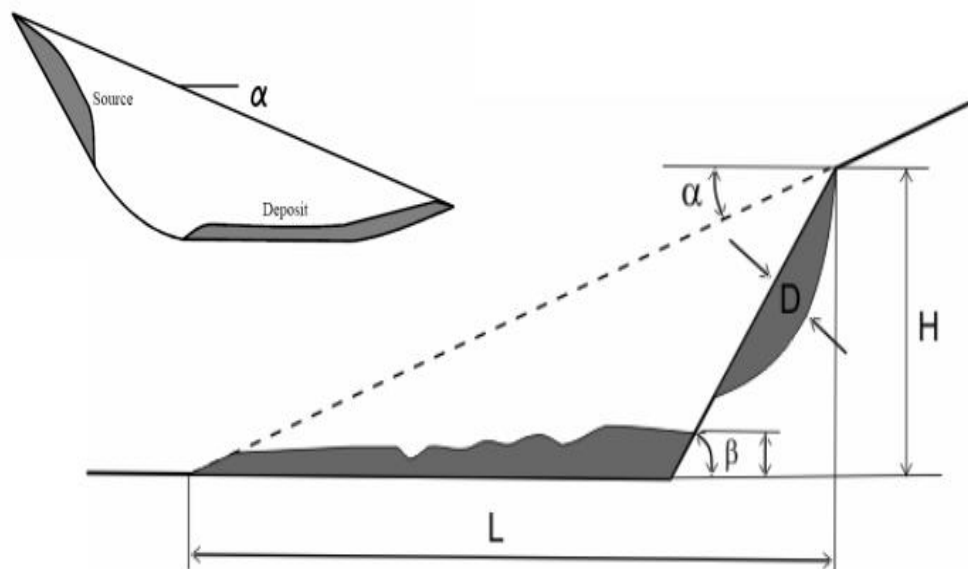


Figure 2: Distance de parcours (à gauche, d'après Heim, 1932)

I-3 Notions sur le massif rocheux [8]

En pratique, la détermination des différents facteurs internes, se fait par une étude géologique, c'est-à-dire comprenant les facettes lithologique, structurale, hydrogéologique, climatique, géomorphologique et géotechnique.

Les aspects suivants doivent au minimum être inclus dans l'étude :

- **données géologiques**
 - morphologie, processus dynamiques, typologie de l'instabilité (mécanismes possibles) ;
 - lithologie, faciès, état d'altération ;
 - lever structural : familles de discontinuités : identification, localisation, orientation, fréquence, état d'altération, remplissage, persistance...
 - hydrogéologie : présence ou non de venues d'eau, de nappes (en relation avec les données climatiques), débits, exutoires....
- **paramètres mécaniques**
 - des matériaux rocheux constitutifs (principalement la résistance en compression simple et en traction) ;
 - des discontinuités (angle de frottement interne, cohésion (en contraintes effectives)).

I-3-1 Reconnaissances géologiques

Le choix des méthodes d'investigations complémentaires dépend de la complexité du problème, de l'urgence et des contingences budgétaires. Ces méthodes peuvent être réparties en trois catégories :

- télédétection

La télédétection, étude des photos aériennes et des images satellites, est particulièrement intéressante pour cartographier les mouvements de terrain, en plan et en élévation. En outre, le suivi d'un mouvement lent (s'étendant sur plusieurs années) peut avantageusement être réalisé par des techniques telles que l'interférométrie radar qui autorisent des précisions quasi millimétriques en altitude. Le coût et les délais nécessaires à l'acquisition et au traitement des données réservent ce type d'investigations aux glissements de grande amplitude.

- forages et autres essais mécaniques

Les forages carottés complètent l'information géologique obtenue en affleurement et permettent son extrapolation au sein du massif. Ils permettent une quantification du degré de fracturation du massif, le prélèvement des échantillons pour divers essais de laboratoire et la réalisation d'essais hydrauliques et/ou mécaniques. Le coût des forages carottés est en général assez élevé, dépendant des conditions d'accès, du nombre total de forages à réaliser, de l'urgence, etc.

- prospection géophysique

La prospection géophysique comprend un ensemble des méthodes non destructives permettant d'obtenir rapidement une vue globale de certaines caractéristiques du terrain et de déterminer leur variabilité dans la zone prospectée. Elle apporte des informations par elle-même et permet en outre d'implanter judicieusement les reconnaissances ponctuelles, les forages, et d'interpoler (extrapoler) les renseignements obtenus par celle-ci. L'utilisation de la prospection géophysique étant de plus en plus répandue.

I-3-2 Structure [1]

Une des caractéristiques fondamentales des roches et des massifs est qu'à différentes échelles, du "micro" au "macro", ils sont constitués de matériaux "intacts", séparés par des discontinuités.

En règle générale, on considère les successions :

- minéraux, considérés comme éléments de base, postulés non affectés des discontinuités ;
- matériaux rocheux constitués de minéraux séparés par des microdiscontinuités ;
- massifs rocheux constitués de matériaux rocheux séparés par des macrodiscontinuités.

Les caractéristiques d'un matériau à une échelle donnée dépendent de celles des constituants et de celles des discontinuités.

Le terme de discontinuité est utilisé pour désigner toute surface qui interrompt physiquement la continuité de la massive rocheuse et de ses propriétés mécaniques, hydrauliques et thermiques. Cette surface est en général assimilable, sur une certaine étendue, à un plan perpendiculairement auquel la résistance à la traction est souvent faible, voire nulle.

Les discontinuités représentent des types de surface très variées dont l'identification géologique, depuis l'échelle millimétrique jusqu'à l'échelle kilométrique, apporte des informations importantes sur le nombre de leurs paramètres géométriques et mécaniques.

Type de discontinuités

Les surfaces des discontinuités sont décrites et classées par le géologue d'un point de vue génétique. Bien que les mécaniciens de roches (et spécialement les anglosaxons) parlent généralement de "*joints*", sans faire de différenciation génétique, l'utilisation d'une nomenclature correcte, précisant bien le type de discontinuité, n'est pas anodine ; la genèse d'une discontinuité (de traction, de cisaillement...) dépend ses caractéristiques hydrauliques et mécaniques.

Les principales discontinuités présentes dans les massifs rocheux sont :

- **les surfaces de stratification**, plus ou moins régulières, séparant les strates. Ces surfaces peuvent être soulignées de minces dépôts argileux ou schisteux favorisant le glissement banc sur banc ;
- **la schistosité**, résultant de la réorientation des minéraux constitutifs dans une direction perpendiculaire à celle des contraintes de compression auxquelles le massif a été soumis ;
- **les failles** (fractures), surfaces de rupture, par cisaillement sous l'effet des contraintes de compression (failles inverses ou normales selon l'orientation des contraintes principales ...) ou par traction. Le déplacement des lèvres de la rupture, le rejet, peut avoir une amplitude nulle ou atteindre plusieurs kilomètres. Il est évident que de la genèse de la faille va dépendre l'état de fracturation des épontes (masses rocheuses de part et d'autre de la fracture). Les plans de faille sont souvent marqués de stries indiquant le sens du mouvement et facilitant un rejet de la faille dans cette direction ;
- **les diaclases**, correspondant à une rupture de type fragile, en traction. L'origine des diaclases est contestée : plans liés à la diagenèse et au retrait de la roche pour certains, d'origine tectonique pour d'autres. Quoi qu'il en soit, dans les roches stratifiées, les diaclases se présentent pratiquement toujours sous la forme de deux familles orthogonales entre elles et perpendiculaires aux plans de stratification. Les diaclases découpent ainsi des éléments parallélépipédiques facilitant les chutes des blocs.

I-4 Instabilité de massif rocheux [3] [8]

L'objet de ce sous-titre est l'étendue de l'équilibre mécanique des masses de sol pouvant être mis en mouvement, soit par des phénomènes naturels (érosion, tremblements de terre,...) soit consécutivement à des travaux de chantier (terrassements, remblais, constructions).

Les instabilités rocheuses se produisent lorsqu'un certain nombre d'éléments, des facteurs, sont réunis et que pour une raison ou l'autre, l'état de stabilité précaire prévalant jusque-là, passe à une situation instable se traduisant par des déplacements des roches, caractérisés par leur type (glissement, écoulement, chute...), le volume rocheux concerné, la vitesse du mouvement et la distance parcourue.

I-4-1 Causes de glissement

Les glissements sont dus à des modifications soit dans les moments résistants, soit dans les moments moteurs. On distinguera donc plusieurs types de causes comme :

➤ diminution des moments résistants

Les causes de diminution des moments résistants peuvent être naturelles (changement des conditions hydrauliques du terrain) ou consécutives à des travaux (tranchées en pied de pente, ou chargement rapide augmentant les pressions interstitielles en pied de pente).

➤ une augmentation des moments moteurs

Certaines causes sont évidentes (surcharge du sommet de la pente, changement de pente...), d'autres le sont beaucoup moins. Les problèmes d'infiltration, en particulier, sont souvent difficiles à cerner. Par exemple, les écoulements ont une action hydrodynamique qui tend à augmenter les moments moteurs. C'est le cas des drainages au pied de talus servant au rabattement de nappe. En effet, l'écoulement provoque des forces de percolation qui augmentent les moments moteurs ; il ne faut donc plus simplement considérer l'aspect statique du problème de stabilité de pente.

En plus, les différentes formes d'instabilités des talus rocheux dépendent des facteurs "internes", propres au massif et "externes", interagissant avec lui :

- les facteurs internes sont liés à la nature des roches, aux caractéristiques des discontinuités qui affectent le massif rocheux et à la morphologie de celui-ci.

Ces facteurs sont ceux qui seront à étudier lors de la phase de caractérisation du massif rocheux en vue de l'évaluation de l'aléa. Ils sont déterminés en un instant donné et sont supposés constants.

- les facteurs externes sont liés à la manifestation climatique ou biologique favorisant l'altération du massif. Ils sont liés aussi à l'érosion de pieds de versants (action des rivières, infiltration...).

En plus, il existe aussi des facteurs externes anthropiques comme les fronts de taille de carrières, talus des voies de communication et excavations diverses modifient la géométrie naturelle des versants, en général dans un sens allant vers l'instabilité, les modes "brutaux" d'excavation accentuent l'état de fissuration du massif, les déboisements favorisent l'altération et les ravinements etc.

I-4-2 Types d'instabilité

La variété des systèmes de classification des instabilités de parois rocheuses révèle la complexité des phénomènes.

a. On peut répartir les instabilités en fonctions du volume total de matériaux et de la taille des éléments mobilisés lors de l'écroulement.

- **chutes de pierre** : petit nombre d'élément de volume unitaire inférieur à quelques dm^3
- **chutes de bloc** : petit nombre d'élément de volume unitaire atteignant quelques m^3
- **éboulements en masse** : volume de plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de m^3

b. On peut aussi classer les instabilités d'après leurs mécanismes et cinématiques de mouvement. Cette approche est utile pour le choix de méthode de calcul de l'aléa et de dispositif de confortement. Dans cette optique, on peut distinguer quatre grandes familles d'instabilités :

- **glissements de type "matériaux granulaires" plans - rotationnels - complexes - écoulements, éboulements**

Ils se produisent lorsque le massif rocheux est affecté d'un grand nombre de discontinuité, lui conférant, à l'échelle près, la nature d'un matériau granulaire. Ces mouvements s'apparentent aux glissements qui se produisent dans les terrains meubles et sont

fréquemment rotationnels (Figure 3). Ils procèdent des mêmes mécanismes et sont étudiés par les mêmes méthodes.

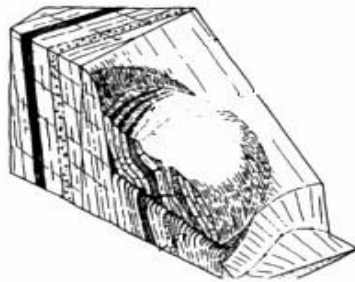


Figure 3: *Glissement rocheux de type rotationnel (d'après Goodman, 2000)*

➤ **mouvements lents par creep - fauchage**

Ils résultent de mouvement lent de déformation (reptation, fluage...) des roches sous l'effet de la pesanteur. Ils se manifestent surtout lorsque l'orientation des bancs rocheux est relativement parallèle au versant (Figure 4). Plus le comportement de la roche est "plastique", l'amplitude de mouvement est plus grande.

Si ces mouvements ne sont souvent pas préoccupants en eux-mêmes (sauf s'ils affectent une construction), ils peuvent atteindre un point critique et se transformer brusquement en un mouvement d'un autre type. C'est pourquoi ils sont à surveiller en tous les cas.

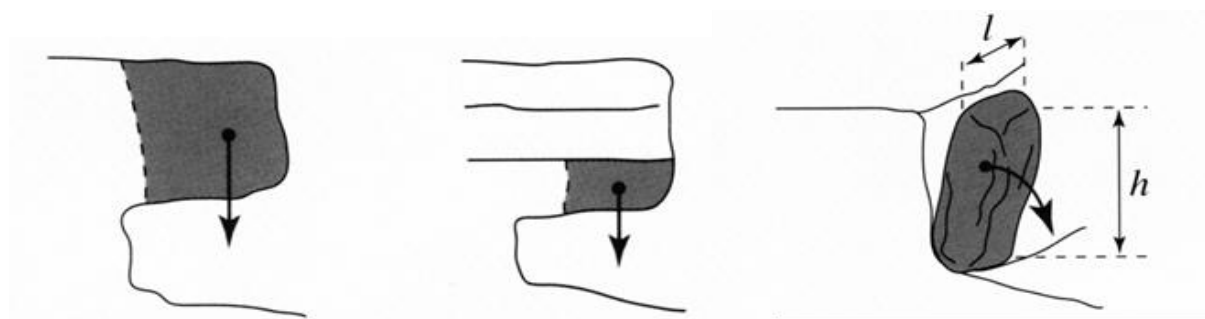


Figure 4: *Glissement rocheux de type creep-fauchage (d'après Goodman, 2000)*

➤ Chutes - écroulements

Les chutes et écroulements des blocs rocheux se produisent pour des configurations géologiques particulières : fissures parallèles à la surface libre, présence d'un banc érodable sous une couche résistante etc. (Figure 5)

Ils sont prévisibles à partir de l'observation de la paroi. Cependant, si la prédiction de l'existence du risque est possible, le calcul d'un coefficient de sécurité est nettement plus complexe et la détermination du moment où la rupture est susceptible de se produire encore plus délicate.



a) Chute d'un bloc

b) Chute d'un bloc stratiforme

c) Basculement d'un bloc

Figure 5: Chute de blocs rocheux, basculement de blocs (d'après LCPC, 2004)

➤ Glissements le long d'une ou plusieurs surfaces de discontinuité

Ces types de mouvement de terrain rocheux sont les plus répandus et sont ceux pour lesquels des méthodes d'analyse et des calculs spécifiques ont été développées.

En fonction du nombre de famille de discontinuité et de l'orientation de ces discontinuités par rapport à la surface libre de la paroi rocheuse, ils peuvent se présenter sous forme de :

- glissements plans, le long d'une seule surface de discontinuité, supposée infinie mais en réalité limitée latéralement (Figure 6).

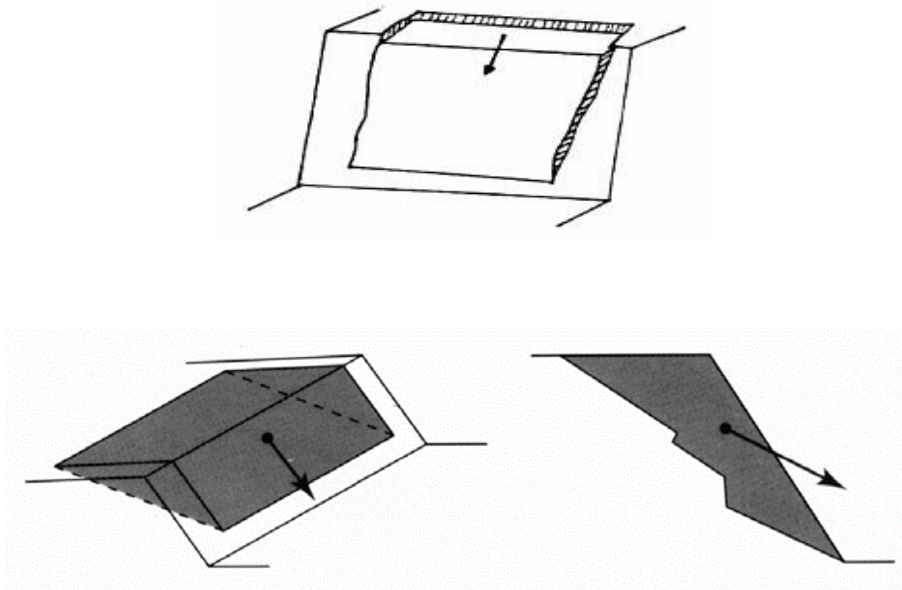


Figure 6: *Glissement plans (d'après Goodman, 2000, LCPC, 2004)*

- glissements de "coin" (ou de "dièdre"). Le dièdre, ou "coin" étant formé par deux plans de discontinuité dont l'orientation permet le glissement vers la surface libre (Figure 7).

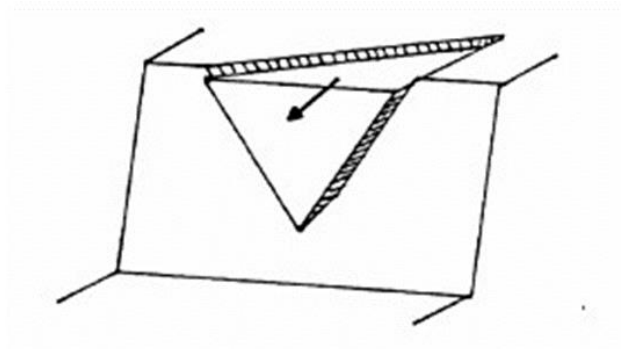


Figure 7: *Glissement de coins ou dièdre (d'après Goodman, 2000)*

- toppling (basculement), c'est-à-dire un glissement banc sur banc provoquant une sorte de fauchage de tête de banc mais avec glissement bien marqué. Le toppling ne se produit que dans des conditions spécifiques de pendage des bancs (ils doivent être assez redressés), de pente du talus rocheux (assez raide) et d'orientation relative : la stratification et le talus doivent avoir des directions voisines (Figure 8).

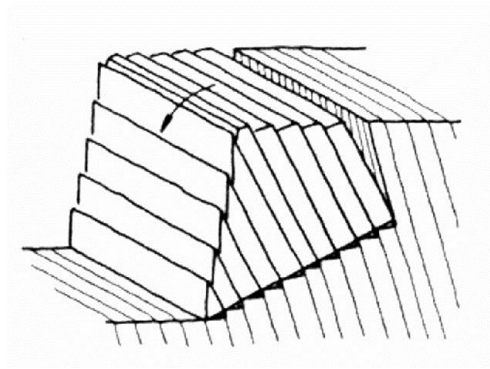


Figure 8: Toppling (bascullement)

c. On a aussi un autre classement de type de glissement d'après leur durée d'éboulement :

- **les écoulements** : chutes soudaines des masses rocheuses. Les causes peuvent être internes au massif (altération, accroissement de la pression interstitielle, glissement banc sur banc dans une roche stratifiée) ou externes (écroulement de masse mise en surplomb par érosion de masse sous-jacente plus tendre, fluage ou glissement d'une masse sous-jacente).
- **les coulées** : mise en mouvement brutale de masses de sol à l'état "liquide".
- **le fluage** : par opposition aux mouvements précédents, celui-ci est lent, de faible amplitude et se développe dans une zone dont les dimensions sont mal définies.

CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

II-2 Situation climatique [6]

II-2-1 climat

Dans l'ensemble, le climat est chaud et humide ; il se caractérise par des notables différences entre la falaise et la région côtière à hiver et été chauds.

Il est marqué par la proximité de la bordure occidentale de l'anticyclone de l'Océan Indien. Par conséquent, un alizé souffle constamment d'Est en Ouest, entraînant des masses d'air humide et chaud occasionnant une forte pluviométrie.

II-2-2 Pluviométrie

En général, on a une pluviométrie annuelle supérieure à 1500 mm. Le nombre de jours de pluies par année varie entre 140 et 175 jours. La saison pluvieuse s'étale de Décembre à Avril. Les mois les plus pluvieux sont Janvier et Février, le moins arrosé est le Septembre.

La région de Vatovavy-Fitovinany ne connaît pas la sécheresse d'où aucun mois sec n'a pu être identifié malgré l'avancement de la déforestation dans la région.

II-2-3 Température

La température moyenne annuelle dépasse en général 20 °C ; dans la période de l'Eté où le mois de février constitue le plus chaud. La température moyenne de cette région varie environ de 23° à 29°C, mais dans la période de l'hiver, c'est-à-dire dans le mois de Juillet qui est le plus frais, elle diminue jusqu'à 16° à 24°C. Notons que la température et la pluviométrie moyenne annuelle varient selon l'altitude et la position par rapport à la mer.

II-2-4 Hydrographie

La plupart des réseaux hydrographiques de la zone sont des cours d'eau qui circulent au pied de la montagne mais il existe de grand fleuve dans cette région comme Namorona. Les principales rivières dans la région prennent leurs sources dans la zone accidentée de la falaise ; elles présentent un profil rapide et heurté, ponctué par des chutes dans leur cours supérieur. Elles gagnent ensuite les régions basses où elles s'étalent largement dans un cours lent et sinueux cherchant difficilement son débouché vers la mer à travers le cordon littoral dunaire.

Le canal des Pangalanes qui relie les différentes lagunes entre elles, depuis Farafangana jusqu'à la limite Nord de la région du Sud-Est, n'est navigable qu'à partir de Mananjary vers Toamasina après une récente réhabilitation.

II-2-5 Vents

Toute la côte de la région de Vatovavy-Fitovinany est soumise en permanence à l'influence de l'anticyclone du Sud-Ouest de l'Océan Indien. Il dirige sur Madagascar des masses d'air généralement humides et tiède, animé d'un mouvement Est-Ouest (Alizés).

Ces masses d'air subissant une ascendance orographique due aux reliefs de la région, atteignent l'état de saturation et provoquent la forte nébulosité et des pluies abondantes de cette partie de la Côte Est.

II-3 Contexte morphologique

Les caractères morphologiques du paysage sont marqués par :

- des montagnes couvertes de bananier, ravinala et fortement couvertes par d'arbustes.
- La présence des formations intrusives dans la zone se manifeste par le pic de montagne ;
- des vallées qui sont souvent utilisées par les autochtones en champs de culture.



Photo 1: *Paysages dominant dans la région*

La zone d'étude présente un relief diversifié avec des altitudes variant entre 1020m et 1175m. Elle offre également des paysages montrant des collines escarpées. Les pentes des reliefs peuvent atteindre 20° à 60° en des endroits. Le paysage est dominé par la colline d'Andrambovato. La partie Nord de la zone est marquée par un escarpement de plusieurs dizaines de mètre. La voie ferrée passe à la limite du versant et de l'escarpement.



Photo 2: *Cadre géomorphologique*

II-4 Contexte géologique

Fianarantsoa se trouve dans le socle cristallin, la roche métamorphique qui provient de roche magmatique, constitue plusieurs parties de la croûte de cette province. Le site d'étude se trouve sur la feuille d'Ifanadiana P53 au 1/100000. Les roches très dominantes sont le gneiss, migmatite et granitoïde microlitique, mais il y a aussi de granitoïde rubané oillé, granitoïde monzonitique.

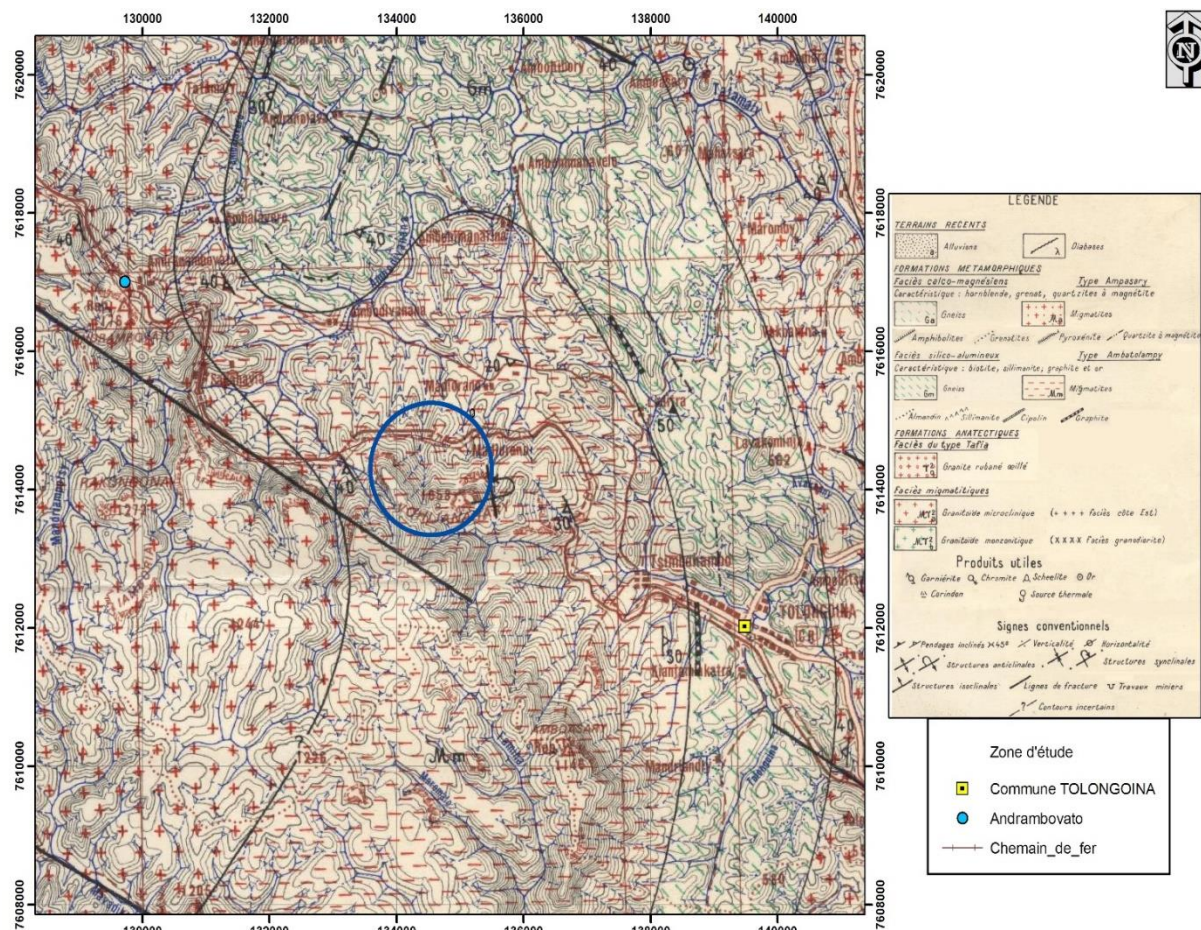


Figure 10: Extrait de la carte géologique de la zone d'étude

L'observation sur terrain confirme la présence de blocs rocheux de gneiss. Ces blocs proviennent probablement de la partie amont de la colline et ils se sont détachés de la roche saine après altération.

Le substratum ou bedrock du secteur est formé de gneiss.

II-5 Caractéristiques de FCE [5]

Le chemin FCE a été construit en 1926 par les colons français, il mesure 163 km avec une pente maximale de 35%. Le nombre de voie est unique et non électrifiée. Il passe par 17 gares, 65 ponts et 48 tunnels.

Voici le profil du chemin de fer FCE avec toutes les altitudes et les points kilométriques de chaque gare. On sait que Fianarantsoa est le point de départ de cette voie.

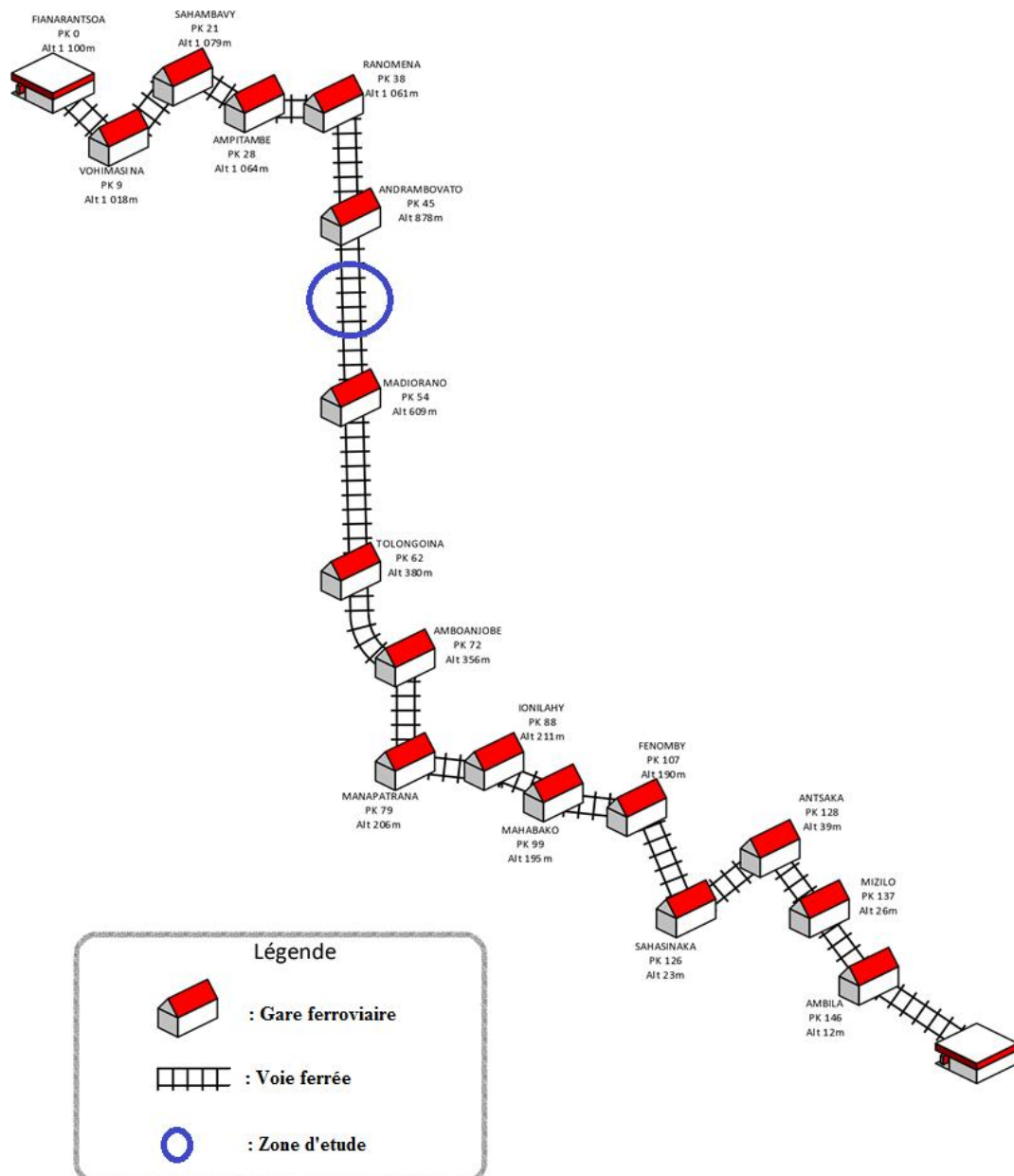


Figure 11: Coupe profil de la ligne ferroviaire de la FCE

CHAPITRE III : METHODOLOGIE

APPLIQUEE A L'ETUDE

Dans ce chapitre, nous allons parler de la méthode électrique qui est l'une des méthodes géophysiques plus intéressante et facile à réaliser pour une exploration des roches, ou en géotechnique.

La méthodologie avancée pour cette étude propose de mettre en œuvre la méthode de prospection électrique, pour cela, le sondage électrique et les panneaux électriques de manière à présenter des coupes géoélectriques qui donneront une image plus précise des vingt premiers mètres du sous-sol. Ces coupes seront exploitées dans la modélisation en 2D et de donner une certaine idée sur la continuité ou non des formations, en profondeur.

III-1 Principe de mesure de résistivité électrique [2]

Il existe un grand nombre de dispositifs de mesure, mais qui sont tous composés de quatre électrodes : on injecte un courant I au travers de deux électrodes (A & B) et on mesure entre deux électrodes de potentiel (M & N) la différence de potentiel créée par ce courant. Les mesures de résistivité des terrains sont effectuées à l'aide d'un résistivimètre couplé à un dispositif de mesure qui peut être disposé à la surface du sol.

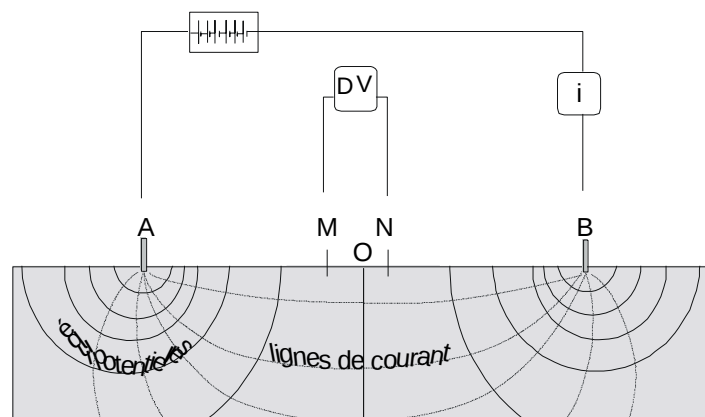


Figure 12: Dispositif de mesure de résistivité électrique

III-2 Mesure de la résistivité des terrains

Le résistivimètre injecte un courant I et mesure la différence de potentiel ΔV . Il est alors facile de calculer la résistance R du circuit (loi d'ohm). En fonction du type de dispositif utilisé, un facteur géométrique K permet de calculer la résistivité ρ à partir de la résistance.

On obtient une formule du type $\rho = K \frac{\Delta V}{I}$ ou $K = 2\pi / (1/AM - 1/BM - 1/AN + 1/BN)$

K : facteur géométrique du dispositif

III-3 Les différents types d'exploration en géophysique

III-3-1 Exploration verticale : sondage électrique

Principe

Lorsqu'on injecte un courant dans le sol, les filets de courant pénètrent à une profondeur théoriquement infinie. On a cependant démontré que pour une longueur de ligne AB constante, la densité de courant diminue avec la profondeur. Un corps produit une distorsion des lignes équipotentielles d'autant plus importante que la densité du courant est forte. Donc si le corps est profond, la ligne AB est grande. C'est le principe de sondage électrique : disposant d'un quadripôle AMNB, on fait varier la longueur AB en laissant le point O, centre d'AB et de MN, fixe. On peut alors tracer la courbe représentative de ρ_a en fonction de $L=AB/2$ et qui permet de connaître la résistivité et l'épaisseur des différentes couches, supposées stratifiées horizontalement.

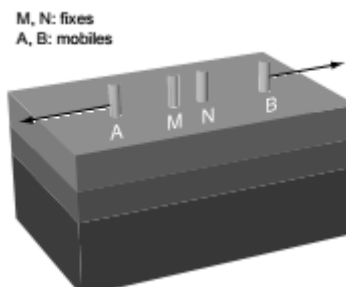


Figure 13: Quadripôle AMNB en sondage électrique

Interprétation du courbe de sondage

La méthode la plus efficace d'interprétation d'un modèle consiste à l'utilisation d'algorithme d'inversion qui, à partir d'un modèle grossier de sous-sol et connaissant l'équation du potentiel à la surface pour un système d'électrode donné, vont restituer un modèle dont la réponse s'ajuste (statistiquement) le mieux possible à la courbe mesurée. Le

calcul d'inversion se fait évidemment sur ordinateur. Dans notre cas, on utilise le logiciel QWSELN.

III-3-2 Exploration par imagerie électrique 2D [4]

Pour réaliser les tomographies électriques en 2D, on a utilisé un dispositif multi-électrodes constitué d'un sélecteur d'électrodes (multinode), de câbles multiconducteurs et d'un résistivimètre Syscal R2 d'IRIS Instruments (Voir Figure 14). On effectue les mesures en connectant le résistivimètre à une série d'électrodes (au nombre de 32) implantées dans le sol suivant une configuration choisie (mode Wenner ou Dipôle-dipôle).

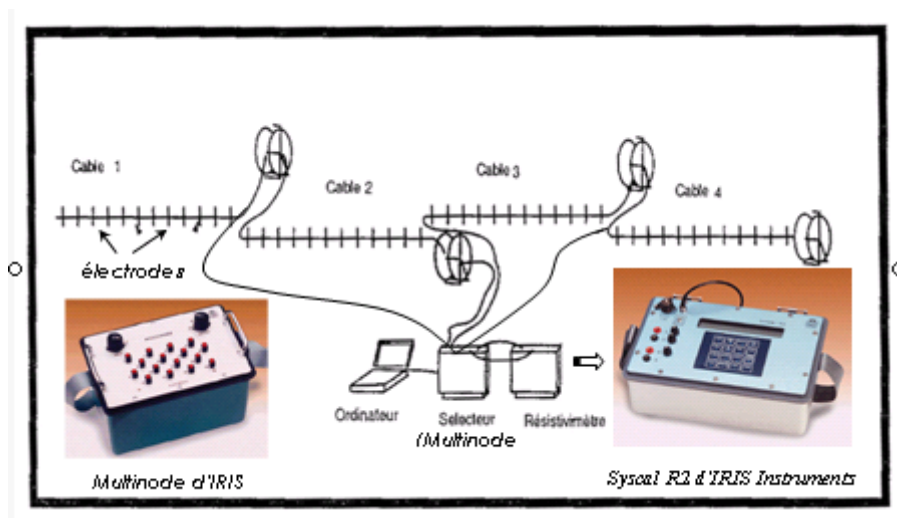


Figure 14: Le résistivimètre Syscal R2 et ses accessoires en mode multi-électrodes

Le dispositif permet d'effectuer semi-automatiquement plusieurs centaines de mesure successive. Tout d'abord, il réalise des mesures en utilisant un quadripôle dont l'espacement inter-électrode est minimal ($n=1$; voir Figure 15). On couvre ainsi l'ensemble du profil en utilisant des quadripôles qui présentent le même espacement inter-électrode. Puis, il augmente automatiquement l'écartement inter-électrode ($n=2$). En augmentant l'écartement entre les électrodes, on augmente la profondeur d'investigation. L'acquisition des données s'arrête dès lors que l'on a utilisé toutes les possibilités des mesures que permet la configuration des électrodes.

Les données obtenues sont présentées sous forme de pseudo-section. Celle-ci est construite en plaçant chaque valeur de résistivité apparente mesurée à l'aplomb du centre du

quadripôle C1P1P2C2, à une profondeur (appelée pseudo profondeur) proportionnelle à l'écartement inter-électrode.

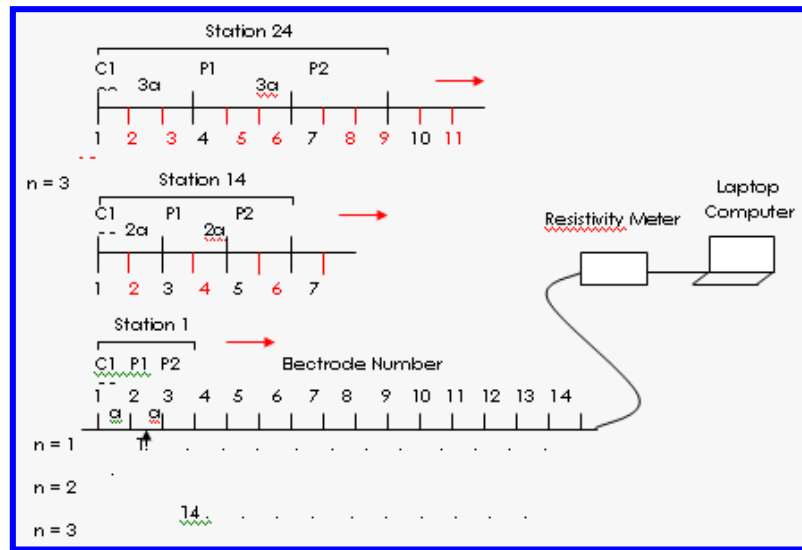


Figure 15: Séquences de mesures

➤ **Corrections et inversion des résultats**

Transfert des données

On transfère les données à partir de logiciel Prosys

Traitement des données

Les données obtenues sont traitées à l'aide du logiciel RES2DINV en procédant :

- à une correction topographique ;
- à un filtrage horizontal et vertical ;
- à l'inversion des données de résistivités apparentes mesurées sur le terrain ;

Méthode d'inversion

Afin de s'approcher de la résistivité réelle du sous-sol, on effectue une inversion des valeurs de résistivités apparentes en 2D à l'aide du logiciel RES2DINV [Loke, 1997]. On obtient un modèle et des résistivités calculées.

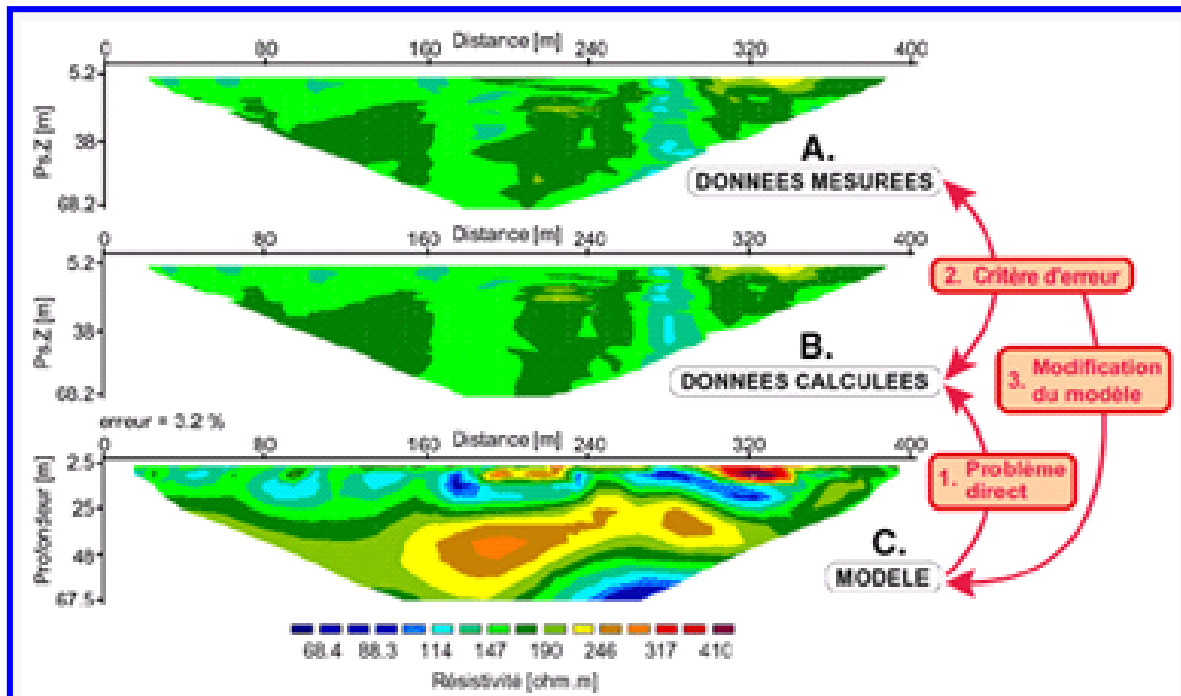


Figure 16: Principe de l'inversion des données

Tout d'abord, un modèle (Figure 16, C) est élaboré à partir des données de résistivités apparentes mesurées (Figure 16, A) :

Etape1 : L'algorithme calcule la réponse de ce modèle en y effectuant une "acquisition fictive", le problème direct, c'est à dire le calcul de résistivités apparentes à partir de résistivités vraies étant donné par le modèle. On obtient alors la pseudo-section calculée (Figure 16, B).

Etape2 : L'algorithme détermine alors la différence entre les données mesurées (A) et la coupe calculée (B) en comparant leurs valeurs de résistivité.

Etape3 : Le modèle est ensuite modifié dans le but de diminuer la différence (erreur) entre (A) et (B). L'opération est alors répétée de manière itérative jusqu'à ce que leur différence devienne minimale.

Le modèle géoélectrique consiste à imager le sous-sol en terme de résistivité qui doit avoir une relation avec la nature géologique du sous-sol, en particulier, l'épaisseur du minéral recherché, dans notre cas la formation de bloc massive. Elle nous informe sur l'épaisseur d'une couche ou des différentes couches qui renferment le sous-sol et leur profondeur.

CHAPITRE IV : INTERPRETATIONS ET RESULTATS

Dans ce chapitre, on représente les travaux effectués, en particulier, la prospection électrique pour pouvoir connaître la structure géologique afin de voir la cause qui provoque le glissement de terrain.

IV-1 Présentation des travaux

Un sondage électrique et quatre profils des panneaux électriques utilisant la technique d'imagerie ont été effectués. Les caractéristiques de ces lignes électriques sont montrées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1: *Caractéristique des lignes électriques*

Travaux géophysiques	Longueur de ligne	Direction de la ligne	Profondeur d'investigation	Configuration utilisé	Observations
Sondage électrique		Est - Ouest	15m	Wenner	Implanté sur un bloc
Profil 01	93m	Est - Ouest	16m	Wenner	
Profil 02	93m	Nord - Sud	16m	Wenner	
Profil 02	93m	Nord - Sud	8m	Dipole	
Profil 03	93m	Nord Est - Sud Ouest	16m	Wenner	
Profil 04	46m	Est - Ouest	8m	Wenner	

Le sondage est implanté au bord de l'axe du chemin de fer. La ligne du sondage a suivi la direction du chemin de fer, qui est orientée globalement suivant l'axe Est Ouest.

Les profils ont suivi deux directions plus ou moins perpendiculaire, les deux premiers parallèles à l'axe du chemin de fer Profil 01 et profil 04, et les deux autres lignes ont été étalé suivant la pente de la colline et ont la direction Nord Sud (Figure 17).

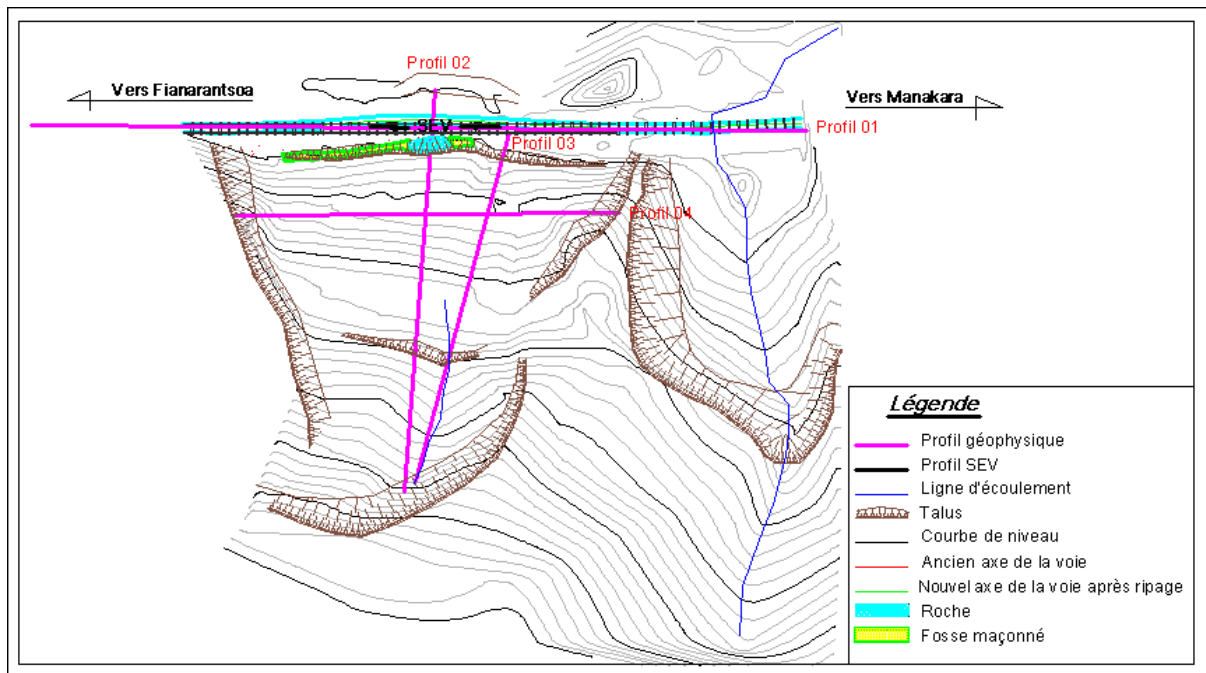


Figure 17: Plan de masse des travaux géophysiques

IV-2 Interprétation du sondage électrique verticale (SEV)

Le diagramme de sondage électrique montre des valeurs de résistivité apparente relativement élevées. Les valeurs enregistrées lors du sondage électrique sont supérieures à $700 \Omega m$. (Figure 18).

Selon la méthode classique d'interprétation, le diagramme a donné quatre terrains formés de :

- deux premiers terrains résistants, de valeur de résistivité électrique $834 \Omega m$ à $1335 \Omega m$ et d'épaisseur 4m, ce qui donne la formation rocheuse en boule observée en surface.
- le troisième terrain moins résistant de $362 \Omega m$ en terme de valeur de résistivité c'est encore des formations rocheuses mais très fracturées et imbibée d'eau et induites par des formations à caractère plus argileuse, on peut dire que si la teneur en eau est beaucoup plus puissant, cette formation favorise le glissement des formations sus-jacent.
- le quatrième terrain est très résistant, de valeur de résistivité électrique supérieure à $6800 \Omega m$ constitue le substratum rocheux.

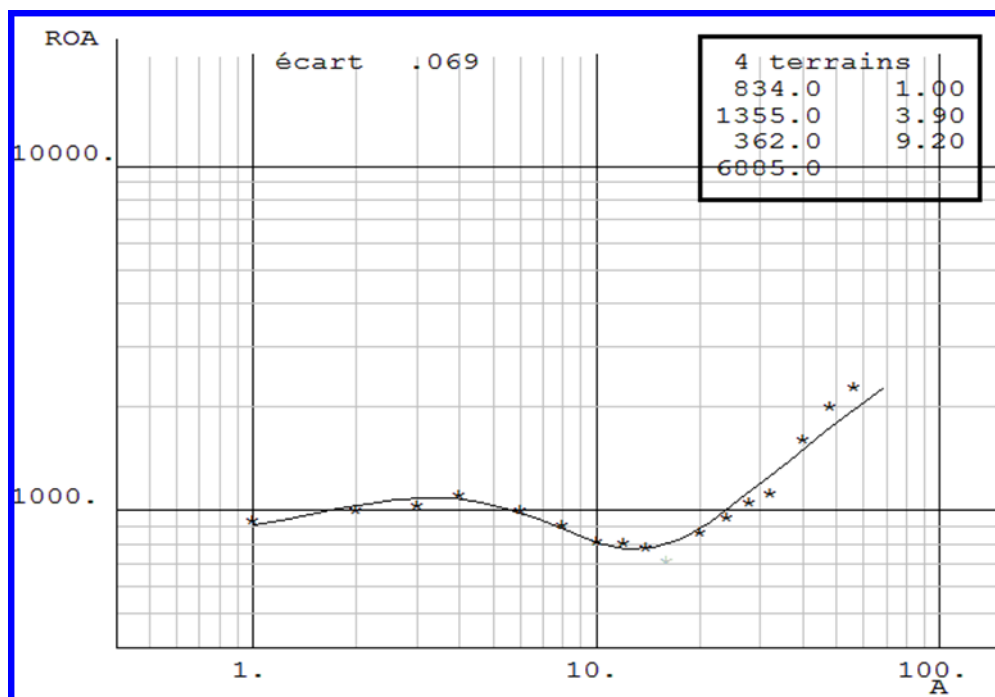


Figure 18: *Interprétation de sondage électrique*

IV-3 Interprétation des panneaux électrique

Pour les trois premiers profils (Profil 1, Profil 2 et Profil 3), la distance inter-électrode est de 3m pour avoir une longueur de ligne total de 93m et une profondeur d'investigation de l'ordre de 15m pour le dispositif Wenner et de 8m pour le dispositif Dipôle-dipôle, tandis que la quatrième profil (Profil4) est de longueur 46m avec une profondeur d'investigation de 8m. Pour chaque profil, on adopte la configuration de Wenner afin de suivre le toit du substratum rocheux et on applique le dispositif Dipôle-dipôle sur le profil 2 pour la délimitation des blocs rocheux.

IV-3-1 Profil 01

Le profil n°1 est étalé suivant la direction du chemin de fer, Ouest – Est. Le centre de ce profil coïncide avec celui du sondage S1. Il est localisé géographiquement à la Latitude S21°31'24,3'' et à la Longitude 047°26'11,5'', il passe par le point de sondage effectué par LNTPB.

La coupe obtenue a mis en évidence trois formations bien distinctes :

- une couverture latéritique (noté L sur la Figure), moins résistante de résistivité supérieur à $1000\Omega m$ avec une puissance qui ne dépasse pas de 1m tout au long du profil.

- une formation conductrice, colorée en bleue claire, elle est probablement saturée en eau et notamment induiser par des argiles (noté G sur la Figure), elle est considérée comme la formation qui favorise le glissement des blocs rocheux sus-jacents observé par le SEV, la valeur de sa résistivité est de l'ordre de $600\Omega m$, elle se localise entre 40 au 54m du début du profil soit une longueur de 14m.

- une formation résistante qui représente soit des boules massives (noté B sur la figure), soit le substratum rocheux de la zone (noté S sur la Figure), elle est caractérisée par la valeur de la résistivité électrique supérieure à $6800\Omega m$.

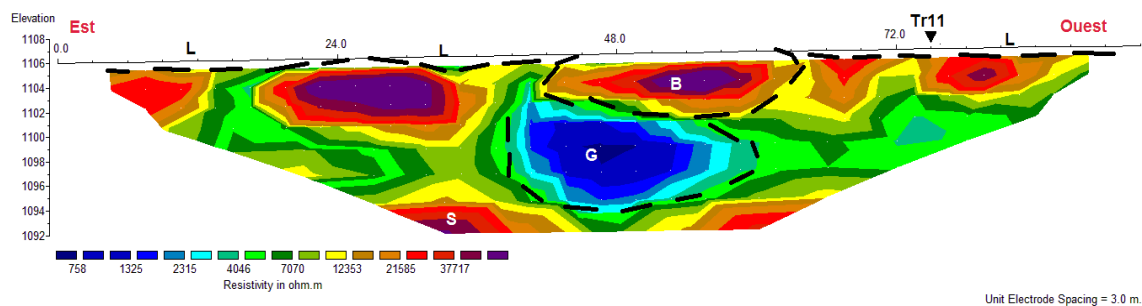


Figure 19: Coupe géo-électrique de profil 01

Le bloc rocheux au centre du profil qui glisse à une longueur de 15m et de puissance de 5m.

IV-3-2 Profil 02

Le deuxième profil est étalé perpendiculairement à celle du premier profil, il suit la direction Nord Sud et il travers les quatre sondages effectuées LNTPB (Pd2, Pd5, Pd7 et Pd8). Il a pour but de délimiter la zone qui concerne le glissement dans cette direction et de voir les formations en boule traverse, deux configurations ont été réalisée pour ce profil : celle du Wenner et celle du Dipôle Dipôle (Figure 20 et 21).

Les deux coupes montrent les différentes formations en boules (noté B sur la Figure) et la formation responsable de glissement (noté G sur la Figure) et le substratum rocheux de la zone. On constate que la zone qui peut offerte des glissements est de l'axe du chemin de fer en allant 35m vers le haut.

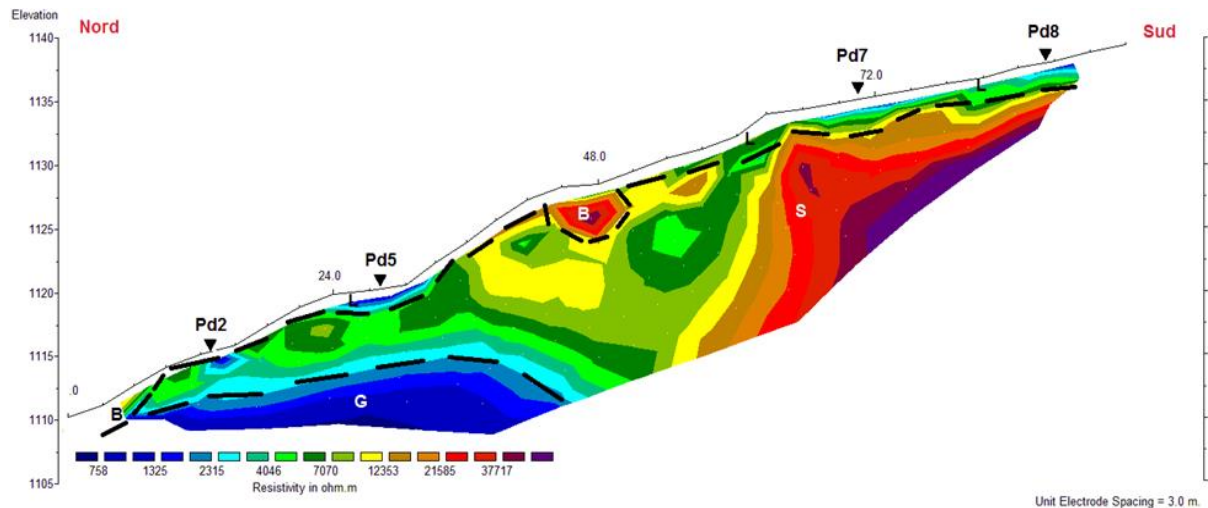


Figure 20: Coupe géo-électrique de profil 02(configuration Dipole-Dipole)

Dans la partie amont du profil, les formations en boules détectées par le dispositif Dipôle est moins importantes, elles ont un diamètre inférieur à 2m.

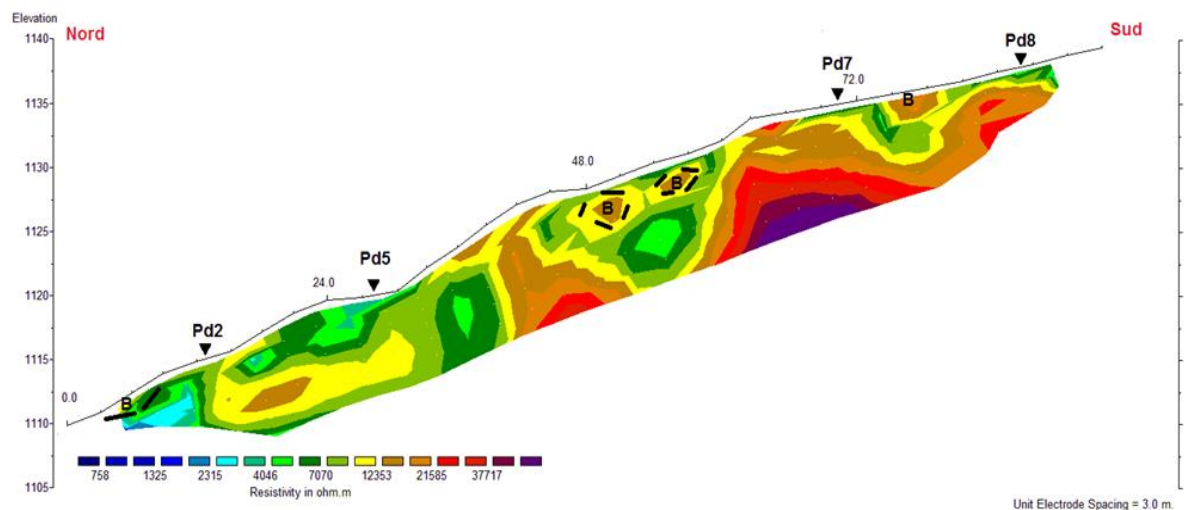


Figure 21: Coupe géo-électrique de profil 02(configuration wenner)

IV-3-3 Profil 03

Le profil 3 a été étalé parallèlement au profil 2, il suit le flanc du côté Est du terrain étudié. Les différentes formations sont encore marquées sur ce profil, la formation latéritique est plus épaisse dans la partie amont du profil, elle est estimée à plus de 4m d'épaisseur.

La formation responsable de glissement (noté G sur la figure) qui se trouve au début du profil est moins importante, car moins saturée en eau vu que la valeur de résistivité est moins résistante.

Il n'y a qu'une seule formation en boule soit détecter, il se trouve à 35m du début de profil, sur ceux elle reste stable vue la formation sous-jacente.

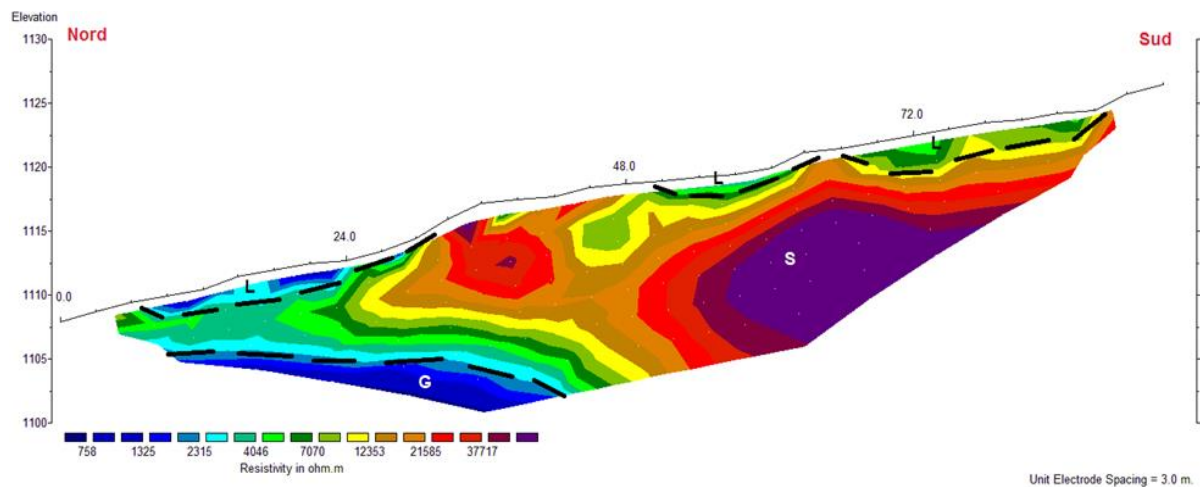


Figure 22: Coupe géo-électrique de profil 03

IV-3-4 Profil 04

Le profil 4 est implanté sur le deuxième plateau (Figure 17) où on trouve un canal de déviation d'eau lors des saisons des pluies, il est même direction que celle du profil 1 de direction Est-Ouest, il est de longueur 46m avec une profondeur d'investigation de 8m, il traverse les trois points de sondage effectués par LNTPB (soient Pd4, Pd5 et Pd3).

Cette coupe montre qu'on est encore sur la zone affectée par le glissement, la partie Est est plus résistante, la partie qui se situe entre 8m et 18m du profil est beaucoup plus altérée, et la couverture latéritique est de l'ordre de 5m tout au long de partie plat du profil.

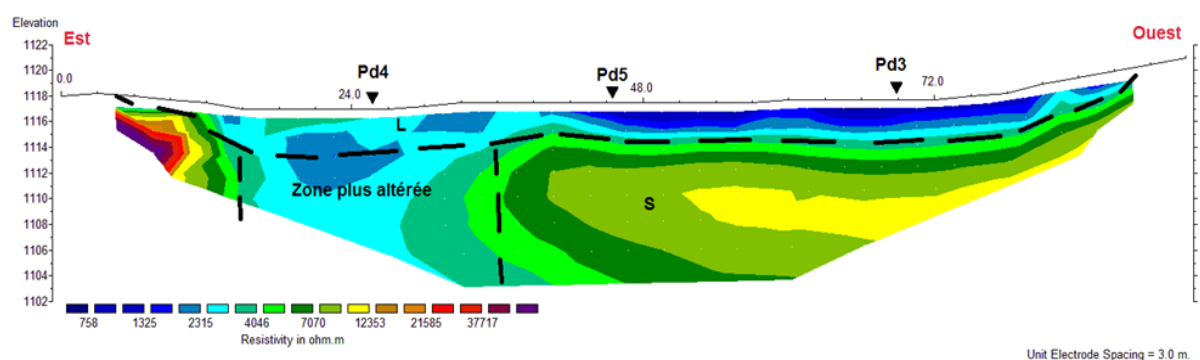


Figure 23: Coupe géo-électrique de profil 04

CONCLUSION

Les situations géologique et morphologique ont montré l'existence des roches en boules dans la zone d'étude, précisément dans la colline juste en amont du chemin de fer FCE. La technique classique reposant sur la prospection géophysique a été mise en œuvre pour caractériser la structure géologique de cette zone. Les résultats géophysiques montrent l'existence des blocs rocheux déposer sur des formations glissantes qui peut assimiler au zone de fracturation introduises des formations à caractère argileuse et imbibée d'eau, le caractère de l'argile gonflante provoque le glissement des formations sus-jacente.

Le bloc rocheux qui glisse doit avoir une longueur de 15m et puissance estimée à 5m des blocs rocheux. L'infiltration d'eau souterraine pendant le temps pluvieux commence à trentaine de mètre de l'axe du chemin de fer ou on trouve actuellement un canal de déviation d'eau. Il est impératif d'augmenter la largeur de ce canal afin de diminuer cette infiltration.

Les résultats des travaux de sondages et l'analyse des échantillons recueillis par LNTPB s'avère nécessaire afin de trouver une solution adéquate pour mieux protéger la zone d'étude.

De plus, ce mémoire nous a permis en premier lieu de savoir mener un travail de rédaction d'un mémoire, de comprendre les différentes étapes à suivre dans une étude géotechnique, la manipulation de la logiciel Qwseln et la logiciel Res2dinv, la méthode électrique notamment le sondage électrique et le panneau électrique 2D. Ces derniers permettent de déterminer la structure du sous-sol (épaisseur, emplacement des différentes roches et profondeur).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **CALEMBERT**, Géologie de l'Ingénieur et Mécanique des Roches, Annales des Travaux Publics de Belgique.
- [2] **CHOUTEAU M., (2001), Notes de cours** : Méthode de prospection électrique, Ecole Polytechnique de Montréal.
- [3] **Faouzi HADJ-HASSEN** : Fissuration naturelle d'un massif rocheux. Ecole nationale supérieure des mines de Paris.
- [4] **MENG H. L. (1999)**, RESD2DMOD ver 2.2. Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite difference and finite-element methods.
- [5] **MICHEL Dehanne, MICHEL Grand Guillaume, GERALD Hardon, SEBASTIEN Jarne-Louis Rochaix**. Encyclopédie [ROCHOO] : Chemin de fer prives Vaudois 1873-2000.
- [6] **MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DE L'ELEVAGE et DE LA PECHE**. Monographie de la Région de Vatovavy-Fitovinany.
- [7] **Professeurs DOMINIQUE Chapellier & JEAN-LUC Mari**. Cours online de géophysique de l'université de Lausanne.
- [8] **SCHROEDER**. Stabilité de parois rocheuses.

ANNEXES

Annexe 1: Photo de résistivimètre et ses accessoires

En sondage électrique on utilise l'appareil SYSCAL R2 d'Iris Instruments. Il est relié avec un convertisseur DC/DC alimenté par une batterie de 12V. La mise à station du panneau électrique nécessite des deux multinodes, un multiplexeur RMC alimenté par une batterie 12V, des électrodes en acier inox, des rouleaux de fils et des câbles de connexion.

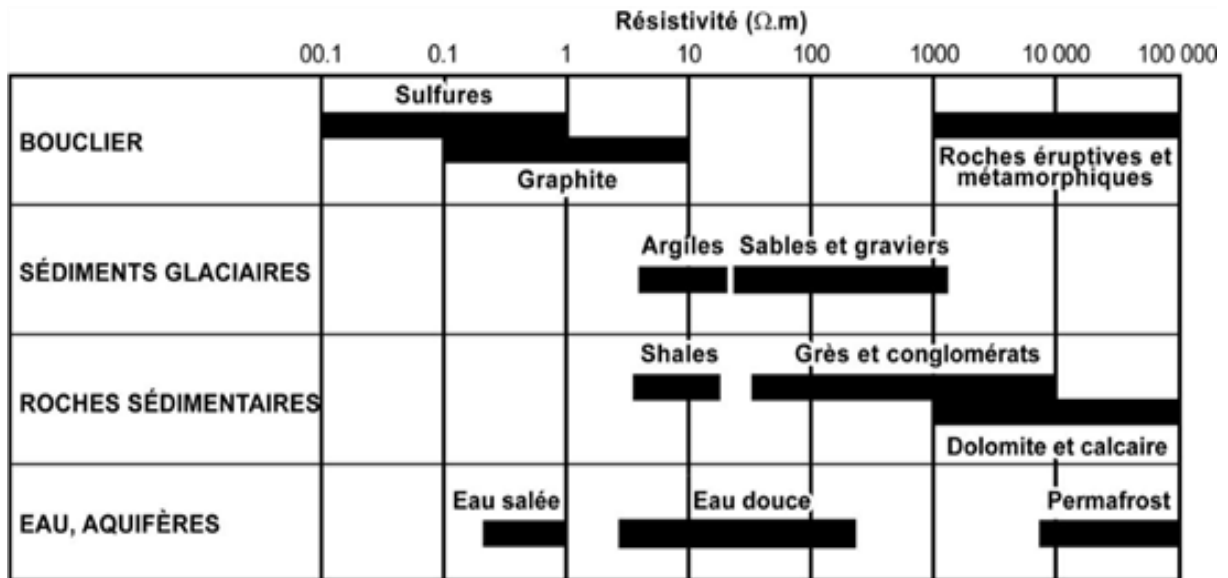


Annexe 2: Tableau représentant les porosités, perméabilités et résistivités des différentes roches. [7]

Ce tableau et la figure ci-après nous montre les différentes valeurs de résistivité de chaque roche.

Roches	Porosité totale (%)	Perméabilité (cm/s)	Résistivité (ohms*m)
Argilite	35	10^{-8} - 10^{-9}	70 à 200
Craie	35	10^{-5}	30 à 300
Tuf volcanique	32	10^{-5}	20 à 300
Marnes	27	10^{-7} - 10^{-9}	20 à 100
Grès	3 à 35	10^{-3} – 10^{-6}	30 à 800
Dolomite	1 à 12	10^{-5} – 10^{-7}	200 à 10000
Calcaires	3	10^{-10} - 10^{-12}	200 à 10000
Métaschistes	2,5	10^{-4} – 10^{-9}	300 à 800
Gneiss	1,5	10^{-8}	1000 à 20000
Quartzite	<1	10^{-10}	1000 à 10000
Granite	1	10^{-9} – 10^{-10}	1000 à 15000
Gabbro	1 à 3	10^{-4} – 10^{-9}	6000 à 10 000
Basalte	1,5	10^{-6} – 10^{-8}	800 à 15000

Annexe 3: Figure représentant le résistivité des roches [7]



Annexe 4: Photo de forage de la reconnaissance par LNTPB

Voici une photo représente un forage faisant par le LNTPB qui a pour but de connaitre la formation de la zone d'étude. Elle se situe en amont du chemin, dans la partie de la colline.



TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT	Erreur ! Signet non défini.
SOMMAIRE	ii
LISTE DE FIGURES	iii
LISTE DES ABREVIATIONS	iv
LISTE DES PHOTOS	iv
LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES ANNEXES	iv
INTRODUCTION	1

CHAPITRE I : GLISSEMENT DU TERRAIN

I-1 Définition	2
I-2 Aspect général des glissements	2
I-2-1 Proximité du risque	3
I-2-2 Trajectoire	3
I-2-3 Distance de parcours	4
I-3 Notions sur le massif rocheux	5
I-3-1 Reconnaissances géologiques	5
I-3-2 Structure	6
I-4 Instabilité de massif rocheux	8
I-4-1 Causes de glissement	8
I-4-2 Types des instabilités	9

CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

II.1 Localisation de la zone d'étude	14
II-2 Situation climatique	15

II-2-1 climat.....	15
II-2-2 Pluviométrie	15
II-2-3 Température	15
II-2-4 Hydrographie.....	15
II-2-5 Vents	16
II-3 Contexte morphologique	16
II-4 Contexte géologique	17
II-5 Caractéristiques de FCE	19
 CHAPITRE III : METHODOLOGIE APPLIQUEE A L'ETUDE	
III-1 Principe de la mesure de résistivité électrique	20
III-2 Mesure de la résistivité des terrains	20
III-3 Les différentes types d'exploration en géophysique	21
III-3-1 Exploration verticale : sondage électrique.....	21
Principe.....	21
Interprétation du courbe de sondage	21
III-3-2 Exploration par imagerie électrique 2D.....	22
 CHAPITRE IV : INTERPRETATIONS ET RESULTATS	
IV-1 Présentation des travaux.....	25
IV-2 Interprétation du sondage électrique verticale	26
IV-3 Interprétation des panneaux électrique	27
IV-3-1 Profil 01	27
IV-3-2 Profil 02	28
IV-3-3 Profil 03	29
IV-3-4 Profil 04	30
CONCLUSION	31

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	32
ANNEXES	33
TABLE DES MATIERES	36