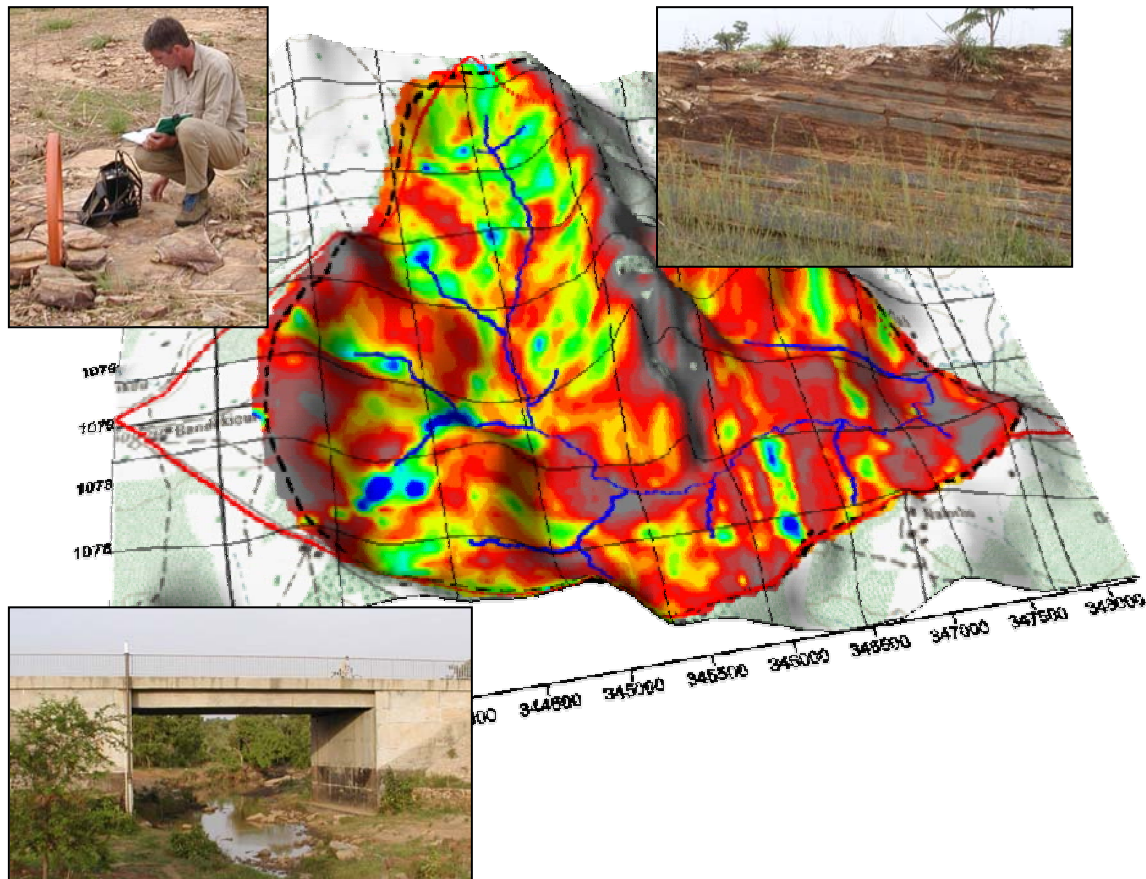


DESS DE GEOPHYSIQUE APPLIQUEE

Mémoire de fin d'études

Présenté par : *WUBDA Maxime*



RECONNAISSANCE GEOPHYSIQUE DU BASSIN VERSANT D'ARA (Djougou, Nord Bénin)

Encadreur : *M. Descloitres*

Année 2003

Examineurs : *N. Florsch*
P. Andrieux

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	5
Chapitre 1	
GENERALITES.....	6
1. Cadre et objectifs de l'étude.....	6
2. Présentation de la zone d'étude	6
2.1. Localisation	6
2.2. Cadre physique.....	8
2.2.1. La géologie.....	8
2.2.2. La géomorphologie	10
2.2.3. Le climat, les sols et la végétation	11
2.3. Cadre humain.....	12
Chapitre 2	
MATERIEL ET METHODOLOGIE DE PROSPECTION.....	13
1. Matériel et principe de fonctionnement	13
1.1. L'EM 34.....	13
1.1.1. Description de l'appareil	13
1.1.2. Principe de fonctionnement.....	13
1.1.3. Utilisation.....	15
1.2. Le résistivimètre Syscal R2	16
1.2.1. Description.....	16
1.2.2. Principe de fonctionnement.....	17
1.2.3. Utilisation.....	17
1.3. Le GPS Garmin 12.....	18
2. Méthodologie	18
2.1. Stratégie de prospection	18
2.1.1. Reconnaissance et limitation du site	19
2.1.2. Choix d'un profil pertinent pour une première reconnaissance du sous-sol.....	20
2.1.3. Détermination de la gamme de conductivités à mesurer en EM 34	21
2.1.4. Choix de la configuration du dispositif.....	21
2.1.5. Choix de la base de référence	22
2.1.6. Choix des paramètres de profilage	22
2.1.7. Utilisation des sondages en compléments d'interprétation des mesures.....	25
2.2. Problèmes et limites méthodologiques.....	25
2.2.1. Système de positionnement.....	25
2.2.2. Prospection EM 34.....	27
2.2.3. Prospections électriques	27
2.3. Conclusion sur les aspects méthodologiques	28
Chapitre 3	
RESULTATS ET INTERPRETATION	29
1. La prospection EM 34 : résultats et interprétation préliminaire	29
1.1. Résultats.....	29
1.1.1. les valeurs de conductivités.....	29
1.1.2. L'allure des courbes de mesure le long des profils.....	31
1.1.3. La carte de conductivité EM 34	32
1.2. Interprétation préliminaire par observations de terrain.....	33

2. Prospections électriques : contribution à l'interprétation géologique du milieu	36
2.1. Les panneaux électriques.....	36
2.1.1. Résultats et interprétations	36
2.1.2. Conclusion à l'étude des panneaux.....	39
2.2. Les sondages électriques.....	41
2.2.1. Sondages en zones résistantes.....	41
2.2.2. Sondages en zones conductrices	43
2.3. Conclusion sur l'apport des sondages électriques	45
Chapitre 4	
SYNTHESE ET RECOMMANDATIONS	46
1. A propos de la méthodologie	46
1.1. Prospection EM 34.....	46
1.2. Prospections électriques.....	47
2. A propos des questions initialement posées	47
CONCLUSION GENERALE	52
BIBLIOGRAPHIE.....	53
ANNEXES	
ANNEXE 1 : Notions sur les dispositifs électriques et leur mise en œuvre.	55
ANNEXE 2 : Notions sur le traitement des données en imagerie électrique 2D.	56
ANNEXE 3 : Conductivités EM 34 à la base. Profils de prospection EM34 sur le bassin.....	57
ANNEXE 4 : Localisation des points remarquables sur le bassin.	58
ANNEXE 5 : Localisation des zones de prospection spécifiques sur le bassin.	59
ANNEXE 6 : Distribution des conductivités EM 34. Localisation des points de sondages.....	60
ANNEXE 7 : Résultats de sondages. Modèles de terrains en zones résistantes.....	61
ANNEXE 8 : Résultats de sondages. Modèles de terrains en zones résistantes.....	62
ANNEXE 9 : Résultats de sondages. Modèles de terrains en zones conductrices.	63
ANNEXE 10 : Résultats de sondages. Modèles de terrains en zones conductrices.	64
ANNEXE 11 : Résultats de sondages. Modèles de terrains en zones d'altérites épaisses.	65

Liste des figures

<i>Figure 1 : Courbes de la contribution des terrains au champs magnétique secondaire.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 2 : Courbes de réponses cumulées en fonction de la profondeur.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 3 : Vue du bassin versant en perspective.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 4 : Electrique 2D en Wenner α. Résultats du profil de reconnaissance P1.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 5: Correspondance entre modèle électrique et valeurs à l'EM 34.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 6 : Zone 2. Contours des anomalies en profilage est, ouest.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 7 : Zone 2. Contours des anomalies en profilage nord, sud.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 8 : Courbes comparées de valeurs de conductivités.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 9 : Zone 1. Contours des anomalies en prospection à pas de 20 m.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure10 : Zone 1. Contours des anomalies en prospection à pas de 40 m.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 11 : Zone 1. Contours des anomalies pour des profils espacés de 100 m.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 12 : Zone 1. Contours des anomalies pour des profils espacés de 50 m.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 13 : Ellipse de dispersion du GPS Garmin 12 en station fixe.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 14 : Aspect des profils de prospection.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 15 : Points de mesures dispersés en fin de courbe, résultant des effets 2D.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 16 : Pente de fin de courbe supérieure à 45°.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 17 : Distribution des mesures par classes de conductivités.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 18 : Courbe de tendance de la distribution à partir de la valeur maximale.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 19 : Courbes comparatives de conductivités lues et calculées.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 20 : Valeurs de conductivités le long d'un profil.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 21 : Variogramme des données de conductivités EM 34.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 22 : Electrique 2D en Wenner α. Résultats et interprétation du profil P1.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 23 : Electrique 2D en Wenner α. Résultats et interprétation du profil P2.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 24 : Coupe géologique schématique du profil P1.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 25 : Relations entre conductivités EM 34 et structures de terrain.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 26 : Allure de courbe de sondage sur terrain à cuirasse superficielle épaisse.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 27 : Allure de courbe de sondage sur terrain à substratum proche.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 28 : Mesures au centre d'une anomalie conductrice.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure 29 : Mesures en zone d'affleurement de nappe.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure 30 : Coupe géologique schématique de l'anomalie conductrice linéaire.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure 31 : Estimation du temps de prospection en EM 34 d'un km².....</i>	<i>51</i>

Liste des cartes

Carte 1 : Localisation de la zone de Djougou.....	7
Carte 2 : Localisation du bassin d'Ara par rapport à celui de la Donga.....	8
Carte 3 : Géologie de la zone de Djougou.....	9
Carte 4 : Géologie de la zone de Djougou.....	9
Carte 5 : Répartition des sols dans la zone de Djougou.....	12
Carte 6 : Topographie du bassin versant.....	19
Carte 7 : Distribution en isovaleurs de la conductivités EM34.....	35
Carte 8 : Bassin versant d'Ara. Organisation des zones conductrices.....	35
Carte 9 : Bassin versant d'Ara. Organisation des zones résistantes.....	35

Liste des images photographiques

Photo 1 : Affleurement de la structure majeure recoupé par la route. Coté ouest.....	10
Photo 2 : Affleurement de la structure majeure recoupé par la route. Coté est.....	10
Photo 3 : Vue de la ravine principale (Ara) en aval.....	11
Photo 4 : Vue de l'exutoire du bassin versant.....	11
Photo 5 : Vue d'un profil pédologique dégagé par le ravinement.....	12
Photo 6 : Affleurement de cuirasse en gros blocs.....	12
Photo 7 : Vue de l'EM 34.....	15
Photo 8 : Vérification de la dérive de L'EM 34 sur une base.....	15
Photo 9 : Vue du Syscal R2.....	16
Photo 10 : Matériel annexe du Syscal.....	16

INTRODUCTION

Dans le cadre du projet AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine), une équipe de l'unité de recherches 027 Géovast conduit par Marc Descloitres de l'Institut de Recherches pour le Développement (IRD), a réalisé une mission de prospections géophysiques dans le bassin versant d'Ara situé au nord-ouest de Djougou, localité du nord-ouest Bénin. Cette mission s'est déroulée du 05/05 au 14/05/2003 pour l'équipe géophysique, mais l'ensemble des prospections se sont étalés jusqu'au 15/09/2003.

Notre tâche en tant que stagiaire de DESS de géophysique au sein de l'équipe a consisté à participer à la mise en route des travaux et à la poursuite du reste de la prospection qui a été laissée à notre charge.

Le document que nous présentons résume l'ensemble des travaux qui y ont été menés et dont l'essentiel a consisté à la cartographie à l'EM 34 du bassin versant et à l'interprétation des données. Il comporte quatre chapitres qui abordent successivement les thèmes suivants:

- Les objectifs de l'étude ainsi que les caractéristiques physiques et humaines de la zone d'étude,
- Les aspects méthodologiques des prospections et les difficultés rencontrées,
- La présentation des résultats ainsi que leurs interprétations,
- Enfin, une synthèse de nos travaux et les recommandations pour les études à venir.

1. Cadre et objectifs de l'étude

La présente étude a été réalisée pour le compte du projet AMMA Bénin qui est un programme de recherches pluridisciplinaires mené en collaboration avec l'IRD. Ce programme comporte un certain nombre d'activités qui concerneront une zone couvrant trois pays (le Bénin, le Mali et le Niger) et dont le démarrage effectif est prévu pour début 2004.

Pour assurer le bon déroulement de ces activités, le projet a lancé des études de reconnaissances anticipées dans des zones cibles dont celle de Djougou, et c'est dans ce cadre que la notre s'inscrit.

Il s'agit d'une étude géophysique préliminaire dont l'objectif est de fournir des éléments de réponse à des interrogations liées aux futures investigations hydrologiques et hydrogéologiques qui seront menées dans le bassin versant d'Ara par des chercheurs de l'IRD, prochainement en poste au Bénin.

Les problématiques posées à l'équipe de géophysique se résument aux points suivants :

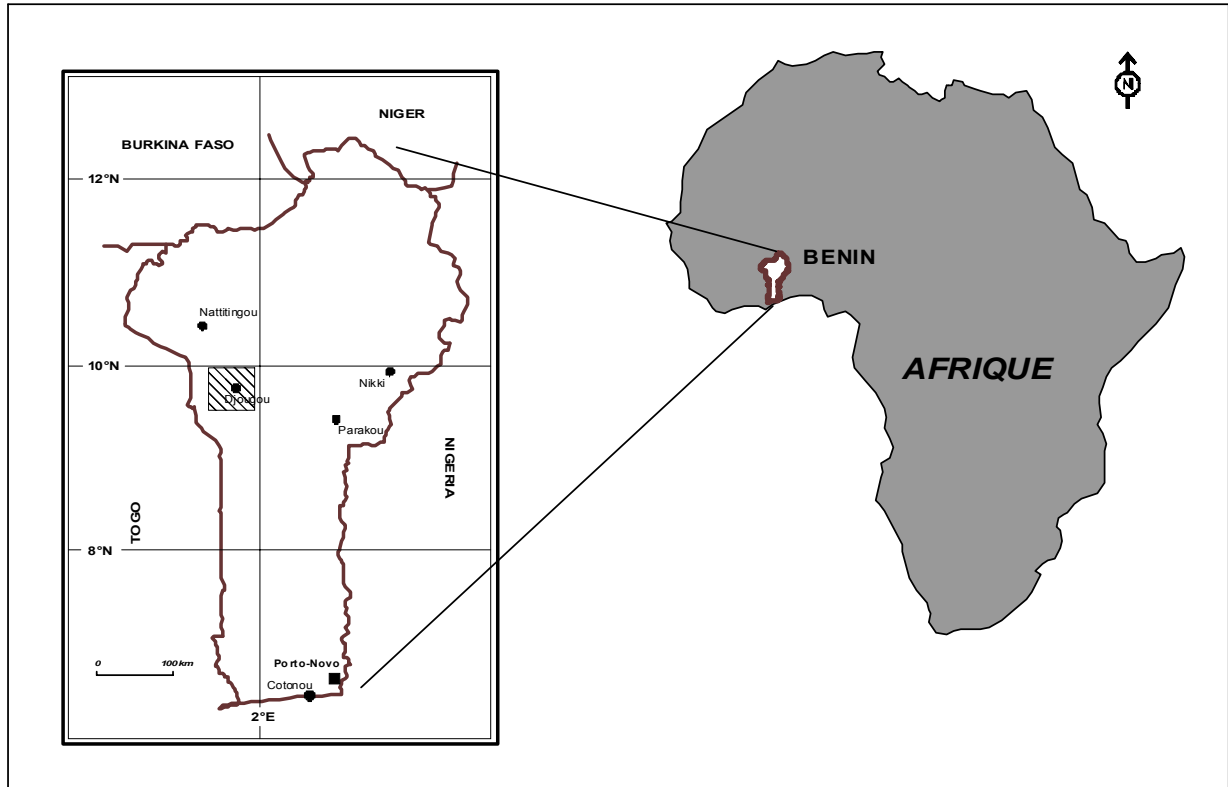
- La nature et la géométrie du socle
- La localisation des zones d'altération d'épaisseur importante
- La localisation des zones d'infiltration préférentielle et des nappes phréatiques
- La présence éventuelle d'accidents de terrain pouvant guider les écoulements souterrains
- La nature des formations superficielles et leurs comportements hydrologiques hydrogéologiques.

Sans prétendre répondre exhaustivement à l'ensemble des questions posées, notre tâche consistera cependant à mettre en œuvre des investigations rapides et adaptées d'une part à l'acquisition d'informations de base nécessaires à la connaissance du milieu, et d'autre part, utilisables dans des zones futures à étudiées.

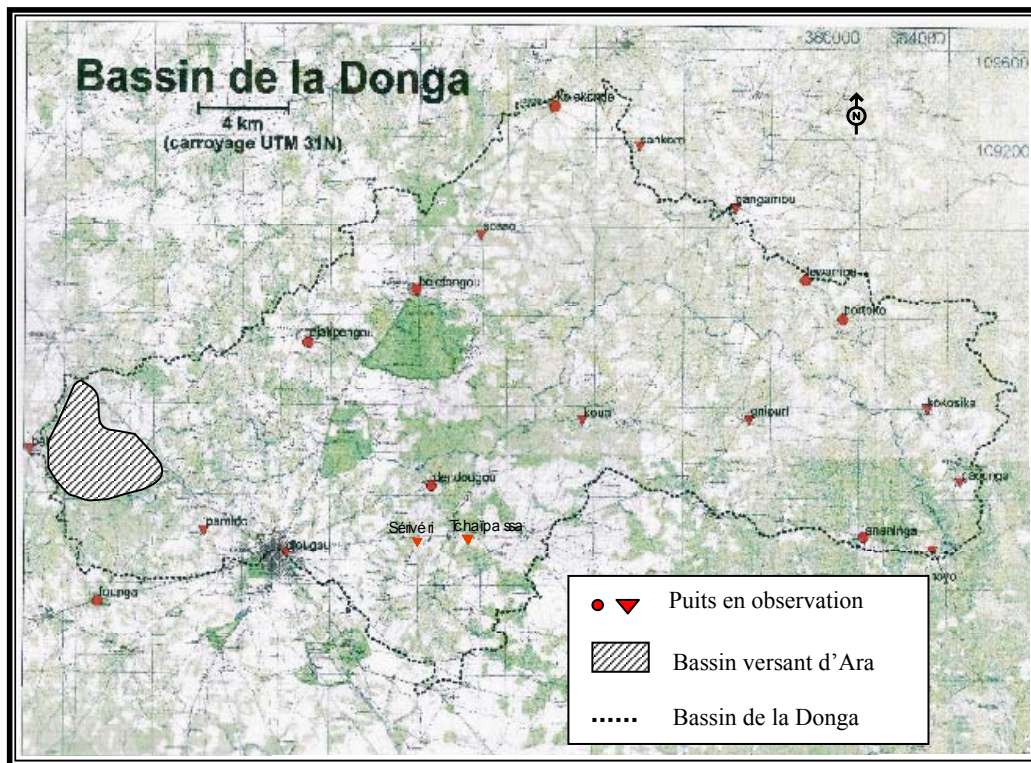
2. Présentation de la zone d'étude

2.1. Localisation

Le Bassin versant d'Ara qui fait l'objet de la présente étude se situe dans la zone de Djougou qui est une ville du Nord-Ouest du Bénin, localisée précisément suivant les coordonnées géographiques (WGS 84) 09°41'48" nord, et 01°39'23" est (cf. Carte 1, page 7). Le bassin versant se trouve à 8 Km au nord-ouest de la ville et se localise suivant les coordonnées 09°44'49" nord, et 01°34'08" est. Il représente la partie nord-ouest de l'amont du grand bassin de la Donga, qui est actuellement un site d'études hydrologiques des chercheurs de l'IRD du Bénin (cf. Carte 2, page 7).



Carte 10 : Localisation de la zone de Djougou.



Carte 11 : Localisation du bassin d'Ara par rapport à celui de la Donga.

2.2. Cadre physique

Du fait du choix récent du site d'étude, peu d'informations précises sont disponibles sur les caractéristiques physiques du milieu. Celles ci-après mentionnées font référence à l'étude géomorphologique et géologique réalisée par AFFATON. P dans les vallées des voltas (qui couvrent également notre zone d'étude) et aux cartes géologique et pédologique à l'échelle 1/200000 de la zone de Djougou.

2.2.1. La géologie

Une lecture de la carte régionale présentée par AFFATON. P (cf. Carte 3, page 9), montre que le substratum géologique de la zone de Djougou est constitué pratiquement d'une seule unité structurale qui s'étend du sud au nord du pays. Celle-ci est composée de roches métamorphiques : schistes gneiss, migmatiques du Dahomeyen ou quelques fois d'âge indéterminé. Au nord-ouest de notre zone d'études, sa limite avec les formations du groupe de Dapaong est marquée par un chevauchement. On peut noter également à l'ouest et au nord-ouest, la présence en zone d'extension très faible d'unités de quartzites à disthènes (mont Tanékas) et de roches basiques (massif Kabié).

Plus localement, l'analyse de la carte géologique de Djougou (cf. Carte 9), révèle la présence sur le site de deux unités structurales qui sont celles de l'Atakora et de la plaine du Bénin (ex Dahomeyen).

- L'unité structurale de l'Atakora : Elle occupe la partie nord-est du bassin et se compose de deux formations géologiques toutes issues du Protérozoïque supérieur.

La première est une formation linéaire (intrusive ?) de quartzites à muscovite représentée par un affleurement rocheux majeur orienté nord-sud, qui limite le bassin versant au nord-est. D'un faciès quelque peu gneissique, la roche laisse entrevoir en outre une organisation en lignes de schistosités orientées dans la direction de l'affleurement. Au nord-est du site, la route (axe Djougou-Natitingou) qui passe en travers de cette affleurement a rendu possible l'observation de plus près de l'organisation de la roche. Elle présente une structure en strates orientées suivant une ligne de schistosité principale qui varie entre 0° à 20° nord et 20° est (cf. Photo 1 et 2, page 10).

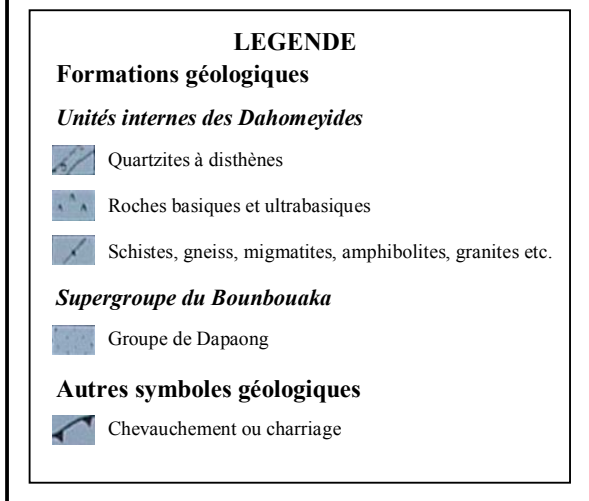
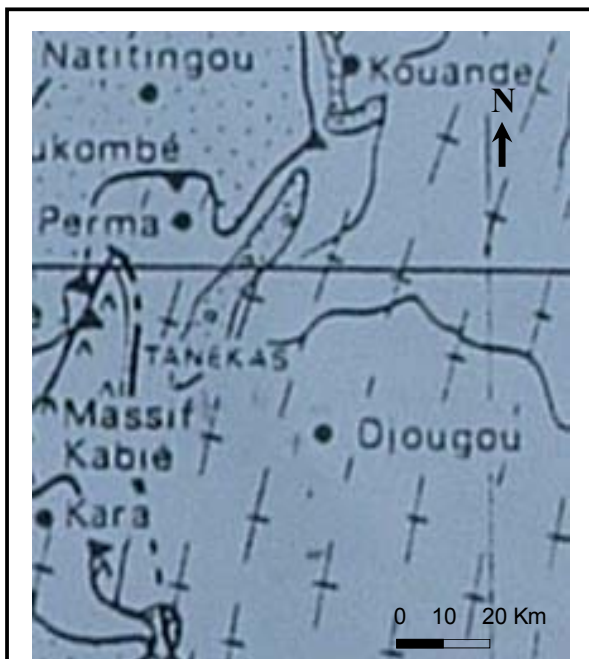
La seconde formation se localise à l'est de la précédente. Elle est constituée de micaschistes quartzeux à muscovite et donne lieu à de petits affleurements situés au nord-est, hors du bassin.

La limite entre ces deux formations est matérialisée par une faille orientée de -5° par rapport au nord, qui se prolonge plus loin dans la partie centrale du bassin.

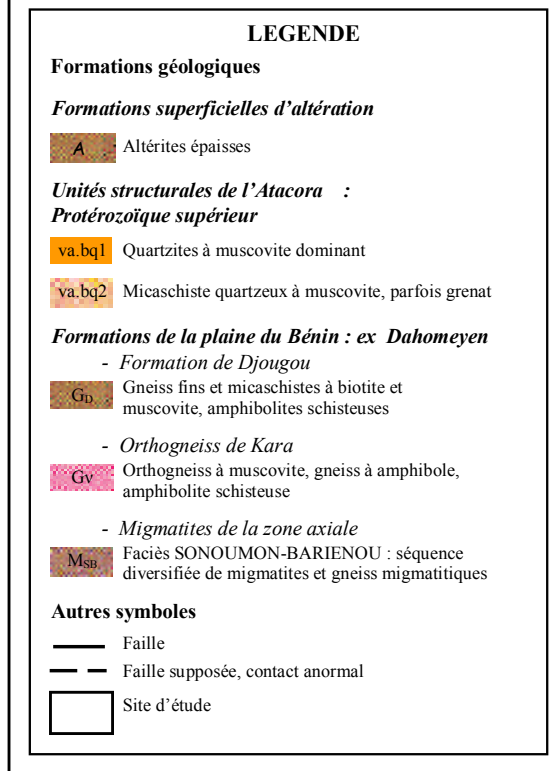
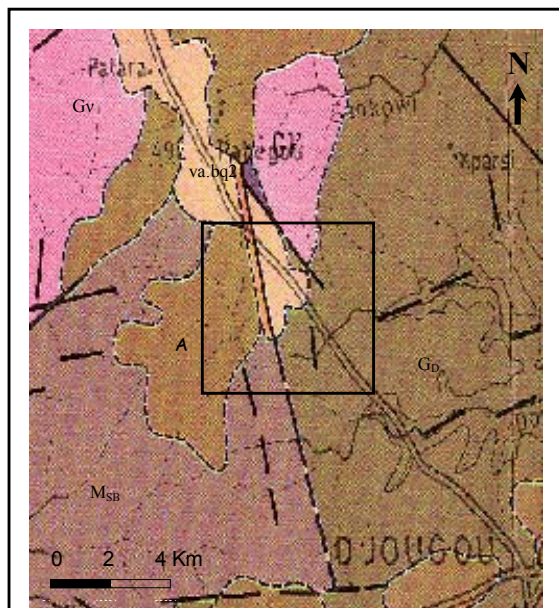
- L'unité structurale de la plaine du Bénin : Elle occupe le reste de la surface du bassin versant et se compose également de deux formations géologiques qui affleurent à plusieurs endroits dans le lit de la ravine principale. A l'est et au sud-est, on retrouve la formation de Djougou constituée de

gneiss fins et de micaschistes à biotite et muscovite. La seconde formation dite ‘de la zone axiale’ se retrouve elle, dans toute la partie ouest. Composée de séquences diversifiées de migmatites et de gneiss migmatitiques à biotite et grenat, elle est presque en totalité recouverte d’une couche d’altérites épaisses.

Enfin, on retrouve au sud et à l’est de cette unité, des accidents de terrain linaires et parallèles, pouvant correspondre à des fractures ou à des failles. Le plus important se localise dans le prolongement de la faille de l’unité de L’Atakora.



Carte 12 : Géologie de la zone de Djougou. Extrait de la carte géologique des Bassins des votas de AFFATON. P.



Carte 13 : Géologie de la zone de Djougou. Extrait de la carte géologique de la ‘feuille de Djougou’ à l’échelle 1/200000.

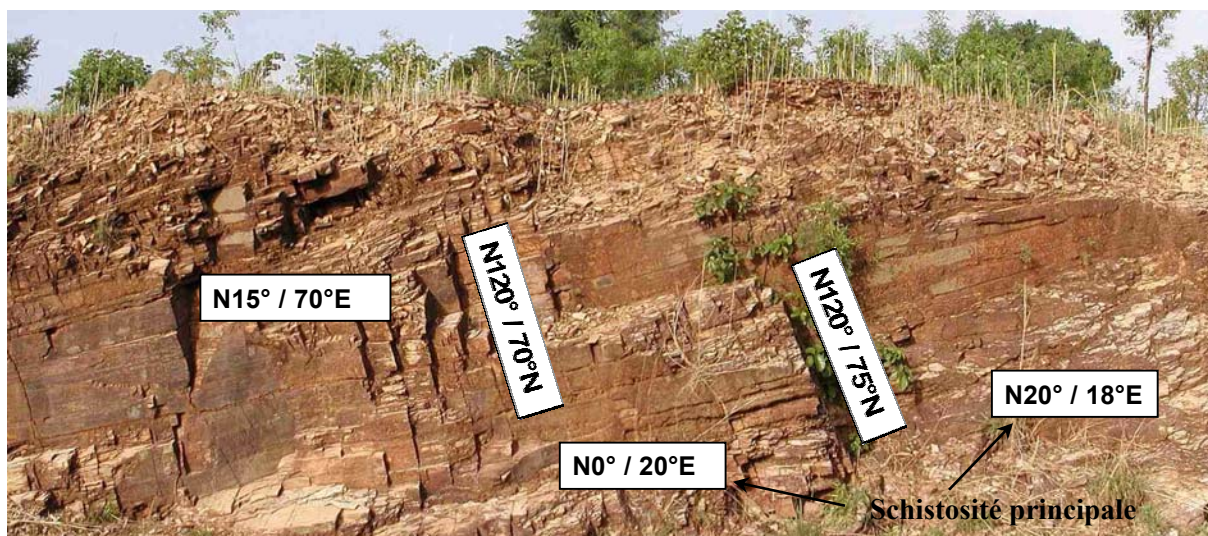


Photo 9 : Affleurement de la structure majeure recoupé par la route. Coté ouest.



Photo 10 : Affleurement de la structure majeure recoupé par la route. Coté est. Remarquer l'aspect en feuillets horizontaux des quartzites.

2.2.2. La géomorphologie

Le bassin versant d'Ara se situe à une altitude moyenne de 455 m. Tel que nous l'avons délimité (nous reviendrons plus loin sur ce point) il a une surface total de 11.7 Km² et se composent de multiples sous bassins drainés par de petites ravines qui se rejoignent pour former la ravine principale appelé rivière Ara (cf. Photo 3 et 4, page 11).

A première vue il se caractérise par la présence d'une structure linéaire majeure de 30 m de dénivelé qui empêche la ravine de couler vers l'est. C'est un affleurement de quartzites schistosés orienté nord-sud, au profil dissymétrique d'est en ouest et du sud au nord (pentes plus fortes à l'ouest et au sud).

Ailleurs dans le bassin, l'aspect du relief semble guidé par la présence ou non de formations superficielles cuirassées ou de filons de quartz qui localement modèlent la topographie.



Photo 11 : Vue de la ravine principale (Ara) en aval.



Photo 12 : Vue de l'exutoire du bassin versant.

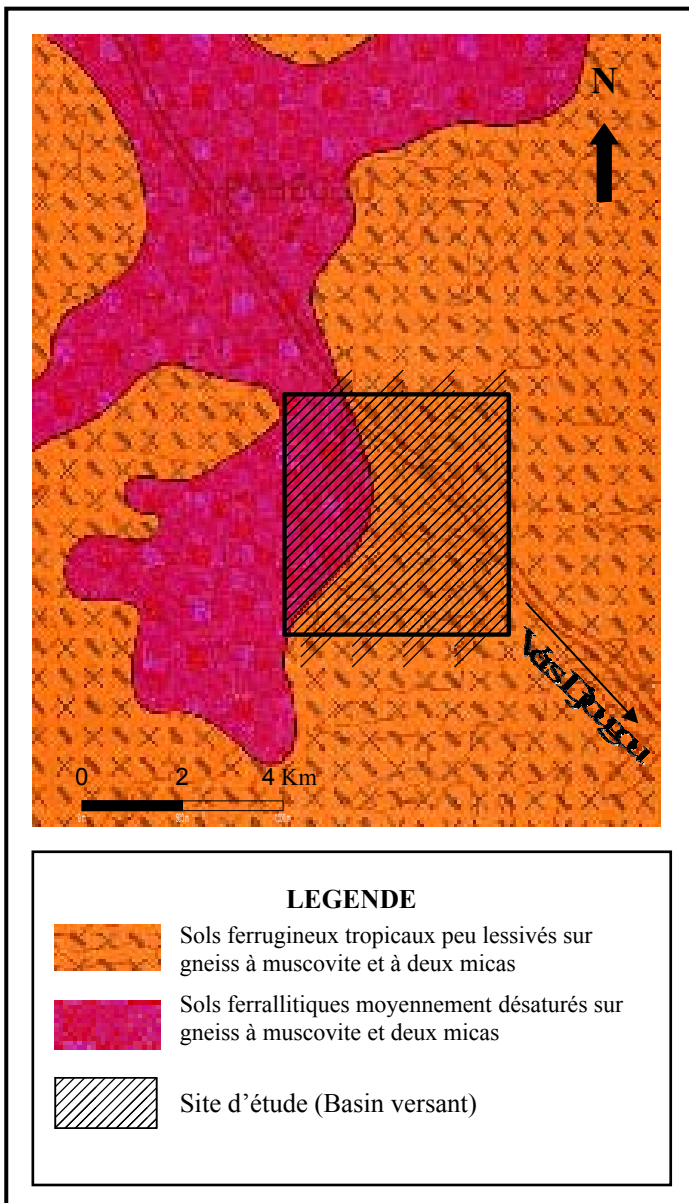
2.2.3. Le climat, les sols et la végétation

Le climat de la zone de Djougou est du type tropical sec à saisons contrastées (une saison sèche et une saison pluvieuse). La moyenne pluviométrique annuelle est de 1300 mm pour une période pluvieuse qui va de Mai à Octobre avec un maximum de pluie en Août (300 à 400 mm).

La végétation est constituée d'une savane arborée à arbustive plus ou moins dense et dégradée par endroits par les pratiques culturelles. La strate herbacée pendant la saison pluvieuse est très dense et atteint une hauteur de 1.5 m. Cependant elle disparaît pratiquement en saison sèche.

Cette végétation se développe sur des sols qui sont de deux types : les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés qui se rencontrent à l'est du bassin versant (et un peu partout dans la zone de Djougou), et les sols ferralitiques qui sont présents dans les zones à couche d'altérites épaisses comme la partie ouest du bassin versant (cf. Carte des sols de la zone de Djougou, page 12).

D'états de surface en majorité limono-sableux, ils présentent parfois une couche superficielle cuirassée (cf. Photo 5, page 12) dont la désagrégation laisse des épandage de petits graviers ferrugineux de couleur ocre.



Carte 14 : Types de sols dans la zone de Djougou. Extrait de la carte pédologique de la 'feuille de Djougou' au 1/200000.

2.3. Cadre humain

Trois villages riverains se partagent l'espace du bassin versant d'Ara. Il s'agit des villages de Babayaka, de Nalohou I et Nalohou II. Les populations de ces derniers y pratiquent des activités culturelles basées sur des productions essentiellement destinées à la consommation locale (mil, maïs, igname, manioc). Les productions de rente concernent notamment le coton et l'anacarde et sont plutôt pratiquées en activités secondaires au même titre que l'élevage.

Le dialecte local couramment parlé s'appelle le 'Yom'. Le terme Babayaka se traduit dans cette langue par 'marché de Baba' et celui de Nalohou 'l'eau dans le sac'.

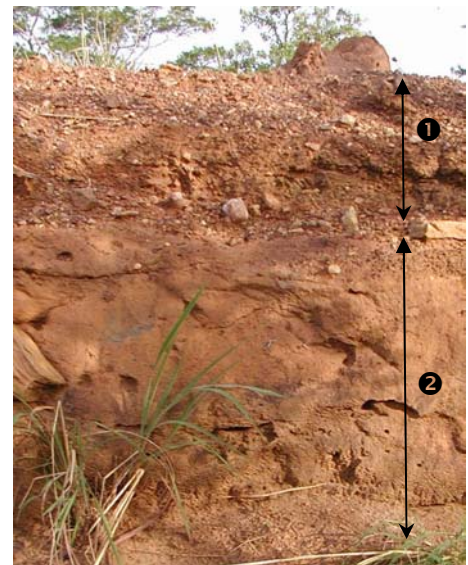


Photo 13 : Vue d'un profil pédologique dégagé par le ravinement. La couche d'argile (2) est coiffée d'un horizon cuirassé altéré (1).



Photo 14 : Affleurement de cuirasse en gros blocs.

Chapitre 2

MATERIEL ET METHODOLOGIE DE PROSPECTION

La stratégie de prospection ainsi que le choix du matériel sont basés sur l'expérience de l'équipe géophysique de l'UR Géovast qui confirme la pertinence des méthodes de résistivités dans l'étude des altérations et des aquifères.

1. Matériel et principe de fonctionnement

Les prospections géophysiques ont été réalisées à l'aide de deux types d'appareils : Un appareil de mesures électromagnétiques qui est l'EM 34 et un appareil de mesures électriques, le résistivimètre Syscal R2.

1.1. L'EM 34

1.1.1. Description de l'appareil

L'EM 34 type Slingram de Géonics est un appareil de mesures électromagnétiques de conductivités utilisé principalement pour réaliser deux types de prospections géophysiques : le sondage (prospection verticale) et le profilage (prospection horizontale).

Il se compose de deux parties de présentation presque similaire :

- Une partie « émetteur » qui comporte un appareil d'émission connecté à une bobine de 63 ou 100 cm de diamètre.
- Une partie « récepteur » constituée de l'appareil de réception et de lecture, lui aussi connecté à une bobine de 63 cm de diamètre.

Ces deux parties sont reliées par un câble de longueur pouvant être de 10, 20 ou 40 m (cf. Photo 7 et 8, page 15)

1.1.2. Principe de fonctionnement

L'EM 34 est classé parmi les appareils de mesures électromagnétiques du type fréquentiel à faible nombre d'induction.

$$B = \gamma S / 2i^{1/2}$$

Avec B : nombre d'induction

S : distance entre émetteur et récepteur (distance entre bobines)

γ : Paramètre de réponse de l'instrument. Il est une fonction complexe liée à la fréquence d'émission (f), à la perméabilité magnétique de l'air (μ_0) et à la conductivité (σ) du terrain prospecté.

$$\gamma = (i2\pi f\mu_0\sigma)^{1/2}$$

La fréquence de l'appareil est automatiquement réglée en fonction du choix de la distance émetteur-récepteur. Elle est de 6,4 kHz pour 10 m, 1,6 kHz pour 20 m et 0,4 kHz pour 40 m.

L'appareil lui-même fonctionne suivant un principe relativement simple. La bobine émettrice crée un champ magnétique primaire qui une fois dans le sol génère un champ secondaire dont les caractéristiques à la réception dépendent de la nature du terrain traversé mais également de la fréquence d'émission et de la distance émetteur-récepteur.

La valeur de ce champ secondaire est donnée par la relation suivante :

$$H_s / H_p \approx i \omega \mu_0 \sigma S^2 / 4$$

Avec H_s : champ secondaire

f : Fréquence d'émission (Hz)

H_p : champ primaire

μ_0 : perméabilité magnétique de l'air

ω : $2\pi f$

σ : conductivité du terrain (mS/m)

S : distance émetteur-récepteur i : $\sqrt{-1}$

Le ratio du champ secondaire au champ primaire étant linéairement proportionnel, l'estimation de la conductivité apparente d'un terrain par l'instrument se fait à l'aide de la relation ci-après :

$$\sigma_a = (4 / \omega \mu_0 S^2) * (H_s / H_p)$$

Il est également possible connaissant un modèle de terrain, de calculer la valeur à lire sur l'appareil en utilisant sa courbe de réponse. Celle-ci se définit sous la forme d'une dérivée de fonction représentant la contribution au champ secondaire d'un terrain situé à une profondeur z .

$$R(z) = \int \Phi(z) dz.$$

Ces courbes sont données pour les configurations en dipôle horizontal (bobines verticales) et vertical (bobines horizontales) par les figures 1 et 2 ci-dessous.

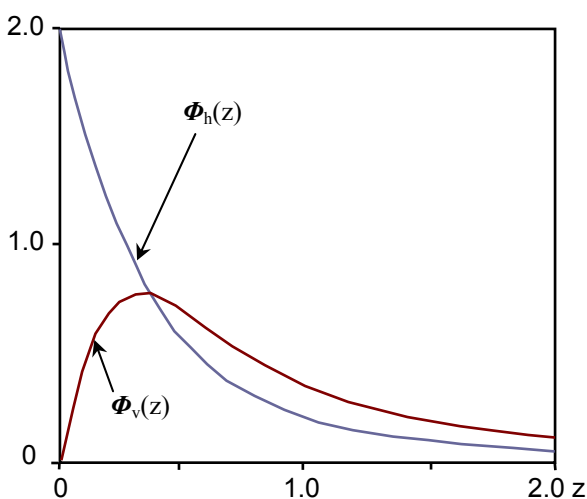


Figure 1 : Courbes de la contribution des terrains au champs magnétique secondaire en fonction de la profondeur pour les configurations en dipôles horizontal et vertical.

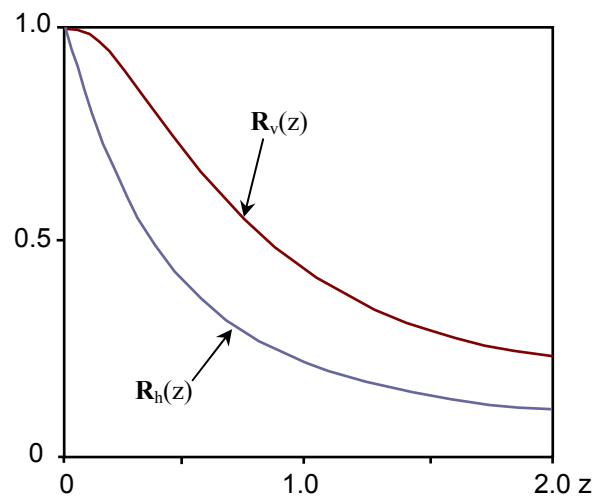


Figure 2 : Courbes de réponses cumulées en fonction de la profondeur pour les configurations en dipôles horizontal et vertical.

Pour un terrain à deux couche par exemple la contribution de la première couche est donnée par $\sigma_a = \sigma_1 [1 - R(z)]$ et celui de la seconde par $\sigma_a = \sigma_2 R(z)$. La lecture de l'instrument qui représente la somme de la contribution des ces deux couches sera donc :

$$\sigma_a = \sigma_1 (1 - R(z)) + \sigma_2 R(z) \quad \text{avec } \sigma_a \text{ en mS/m}$$

Il existe aujourd'hui des programmes tel que PC LOOP qui permettent de faire aisément ce calcul par simple introduction des paramètres de terrain (résistivité et épaisseur de couche).

1.1.3. Utilisation

Pour la réalisation des mesures, l'appareil offre six configurations possibles qui s'obtiennent de la façon suivante :

- En faisant varier la position des bobines qui peuvent être alignées en position verticale (VCP : vertical coplanar position) ou horizontale (HCP : horizontal coplanar position).
- En changeant de longueur de câble intermédiaire (10, 20, ou 40 m).

L'utilisation de l'une ou de l'autre de ces configurations offre des profondeurs d'investigation différentes. Pour chaque position de bobines, elles dépendent de la distance émetteur-récepteur (S). Elles sont de l'ordre de 1 à 1.5 x S en HCP, et de 0.75 à 1 x S en VCP. La méthode de sondage en EM 34 est d'ailleurs basée sur ces relations. Pour le réaliser, on effectue au même point les mesures dans toutes les configurations. Les équivalences terrains s'obtiennent ensuite par inversion des données à l'aide d'abaques ou de programmes conçus à cet effet. Dans le cas du profilage par contre, la configuration utilisée reste la même (profondeur d'investigation unique), et les mesures se font à des points dispersés sur un tracé donné.

Qu'il s'agisse des sondages ou des profilages, l'utilisation aisée de l'EM 34 nécessite la participation de deux opérateurs qui s'occupent chacun des deux principales parties de l'appareil.

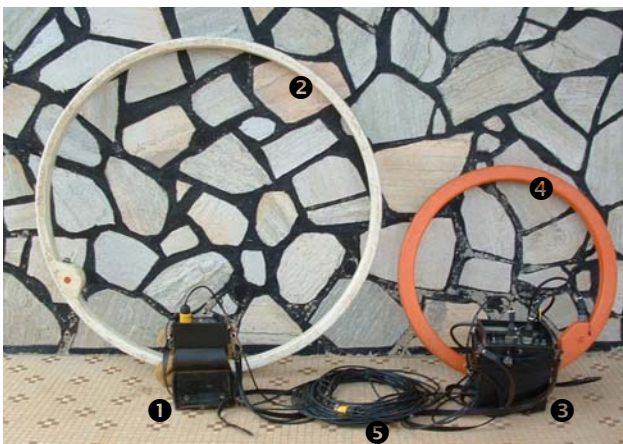


Photo 15 : Vue de l'EM 34. À gauche, la partie émettrice avec l'appareil (1) et la bobine (2), à droite, la partie réceptrice avec le récepteur (3) et la bobine (4). Entre les deux, le câble de liaison (5).



Photo 16 : Vérification de la dérive de L'EM 34 sur une base.

1.2. Le résistivimètre Syscal R2

1.2.1. Description

Le résistivimètre Syscal R2 est un appareil de mesures de résistivités électriques conçu par Iris instrument. Comme l'EM 34, il permet d'effectuer des sondages, mais également des traînés électriques (prospection en profondeur d'investigation unique le long d'un profil) et des coupes de résistivités en 2 ou 3 dimensions (panneaux électriques). Il se présente sous la forme d'un boîtier qui comporte un écran et un tableau à commandes numériques (cf. Photo 9, en bas de page).

En fonction de la nature des prospections, son utilisation est conditionnée par l'association d'un certain nombre d'appareils et d'outils annexes utiles d'une part à la réalisation des mesures (cf. Photo 10 en bas de page), et d'autre part au transfert ou au traitement des données.

Ceux nécessaires à la prise des mesures sont :

- Un jeu d'électrodes avec des câbles de connections,
- Une batterie de 12 Volts pour le courant d'injection,
- Le convertisseur qui sert à faire varier l'intensité du courant d'injection,
- Les multinodes qui sont des boîtiers de connections intermédiaires. Ils sont dotés d'une carte interne permettant l'identification des 16 électrodes qui peuvent y être connectées,
- Le RCM (Remote Control Multiplexer) qui constitue le relais entre le Syscal et les multinodes. Son rôle consiste à envoyer le signal d'interrogation aux multinodes pour le choix des électrodes d'injection et de mesures.

Quant au matériel de transfert ou de traitement des données il se compose essentiellement de supports informatiques : un ordinateur, des logiciels et programmes (ELECTRE, X2IPI, RES2DINV, IPI2WIN, QWSELN) et un câble de transfert.



Photo 9 : Vue du résistivimètre Syscal R2.



Photo 10 : Matériel annexe du Syscal. (1) multinodes, (2) convertisseur, (3) RCM, (4) câbles de connections, (5) électrodes.

1.2.2. Principe de fonctionnement

La mesure électrique de résistivités est basé sur l'utilisation de dispositifs élémentaires constitués de quatre électrodes (tiges métalliques présentées sur la photo 10) : deux électrodes à partir desquelles le courant est injecté et deux électrodes entre lesquelles on mesure la différence de potentielle.

Selon la géométrie des électrodes, ces dispositifs prennent plusieurs noms : Wenner α , β , pôle-pôle, pôle-dipôle etc (cf. Annexe 1, page 55). Dans tous les cas de dispositifs, le calcul de la résistivité (qui est l'inverse de la conductivité) se fait de la même manière. Il s'obtient par la relation ci après :

$$\rho = k (\Delta V / I)$$

Avec ρ : résistivité du terrain (en Ohm.m) 1 Ohm.m = 1000 mS/m

k : coefficient géométrique du dispositif (en mètre)

ΔV : différence de potentiel (en Volt)

I : intensité du courant (en Ampère)

Dans son fonctionnement, le Syscal reprend en automatique les opérations d'injections de courant et de mesures de potentiels, et effectue les calculs de résistivités selon la formule ci-dessus décrite. Ce processus est valable aussi bien pour les dispositifs simples (quatre électrodes) que pour ceux nettement plus élaborés (panneaux électriques). Pour cela il est doté d'une mémoire interne permettant l'installation de protocoles de mesures et le stockage des données. Il peut également tester automatiquement les résistances aux électrodes et acquérir en autonome les mesures de tous les dispositifs de mesures électriques aussi bien en mode temporel que fréquentiel.

Pour réaliser les mesures à l'aide du Syscal, l'opérateur doit installer correctement son dispositif de mesures, transférer dans l'appareil le protocole adapté, tester les connexions après branchements et lancer les mesures. L'appareil identifie automatiquement les électrodes d'injection et de réception, effectue la mesure, et selon le cas, enregistre ou affiche les résultats et passe aux mesures suivantes en répétant les mêmes opérations.

1.2.3. Utilisation

La complexité d'utilisation du Syscal est étroitement liée à la nature des mesures à acquérir.

Pour les sondages et traînées par exemple, la composition de l'appareillage de mesure est minimum (Syscal, batterie et éventuellement convertisseur) et n'exige l'apport d'aucun support informatique. De plus le Syscal possède déjà intégré toutes les options de dispositifs de mesures courants ainsi que les indications liées au paramétrage et aux branchements.

L'acquisition des données dans le cas du panneau en deux ou trois dimensions par contre, requière l'intégration de tous les outils accessoires ci-dessus cités (cf. Dispositif et notions en annexe 1, 2, page 55-56). Elle nécessite de ce fait l'intervention d'un opérateur parfaitement initié.

1.3. Le GPS Garmin 12

Il ne fait pas partie du matériel de prospection géophysique. Nous le mentionnons cependant parce qu'il constitue le principale outil de positionnement qui a généré l'ensemble des coordonnées géographiques qui accompagnent les points de mesures.

Le Garmin 12 est un petit appareil portable de repérage (Global Positioning System : GPS) qui permet de connaître en temps réel les coordonnées géographiques ainsi que l'altitude de tout point à la surface de la Terre. Il se présente sous la forme d'un boîtier qui offre une façade dotée d'un écran et de touches numériques. L'ensemble est de taille et d'aspect proche de celui d'un téléphone portable.

Le principe de positionnement qu'il utilise repose sur la détection de signaux satellitaires captés dans les limites d'un certain angle. Sur la base d'au moins cinq satellites détectés, il effectue les calculs et affiche les résultats en mètres pour les altitudes, et en degrés minutes secondes ou en mètres (UTM) pour les longitudes et latitudes. La précision moyenne de la mesure est de plus ou moins 5 m, mais elle peut se trouver améliorée ou dégradée selon le nombre de satellites détectés et la qualité des signaux captés.

L'utilisation du GPS Garmin 12 est relativement simple. Il peut juste consister à une lecture directe des coordonnées en vue du repérage d'un point connu. Dans les cas de nécessité de stockage des données, il existe en option deux modes d'enregistrement :

- Le mode 'Track' qui est un système d'acquisition automatique en continue des données par intervalles de temps réguliers,
- Le mode 'Way point' qui est l'option d'enregistrement manuel des valeurs de l'affichage en cours.

Une fois enregistrées, ces données peuvent être ensuite transférées dans un ordinateur puis affichées sur une carte quelconque géoréférencée en choisissant le référentiel de représentation souhaité (WGS 84 par exemple).

2. Méthodologie

2.1. Stratégie de prospection

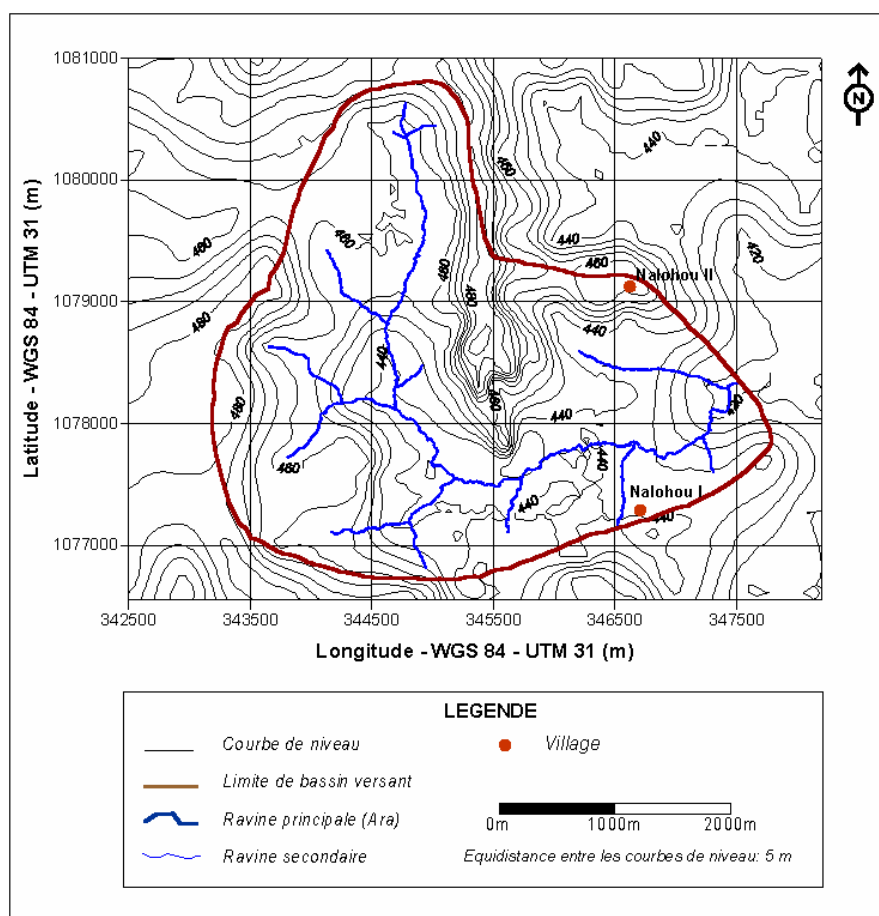
En raison du manque d'informations sur ce site récemment choisi, nous avons adopté une stratégie de prospection scindée en plusieurs étapes en opérant suivant le cas quelques réajustements.

2.1.1. Reconnaissance et limitation du site

Elles ont été faites dans un premier temps par une étude stéréoscopique des photos aériennes de la zone. Celle-ci a permis de reconnaître d'emblé les structures géomorphologiques majeures du site et de se rendre compte de l'importance de la topographie et du couvert végétal. Pour délimiter le site, nous avons eu recours en plus des photos, à une image de carte topographique à l'échelle 1 / 50000 à partir de laquelle les courbes de niveau ont été numérisées et restituées sous SURFER sous la forme de carte topographique (cf. Carte 6 ci-dessous). Cependant cette restitution est quelque peu approximative pour deux raisons :

- L'équidistance entre les courbes de niveau sur la carte topographique source est de 20 m. Les courbes intermédiaires présentées sur celle nouvellement acquise sont le résultat de calculs d'interpolation et ne reflètent pas forcément à tout endroit la réalité du terrain.
- Le manque de précision dans le calage entre le fond de carte topographique et les coordonnées des points repères pris sur le terrain.

Il s'est agit dans un second temps de reconnaître directement sur le terrain certains éléments remarquables portés sur la carte tels que les pistes, les villages etc, de vérifier la précision de leur positionnement, de compléter la carte par l'apport d'autres points pris sur place au GPS.



Carte 15 : Topographie du bassin versant d'Ara.

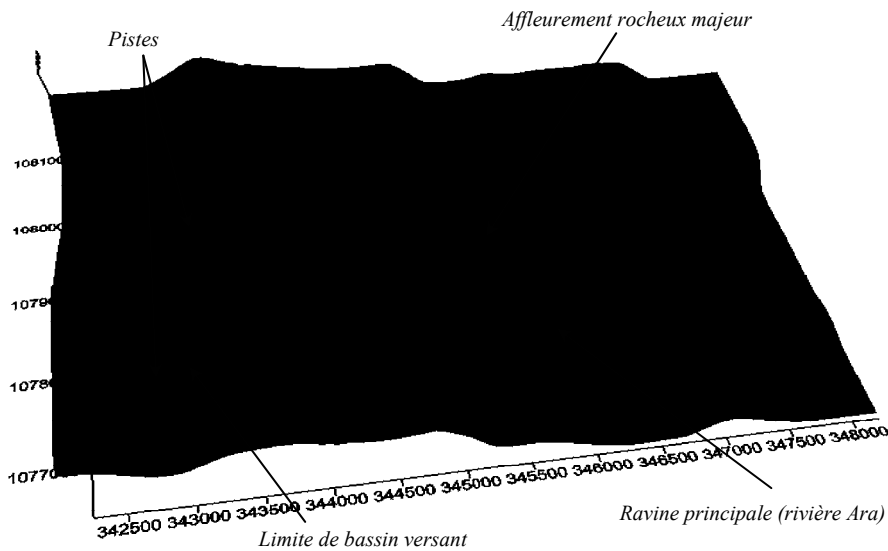


Figure 3 : Vue du bassin versant en perspective.

2.1.2. Choix d'un profil pertinent pour une première reconnaissance du sous-sol

Pour obtenir les premières informations sur la structure du sous-sol, nous avons mis en œuvre la méthode électrique à courant continu avec une technique d'acquisition permettant l'obtention de panneaux de résistivités apparentes. Ces derniers ont été réalisés le long d'un profil de 1780 m (P1, cf. Annexe 5, page 59) choisi pour recouper perpendiculairement la structure majeur à l'est du bassin versant en donnant la priorité à une reconnaissance rapide du terrain en deux dimensions. Le type de mesure utilisé a été le Wenner α en 64 électrodes (écartement de 4 m entre les électrodes) avec un déplacement tous les 128 m en assurant un recouvrement de 50 % entre les panneaux.

Les résultats se présentent sous forme de coupes géoélectriques concaténées qui sont interprétés en utilisant le logiciel d'inversion RES2DINV. Les valeurs calculées donnent une idée de la distribution des résistivités dans le sous-sol (cf. Figure 4 ci-dessous) permettant ainsi de formuler les premières hypothèses sur la nature des terrains qu'elles représentent.

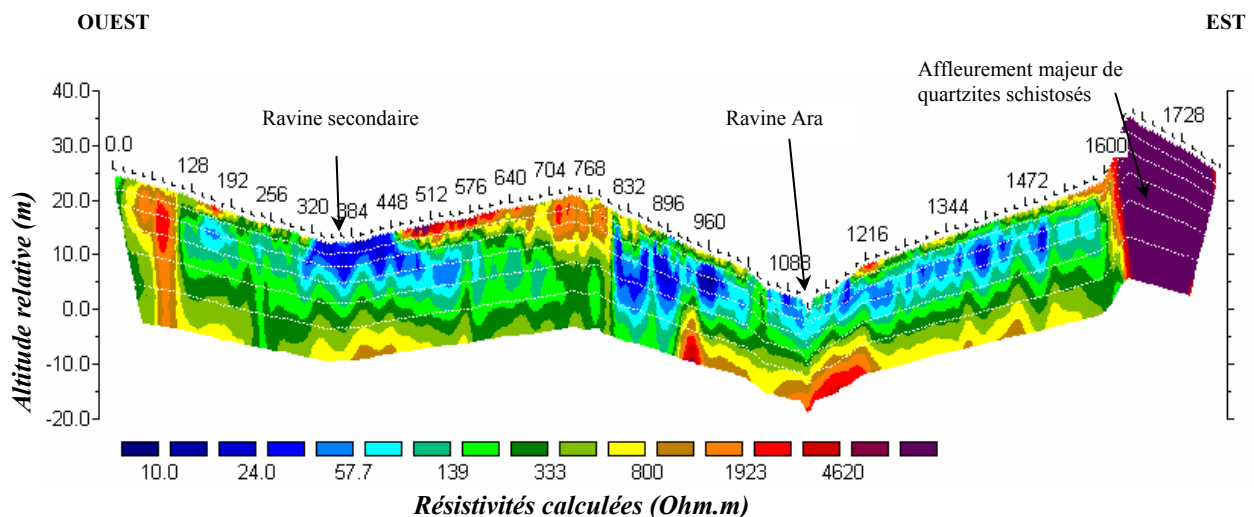


Figure 4 : Electrique 2D en Wenner α . Résultats de l'inversion préliminaire du profil de reconnaissance P1.

2.1.3. Détermination de la gamme de conductivités à mesurer en EM 34

Cette opération consiste à estimer à l'avance la dynamique possible des valeurs de conductivités en fonction de la nature des terrains. Elle est nécessaire dans la mesure ou l'utilisation de l'appareil impose un choix de gamme des valeurs à mesurer.

Pour résoudre ce problème, nous avons extrait de l'image de la coupe géoélectrique P1, des modèles de sondages et procédé à des calculs de réponses de l'appareil dans toutes ses configurations à l'aide du programme PC LOOP. La figure 5, illustre un exemple de sondage ainsi que les équivalences correspondantes.

L'ensemble des calculs montrent une gamme de conductivités comprise entre 0,1 et 30 mS / m. Sur cette base, il a été arrêté de réaliser les mesures sur le calibre 100, ce qui nous autorise des mesures prévisibles de valeurs allant jusqu'à 100 mS/m, avec une précision de 0,1 mS/m soit 1 %.

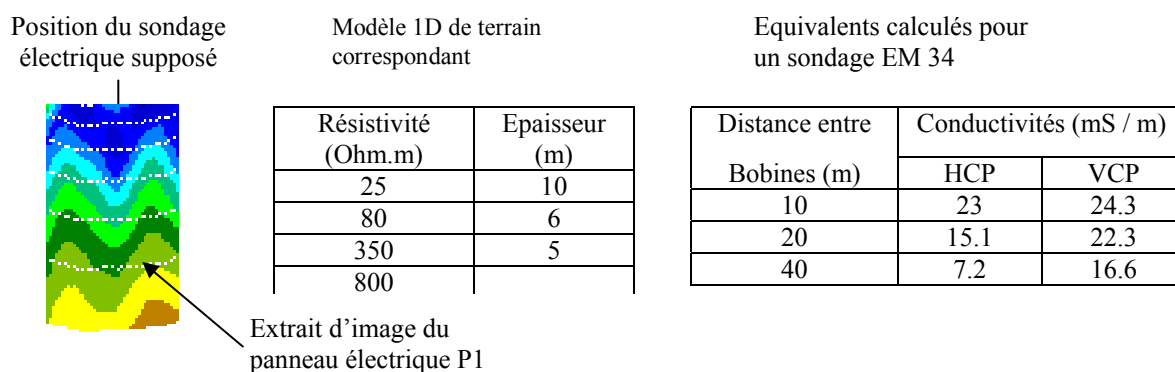


Figure 5 : Exemple de correspondance entre modèle de sondage électrique et valeurs prévisionnelles de lecture à l'EM 34.

2.1.4. Choix de la configuration du dispositif

La configuration de l'appareil a été choisie en tenant compte des résultats du panneau électrique et des calculs de réponses qui l'ont suivi. Cependant nous avons exclu tout de suite l'utilisation de l'appareil en configuration HCP ainsi qu'en écartement de 40 m pour des raisons qui tiennent plus de contraintes pratiques que techniques. Et pour causes :

- L'écartement de 40 m entre les bobines, quelque soit la configuration, offre a priori des profondeurs d'investigation supérieure ou égale à cette distance. Or l'image de la coupe de résistivités montre une hypothétique profondeur du substratum inférieure à 40 m. Le risque de l'intégrer continuellement dans la mesure était de ce fait trop grand.
- L'importance de la topographie et la grande irrégularité des surfaces rend difficile l'alignement des bobines dans cette configuration.
- Le profilage en HCP nécessite forcément la contribution de quatre opérateurs au lieu de deux comme en VCP.

- La densité de la végétation à plusieurs endroits gêne le passage dans le cas où le déplacement se fait en maintenant les bobines à l'horizontal (surtout que la bobine émettrice fait 1 m de diamètre). Une solution alternative à ce problème existe, qui consisterait à se positionner seulement une fois au point de mesure, mais elle fait perdre beaucoup de temps.
- Enfin, à une distance de 40 m, la visibilité entre opérateurs est souvent nulle à cause de la végétation. Ajoutée aux risques de changements topographiques qui augmentent également à cette distance, l'alignement des bobines devient alors très approximatif.

Finalement, notre choix se résumait à trouver un compromis entre tous ces facteurs. Il a porté sur la configuration VCP avec un écartement de 20 m. La hauteur de bobines par rapport au sol a été arrêtée à 1 m pour introduire un lissage volontaire entre les points de mesures.

2.1.5. Choix de la base de référence

Afin de calibrer l'EM 34 et évaluer éventuellement sa dérive dans le temps, nous avons choisi une base résistante. Elle présente l'avantage d'avoir une perméabilité magnétique proche de celle de l'air, ce qui facilite le réglage du zéro électronique de l'appareil. De plus, du fait la résolution quasi nulle à cet endroit, les écarts de valeurs lues quotidiennement peuvent être interprétés comme résultant du bruit ambiant ou alors du possible dérive de l'appareil. Sur l'ensemble de la période de prospection les écarts observés sont de l'ordre de 0,2 mS/m sur le calibre 100 (cf. Annexe 3, page 57), ce qui représente à peu près l'erreur de lecture que peut commettre un opérateur.

Il est à préciser que là encore, que ce choix tient plus de la grande difficulté à trouver une base conductrice stable surtout à cette période de l'année, que de l'intérêt purement technique. En effet il est plus facile de déceler des écarts de dérive avec des valeurs de conductivités lues plus élevées.

2.1.6. Choix des paramètres de profilage

- *L'orientation des profils*

Les profils ont été réalisés suivant la direction est-ouest en aller-retour, au moyen du GPS Garmin 12 que nous avons couplé à l'EM 34 et utilisé en mode 'Way points'. Cette direction a été choisie de manière à recouper perpendiculairement les structures principales du bassin, en supposant leur orientation similaire à celle de la schistosité principale de l'affleurement majeur qui est nord-sud. Nous avons vérifié par la suite que ce choix était judicieux en prospectant dans le sens nord-sud, une zone de 0,5 Km² (Zone 2, cf. Annexe 5, page 59) située au sud-est du bassin. Les résultats qui sont présentés sur la figure 7, montrent un écrasement des anomalies voisines de celles situées juste dans l'axe des profils.

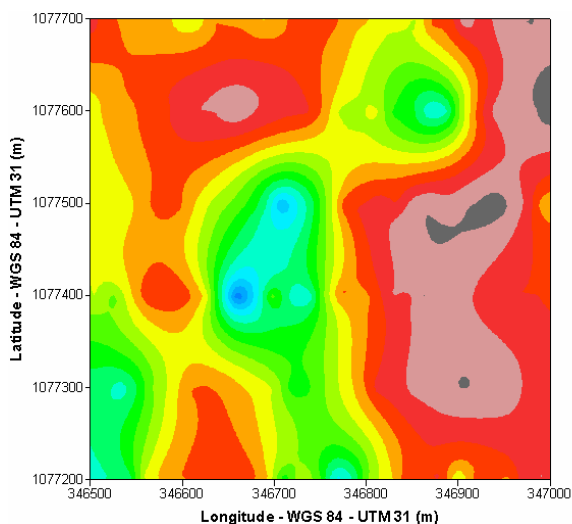


Figure 6 : Zone 2. Contours des anomalies en profilage est, ouest.

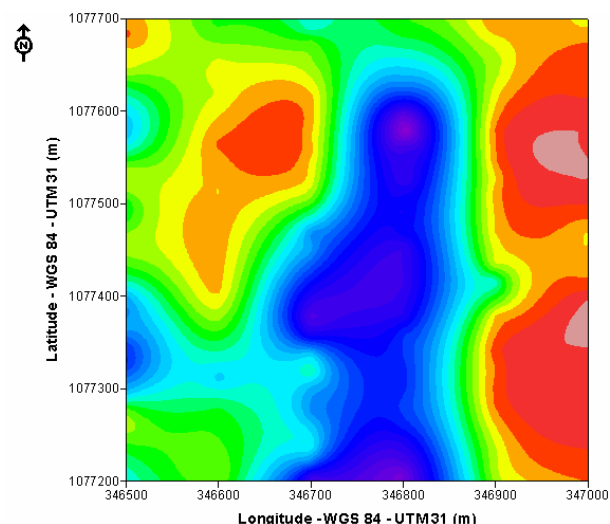


Figure 7 : Zone 2. Contours des anomalies en profilage nord, sud.

- *Le pas de mesure*

La distance de mesure retenue entre deux points d'un même profil a été de 20 m. Nous avons jugé celle-ci suffisante pour échantillonner les petites anomalies observées sur l'image de panneau électrique. La figure 8 illustre la comparaison de mesures en pas de 20 m et une reprise effectuée en pas de 10 m sur le même profil. La superposition des deux courbes montre bien le manque d'intérêt qu'il y aurait à réduire davantage la distance préalablement choisie. Par ailleurs, des essais de cartographie réalisés sur une zone de 1 km² (zone 1, cf. Annexe 5, page 59) avec différents pas de mesures (en conservant un espacement entre profil de 100 m), montrent des résultats satisfaisants jusqu'à une limite de 40 m (cf. Figure 10, page 24).

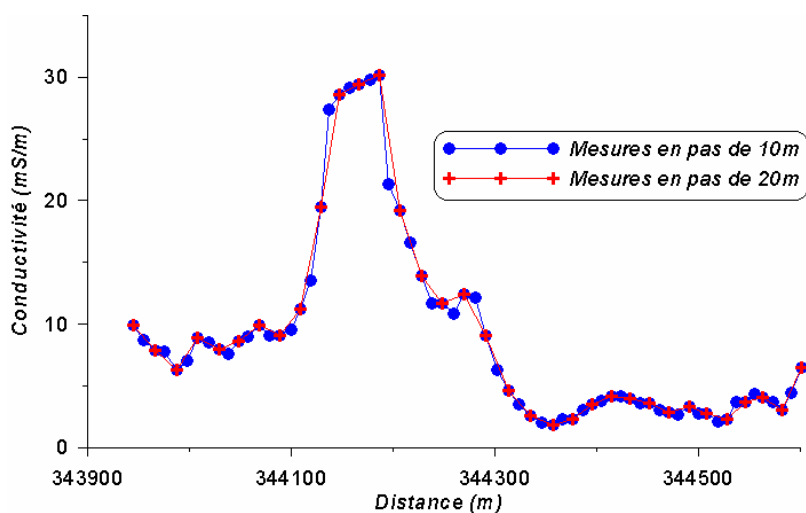


Figure 8 : Courbes comparées des valeurs de conductivités mesurées en pas de 10 et 20 sur un même profil.

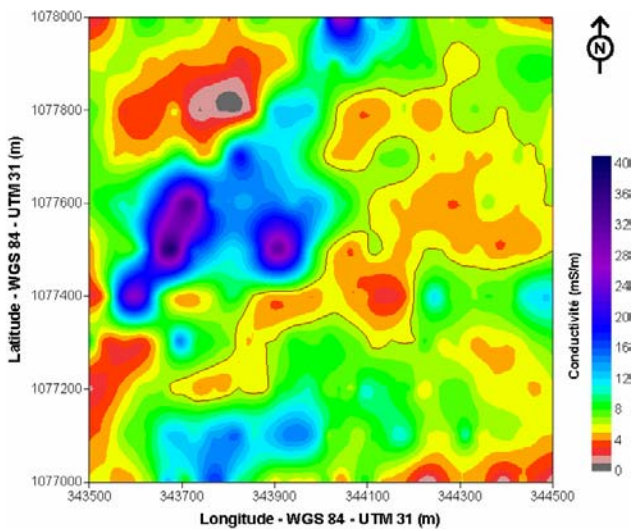


Figure 9 : Zone 1. Contours des anomalies en prospection à pas de 20 m.

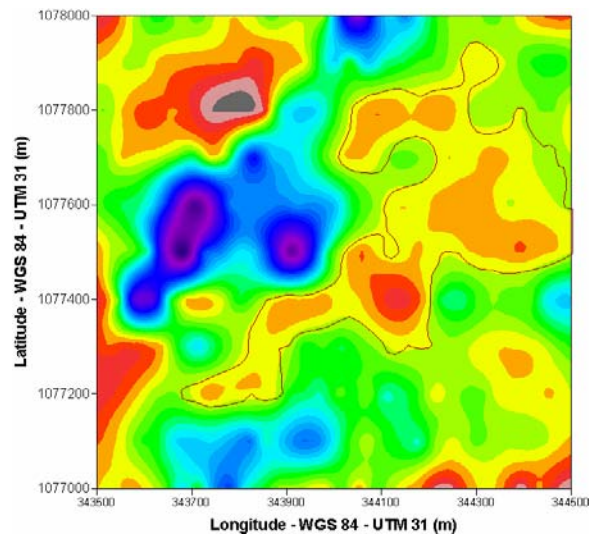


Figure 10 : Zone 1. Contours des anomalies en prospection à pas de 40 m

- *La distance entre les profils*

Deux considérations sont à la base du choix de l'écartement entre deux profils qui est de 100 m. D'une part, nous maintenons l'hypothèse de l'orientation nord-sud des structures et supposons alors que même pour celles de largeur peu importante, le risque d'un non échantillonnage est faible du fait du pas de mesure assez resserré, et d'autre part, qu'elles sont suffisamment allongées pour être prises par plusieurs profils. En faisant un essai de cartographie en espacement 50 m dans la zone 1, nous avons obtenu une meilleure définition des contours d'anomalies tel que l'on peut l'observer à travers le cas de l'anomalie résistante dont nous avons surligné les contours dans les figures 11 et 12. Nous avons cependant estimé que la recherche d'une telle précision ne pouvait pas constituer une priorité à l'échelle de notre carte.

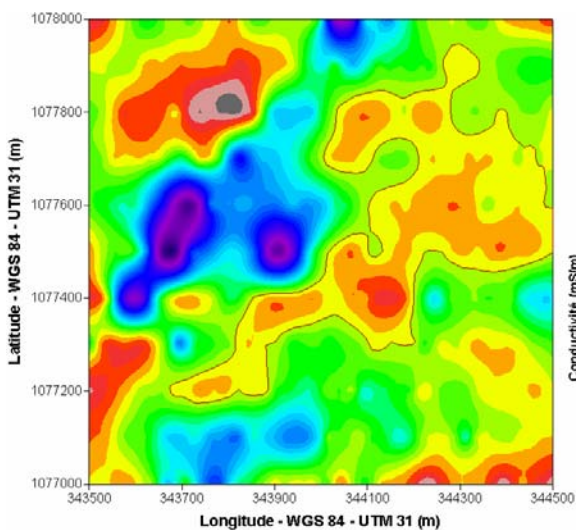


Figure 11 : Zone 1. Contours des anomalies pour des profils espacés de 100 m et pour un pas de mesure de 20 m.

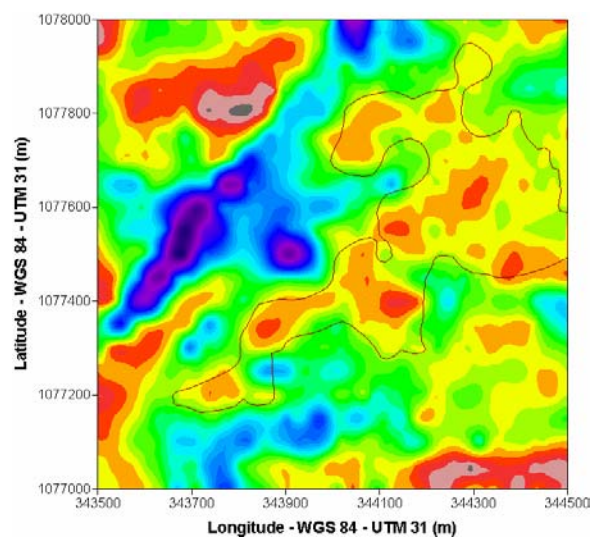


Figure 12 : Zone 1. Contours des anomalies pour des profils espacés de 50 m et pour un pas de mesure de 20 m.

2.1.7. Utilisation des sondages en compléments d'interprétation des mesures

Elle répondait au besoin de vérifier ponctuellement des structures de terrains correspondant à des anomalies restées sans interprétation précise. Le dispositif utilisé est le type Schlumberger avec une distance maximale entre électrodes d'injection égale à 160 m (cf. Annexe 1, page 55). Parallèlement à ces sondages, il a été réalisé aux mêmes points, des sondages EM 34 en six configurations. Le but de ce couplage était la comparaison des résultats obtenus par ces deux méthodes en vue de juger de la validité de chacune d'elle. Cependant, à l'absence sur place d'un programme permettant l'inversion des données de sondage EM 34, l'idée fut de les utiliser pour se rapprocher la bonne équivalence de terrain dans l'inversion des sondages électriques, en se servant du modèle de calcul direct de la réponse de l'EM 34.

2.2. Problèmes et limites méthodologiques

Les problèmes rencontrés lors de cette prospection sont multiples. Il y a ceux liés directement à la performance du matériel (problème de précision, de rapidité de mesure...) et ceux liés à leur adaptation au regard de la problématique posée et des contraintes de terrain. Dans les lignes qui suivent nous aborderons quelques uns d'entre eux en les regroupant en deux volets : ceux concernant le positionnement des points de mesures et ceux affectant les données de prospection.

2.2.1. Système de positionnement

Il repose entièrement sur le GPS Garmin 12 qui a été utilisé aussi bien pour la prospection EM 34 que pour la mise en œuvre du dispositif du panneau électrique ou le repérage des points de sondages. A ce titre, la précision de chaque point dépend de celle du GPS au moment où il est pris. Or, des tests réalisés avec ce GPS en station fixe de 08h à 15h (il s'agit de l'intervalle de temps pendant lequel la prospection EM 34 est faite journalièrement) ont révélé une dispersion plus ou moins importante des positions mesurées. Ces erreurs comme le montre l'ellipse de dispersion illustrée par la figure 13 (page 26) peuvent atteindre 13 m en longitude et 10 m en latitude. Il est de ce fait prévisible que de tels écarts puissent affecter chaque point de la zone prospectée.

Partant de ce constat, il faut alors comprendre que si au niveau de la représentation cartographique et même du calcul d'interpolation les profils de prospection prennent une allure bien linéaire avec une équidistance constante tel qu'illustré dans la portion de carte en figure 14, cela traduit plutôt la précision de positionnement de l'opérateur. En réalité, les profils ont une allure beaucoup plus sinueuse qui s'écarte parfois de leur tracé vrai car dans sa progression, l'opérateur effectue des ajustements d'orientation qui intègrent les erreurs du GPS. De même, une certaine tolérance est à observer sur les différences que nous présentons dans les comparaisons

entre cartes, si on admet justement que les mesures ne sont pas forcément reprises aux mêmes points.

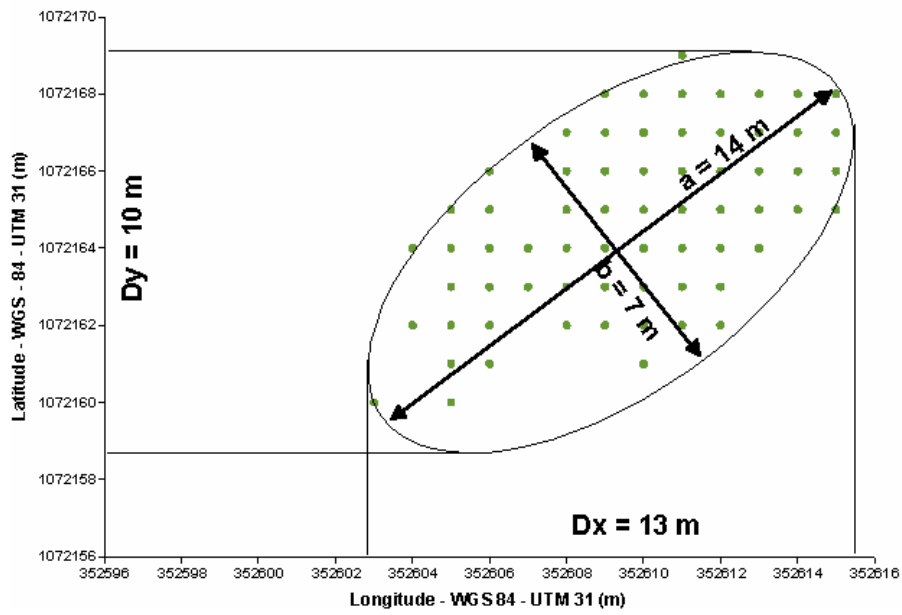


Figure 13 : Ellipse de dispersion du GPS Garmin 12 en station fixe.

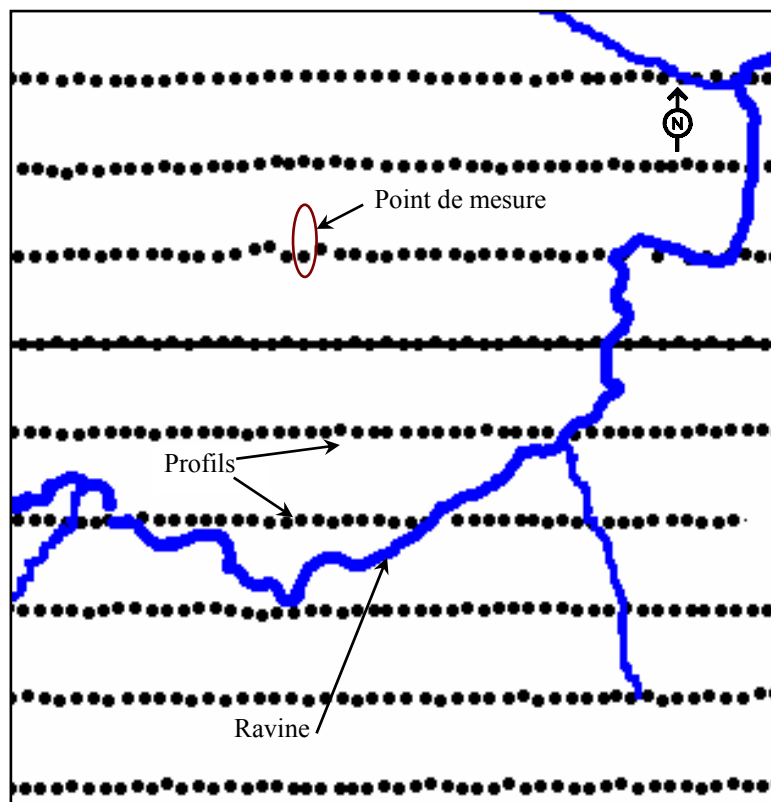


Figure 14 : Aspect des profils de prospection tel qu'ils sont représentés sur les différentes cartes.

2.2.2. Prospection EM 34

Dans le paragraphe consacré au choix de la configuration de l'EM 34, nous évoquions tantôt les difficultés pratiques liées aux contraintes de terrain en fonction de la position des bobines ou de la distance entre elles.

Les problèmes que nous signalons à présent concernent le matériel lui-même, mais également quelques erreurs de mesures imputables à la configuration VCP. En effet l'EM 34 que nous avons utilisé possède une bobine émettrice de taille supérieure (1 m de diamètre) à celle réceptrice (68 cm de diamètre). Dans ces conditions, garantir l'utilisation de l'instrument à 1 m du sol comme il était prévu est impossible quand on sait que les bobines sont portées sur les épaules d'opérateurs souvent différents notamment pour la partie émettrice en raison de son poids (environ 10 kilogrammes). Quant aux mesures, nous avons remarqué qu'elles étaient souvent bruitées en zone résistante. Les essais qui ont été menés sur un affleurement rocheux, ont d'ailleurs montré une variabilité des conductivités (entre 0,1 et -0,4 mS/m) en fonction de l'orientation de l'axe de mesure en VCP, tandis qu'elles étaient constantes en HCP (0,2 mS/m). Cela serait vraisemblablement lié à la résolution plus faible de cette configuration et à sa sensibilité à l'anisotropie.

2.2.3. Prospections électriques

- *Panneaux électriques*

En dehors de la lourdeur de mise en œuvre des dispositifs qui s'est trouvée accrue du fait du redéploiement journalier dû à l'impossibilité de laisser le câblage sur place (à cause des rongeurs), la méthode du panneau électrique s'est révélée d'une utilisation assez commode au plan technique (absence de problèmes de contacts notamment). En revanche sur le plan pratique, le déroulement des prospections s'est heurté à un certain nombre de contraintes de terrain.

Sur l'axe des profils, nous avons eu recours au layonage afin de nous offrir une vue suffisante sur le tracé. Ce procédé marche bien sur tant que le tracé ne débouche pas sur un champ. Ceux-ci d'ailleurs quand ils portent des cultures d'ignames ou de maniocs, sont constitués des butes de 0,5 à 1 m de hauteur qui peuvent créer des effets 2D dans les mesures.

Le facteur topographique n'est pas non plus en reste. Il faut compter avec les petites ravines et les multiples affleurement rocheux ou cuirassés à passer avec toutes les dispositions conséquentes à prendre en compte pour assurer le bon déroulement de la mesure.

- *Sondages électriques*

Deux problèmes majeurs ont été rencontrés dans l'acquisition des données de sondage. Le premier concerne le pendage que présente parfois le socle. Quand celui-ci est important, il se traduit par une courbe de sondage dont la pente à la fin excède le maximum théorique des 45° (voir figure 15). Le second quant à lui, est en relation avec la grande variabilité de la nature des terrain surtout en surface qui introduit ponctuellement des effets 2D (voir exemple en figure 16). Ce problème à été en partie résolu en changeant la place des électrodes, ou en orientant différemment l'axe du sondage de manière à se trouver le plus possible en situation 1D (cas des anomalies orientées).

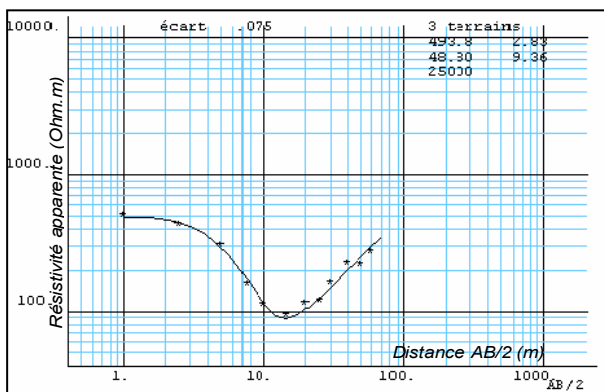


Figure 15 : Points de mesures dispersés en fin de courbe, résultant des effets 2D.

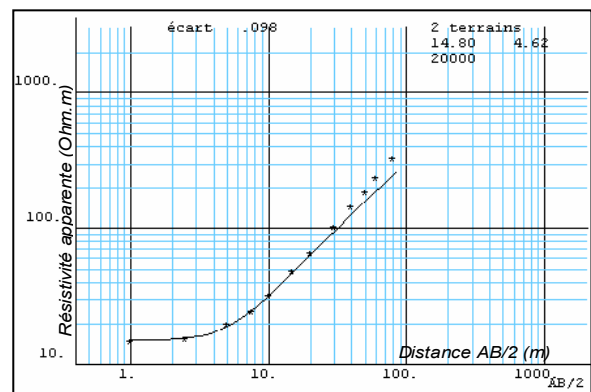


Figure 16 : Pente de fin de courbe supérieure à 45°, résultant du pendage important du socle.

2.3. Conclusion sur les aspects méthodologiques

Après toutes les séries d'ajustements et malgré les difficultés rencontrées, la stratégie de prospection mise en place s'est révélée optimale pour garantir une bonne représentation des structures prospectées, tout en assurant la fiabilité des mesures. Du point de vue temps de prospection, elle s'est avérée également efficace puisqu'elle a permis la cartographie du bassin à l'EM 34 en l'espace de trois semaines.

Chapitre 3

RESULTATS ET INTERPRETATION

Dans cette partie du document il sera présenté dans un premier temps les résultats de la prospection EM 34. Nous aborderons ensuite ceux des autres méthodes (notamment électriques) utilisées pour améliorer l'interprétation des données de la prospection. Pour faciliter leur compréhension, nous donnerons dans certains cas les clés de lecture et les limites de considérations à prendre en compte.

1. La prospection EM 34 : résultats et interprétation préliminaire

1.1. Résultats

1.1.1. les valeurs de conductivités

La prospection de la totalité de la surface du bassin à l'EM 34 a nécessité la réalisation de 7149 points de mesure. Sur l'ensemble des points mesurés les valeurs de conductivités observées se situent entre 0 et 39,9 mS/m, ce qui représente une gamme assez faibles et donc peu favorable aux méthodes électromagnétiques.

En proportion la répartition des valeurs de conductivités est très inégale (cf. Tableau de distribution du nombre de points par classes en annexe 6, page 60). La figure 17 (page 30) présente la répartition des mesures en classes correspondant à des intervalles de 1 mS/m chacune. On constate que la grande majorité des points mesurés se retrouve dans les classes de conductivité inférieures à la première décade (0 à 10 mS/m) sur le calibre EM 34 choisi qui est de 0 à 100 mS/m. En estimations chiffrées ce sont au total 7114 points qui sont compris entre 0 et 25 mS/m (soit 99,5 % des valeurs) contre seulement 35 points (0,5 %) pour les classes de conductivités supérieures à 25 mS/m. Au niveau des classes de conductivités faibles (0 à 3 mS/m), le nombre de points par classe avoisine 650. Celui-ci croit lentement pour atteindre un maximum de 820 points (11,4 %) dans la classe se situant entre 4 et 5 mS/m. A partir de cette limite, la répartition au niveau des classes suivantes est marquée par une baisse se faisant à une allure exponentielle (cf. Figure 18, page 30).

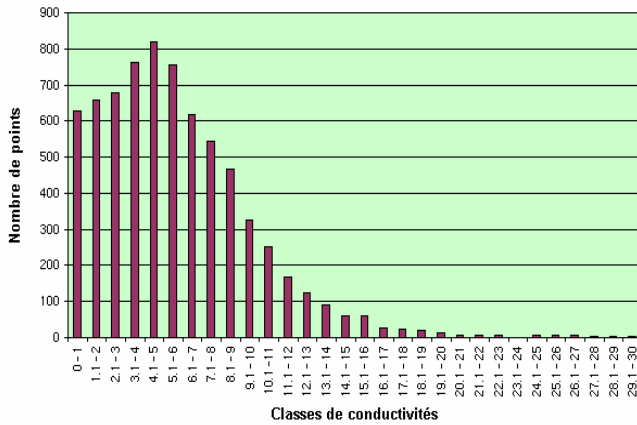


Figure 17 : Distribution des mesures par classes de conductivités.

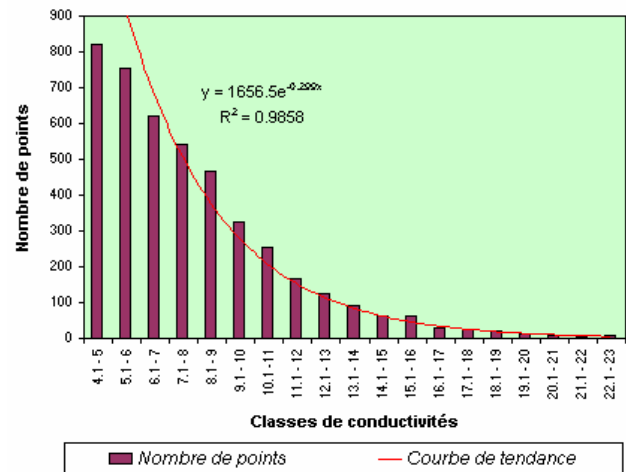


Figure 18 : Courbe de tendance de la distribution à partir de la valeur maximale.

Considérée dans l'absolu la valeur de la mesure indiquée à chaque point ne correspond pas à la réponse exacte du modèle de terrain 1D en dessous et cela s'explique par deux facteurs.

- La faible résolution de l'appareil en VCP en zone très résistante : Par des mesures réalisées en VCP sur un affleurement rocheux de quartzites nous savons que des variations existent selon l'orientation de l'axe de mesure. L'origine de ces variations réside dans la résolution faible de l'appareil, conséquence de la géométrie du champ magnétique en configuration VCP. Dans tous les cas, la prospection ayant été faite dans cette configuration, les valeurs de mesures ont probablement été affectées au passage des zones à substratum affleurant ou sub-affleurant.
- Les problèmes d'anisotropie de la mesure: en représentation conventionnel, le point de mesure en EM 34 se situe à mi-distance entre les bobines et traduit la réponse de la portion de terrain située entre les bobines. Cependant pour que la valeur mesurée soit significative de la structure de terrain situé juste en dessous, il faudrait se trouver en situation 1D. Or en pratique, la prospection tel qu'elle a été réalisée ne satisfait pas toujours à cette condition. La valeur de la mesure obtenue dans ce cas correspond à la réponse plus ou moins complexe d'un ensemble de terrains hétérogènes et celle-ci peut se trouver écartée de celle qui pourrait être obtenue au point précis de la mesure. De plus dans notre cas, la hauteur des bobines par rapport au sol était de 1 m. Cela suppose l'ajout d'une couche résistante (la couche d'air) entre le sol et les bobines, l'augmentation du rayon d'action du champ émis, et donc l'intégration d'un nombre plus grand de terrains hétérogènes. La figure 19 présente les différences entre les valeurs théoriques calculées dans l'hypothèse 1D et les valeurs réelles mesurés sur le profil

électrique P1. Les parties de courbes où les points se confondent se retrouvent dans les zones où la structure du terrain se rapproche d'un modèle 1D. Entre 1000 et 1600 m la courbe des valeurs calculées montre des variations brusques entre les points. Celle des valeurs mesurées présente la même allure mais avec des écarts moins importants. Cela traduit très bien l'aspect 'globale' de la mesure EM 34 par rapport à celle en électrique 2D qui est plus discriminatoire.

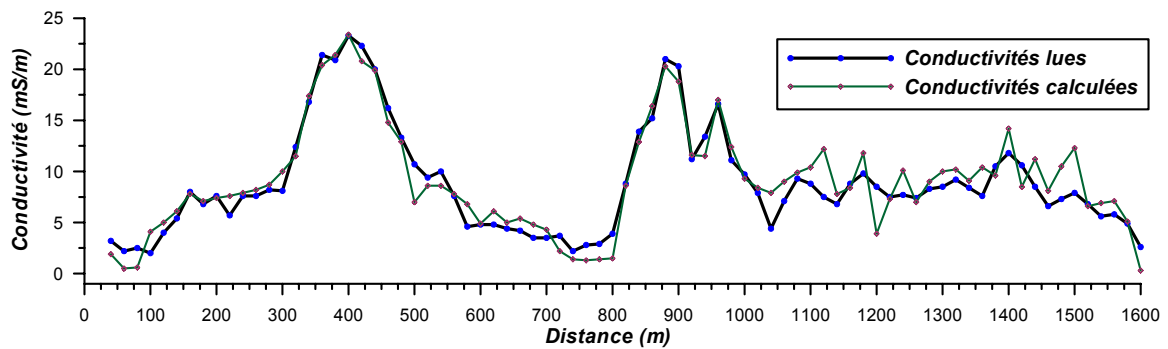


Figure 19 : Courbes comparatives des valeurs de conductivités lues et de celles calculées en hypothèse 1D, sur le profil P1.

1.1.2. L'allure des courbes de mesure le long des profils

L'allure de la courbe de mesure le long d'un profil dépend naturellement des zones traversées. Compte tenu de la grande hétérogénéité des terrains du bassin il n'existe pas de profil type mais de modèles synthétiques dans lesquels se trouvent presque tous les cas de séries de mesures rencontrés dans le bassin versant. La figure 20 (page 32) illustre un exemple de mesures prises d'est en ouest à la latitude 1078100 m et sur lequel on peut distinguer certaines variations spatiales courantes :

- Des successions de valeurs de conductivités faibles et quasi identiques sur plusieurs centaines de mètres (cas 1) caractéristiques des grandes zones résistantes.
- Des valeurs ponctuelles en pics (cas 2) qui tranchent avec l'ensemble des valeurs observées et qui traduisent la réponse de zones conductrices très circonscrites.

Entre ces deux types de variations, on peut observer des successions de valeurs intermédiaires sous plusieurs formes :

- Paliers de valeurs moyennes avant ou après les zones conductrices (cas 3)
- Valeurs en progression ou régression lente (cas 4)
- Variations brusques et parfois alternées de la conductivité (cas 5).

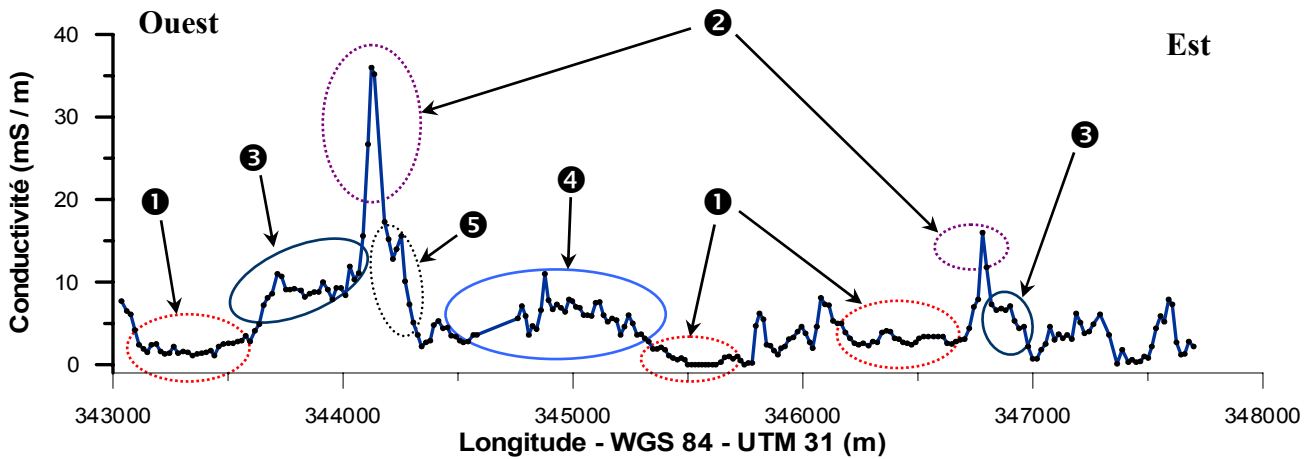


Figure 20 : Valeurs de conductivités le long d'un profil à la latitude 1078100 m

1.1.3. La carte de conductivité EM 34

- *Mode de représentation*

La carte de conductivités EM 34 a été obtenue en réalisant sous 'SURFER' des calculs d'interpolation (Kriging) entre les points de mesures. Pour une optimisation des résultats, les paramètres de calculs ont été fixés suivant les caractéristiques du variogramme de données (cf. Figure 21). Signalons que le respect strict de ces normes n'est pas obligatoire pour obtenir une représentation plus ou moins correcte de la carte. Cependant quelques légères différences apparaîtront dans les contours d'anomalies et concerneront d'avantage celles petites et voisines.

Sur la carte (carte 7, page 35) les anomalies sont représentées par une gamme de couleurs qui ne suit ni une progression linéaire ni une progression logarithmique. Il s'agit d'une échelle de couleurs personnalisée, choisie pour palier à la contrainte qu'impose la faiblesse de la gamme de mesures et donner un aspect plus discriminatoire à la carte en se basant sur la distribution des résistivités observée sur le panneau électrique.

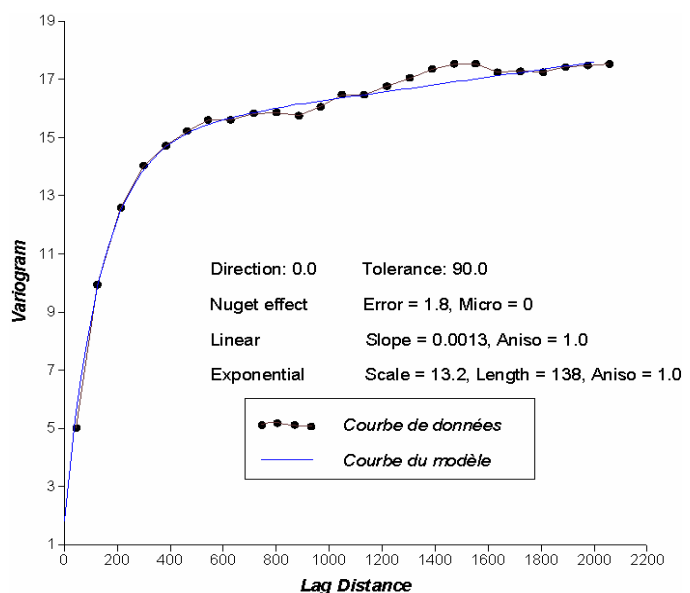


Figure 21 : Variogramme des données de conductivités EM 34.

- *Distribution des conductivités*

L'ensemble de la carte laisse apparaître une organisation de conductivités assez complexe. Pour une première analyse cependant, on peut distinguer deux tendances : la partie est dominée par des zones de faibles conductivités, et la partie ouest beaucoup plus contrastée.

La classification selon l'échelle que nous nous sommes fixée nous permet de distinguer trois types d'anomalies qui ne correspondent pas d'emblé à des structures visibles sur le terrain. Nous avons distingué les anomalies de fortes, de moyennes et de faibles conductivités.

- Les anomalies conductrices : Ce sont les zones de conductivité supérieure à 12 mS / m. En superficie, elles ne représentent que 10 % du bassin (cf. Carte 8, page 35). A l'ouest et au nord, elles apparaissent en petites zones isolées en amont des petites ravines ou en 'poches' allongées plus ou moins connectées le long du tracé de celles-ci. A l'est, elles sont peu nombreuses et constituent des zones linaires de largeur réduite (50 à 100 m) orientées nord-sud.
- Les anomalies résistantes : Elles occupent près de 60 % de la surface du bassin et regroupent les zones de conductivité inférieure à 5 mS / m. Contrairement à celles précédentes, elles se présentent souvent en grandes zones continues de conductivités assez similaires. Plus présents dans les parties est et extrême ouest du bassin, on les retrouve également en petites zones isolées au centre et le long de la ravine principale.
- Les anomalies de conductivité moyenne : il s'agit des zones de transition entre anomalies résistantes et anomalies conductrices. De conductivités comprises entre 5 et 12 mS/m elles couvrent près de 40 % de la partie ouest du bassin.

Cette classification comme nous l'avons souligné au début, ne correspond à priori à aucune réalité géologique. Il s'agira alors de trouver à l'aide de certaines méthodes une traduction logique et cohérente qui puisse justifier l'ensemble des mesures.

1.2. Interprétation préliminaire par observations de terrain

Une interprétation quantitative directe des mesures EM 34 n'est pas aisée. D'une part parce que plusieurs modèles de terrain peuvent donner la même lecture à l'EM 34 (problème d'équivalence), et d'autre part parce que l'organisation spatiale des résistivités n'est pas superposable à la topographie du bassin. Néanmoins nous présentons un début d'interprétation à l'aide des premières observations qui étaient à notre portée.

Lors de la prospection, il a été noté en même temps que les valeurs de conductivités, les éléments remarquables de terrain pouvant guider éventuellement les hypothèses d'interprétation. Il s'agit entre autre des affleurements rocheux, de la présence ou non de formations superficielles cuirassées, des zones d'affleurement de la nappe etc.

Du recoupement entre valeurs de conductivités mesurées et observations de terrain (illustré en Annexe 4, page 58) il nous a été possible de faire les constats suivants:

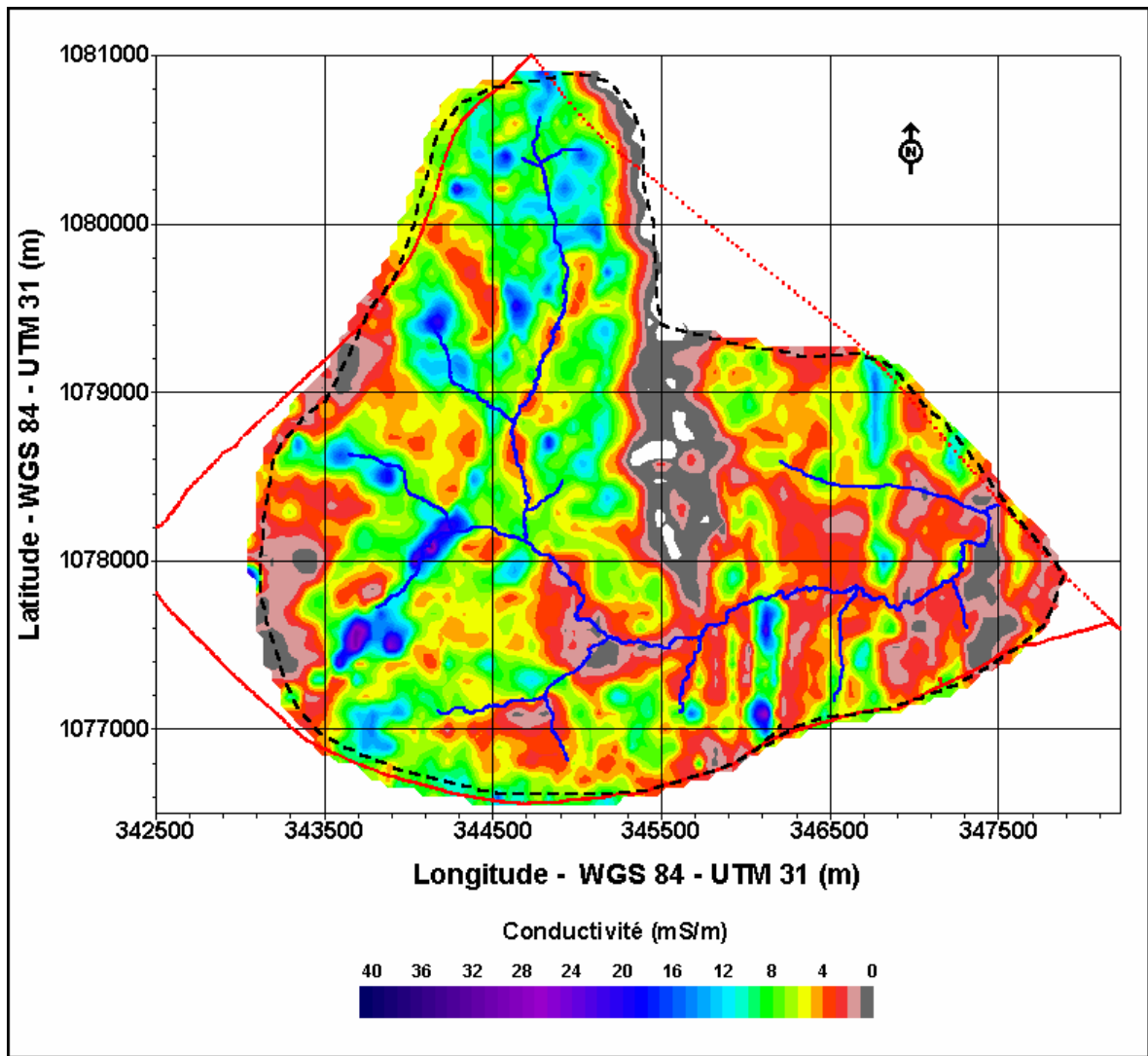
- Les valeurs les plus faibles de conductivités correspondent à des zones d'affleurement rocheux (schistes, quartz, quartzites). Sur l'affleurement rocheux majeur de quartzites au centre du bassin versant, ces valeurs pouvaient être nulles voir négatives (valeurs nulles correspondant à une réponse spécifique de L'EM 34 en zone très résistante).
- Les zones d'affleurement de cuirasses présentent des valeurs de conductivité très variables qui s'étalent pratiquement sur toute la gamme mesurée sur le site. Il ne semble pas exister non plus de relation entre l'altitude de ces cuirasses et les conductivités correspondantes.
- Les valeurs de conductivité fortes ont été mesurées en tête de ravine ou à des endroits côtoyant des zones d'affleurement de nappe (sources notamment). Certains éléments anthropiques renseignent également sur la nature possible de ces zones. Le puits de Nalohou II se situe en amont de la zone conductrice à l'est du bassin. Il en est de même pour les trous 1 et 2 qui sont des sortes de puits perdus dans lesquels la nappe affleure à moins de 2 m du niveau du sol.

Sans donner un sens clair aux mesures, ces observations de terrains ont fourni des éléments d'interprétation préliminaire qui se résument en une certitude et une hypothèse forte:

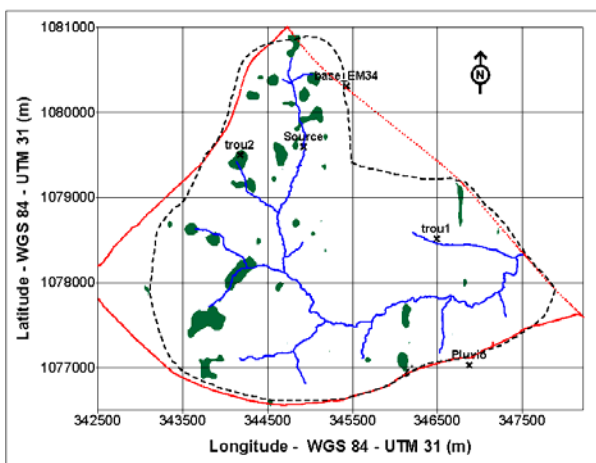
- Les faibles valeurs de conductivité correspondent aux zones de socle affleurant ou sub-affleurant et dans une certaine mesure à celles présentant un recouvrement cuirassé.
- Les fortes conductivités révèlent la présence éventuelle de nappes ou de terrains de saturation assez importante.

Le cas des zones de conductivités intermédiaires quant à lui reste entier. Aucun indicateur particulier sur le terrain ne semble être en rapport avec celles-ci. Elles correspondent à des états de surface et des unités topographiques très variables et portent un couvert végétal tout aussi diversifié. Il n'a pas été non plus possible de trouver une relation possible avec les pratiques culturales (mil, maïs ou tubercules).

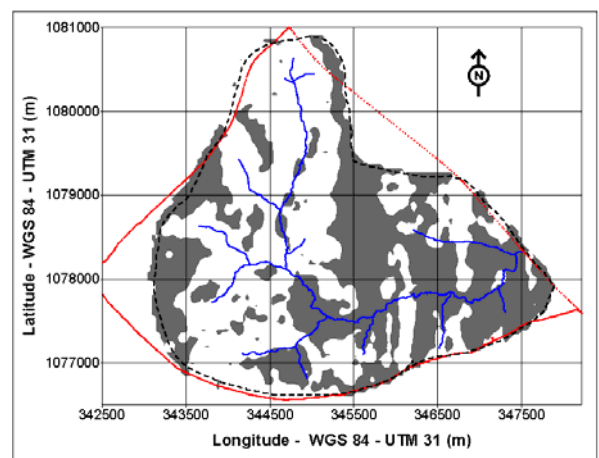
Pour améliorer l'interprétation et donner un sens réel aux mesures EM 34, nous avons eu recours aux autres méthodes dont nous disposions à savoir les méthodes électriques.



Carte 16 : Distribution en isovaleurs des conductivités EM34 (VCP 20 m) sur le bassin versant D'Ara.



Carte 17 : Bassin versant d'Ara. Organisation des zones conductrices.



Carte 18 : Bassin versant d'Ara. Organisation des zones résistantes

2. Prospections électriques : contribution à l'interprétation géologique du milieu

2.1. Les panneaux électriques

2.1.1. Résultats et interprétations

- *Le panneau électrique P1*

Ce panneau a été réalisé au nord du bassin versant, à la latitude 1079460 m. Il est orienté ouest-est et s'étend de la longitude 343575 m à la longitude 345565 m soit une distance totale de 1790 m. Autre aspect remarquable, il ne traverse aucune parcelle de cultures. L'analyse des résultats de ce panneau (voir figure 22, page 37) fait ressortir les constats suivants :

- Tout au long du profil on remarque la présence de couches superficielles résistantes (entre 1000 et 5000 Ohm.m) qui s'organisent en zones continues ou isolées. Ces couches qui sont en générale de faible épaisseur (entre 1 et 3 m) atteignent 12 m au niveau de la distance 704 m. Les observations qui ont été faites le long du profil montrent que ces couches correspondent à des recouvrements cuirassés. De plus, les mesures isolées sur blocs de cuirasses ont donné une gamme de résistivités comprise entre 1500 et 4000 Ohm.m ce qui renforce davantage notre conviction.
- Aux extrémités est et ouest, il apparaît deux couches résistantes qui s'enracinent profondément. Celle à l'est, de résistivité pratiquement hors gamme (les résistivités calculées atteignent 50.000 Ohm.m) témoigne d'une structure massive peu altérée et probablement 'sèche'. Elle correspond en réalité à l'affleurement majeur de quartzites. Quant à celle de l'extrême ouest dont la forme rappelle celle d'un diapir, sa résistivité nous fait penser à de la cuirasse épaisse. Quelques doutes subsistaient quant à l'existence de formations cuirassées d'une telle épaisseur, mais l'observation des parois du puits de Babayaka situé à 500 m au sud-ouest, montre bien une épaisseur de cuirasse supérieure à 10 m.
- De 128 à 448 m, on note l'affleurement d'une couche conductrice de résistivité voisine de 25 Ohm.m. Le repérage à côté d'un trou villageois dans lequel la nappe affleure à moins d'un mètre montre qu'il s'agit d'une couche argileuse saturée. Ces mêmes types de couches se retrouvent tout le long du profil en bancs isolés plus ou moins épais parfois sub-affleurants ou situés en dessous des revêtements cuirassés. Leur organisation semble suivre l'allure de la pente topographique qui converge naturellement vers la ravine.
- Entre les poches conductrices et dans les zones de profondeurs comprises entre 10 et 20 m apparaissent des couches de résistivités comprises entre 100 et 300 Ohm.m. Dans cette gamme de résistés plusieurs d'hypothèses sont envisageables : Argiles faiblement saturées, terrains limono-sableux ou sableux avec des taux d'imbibition variables. A l'observation

des profils pédologiques mis à jour par le ravinement que nous avons rencontré, on peut déduire de nature de ces couches. Dans le bassin, nous avons pu constater que les altérites en dessous de cuirasses était constituées en général d'un horizon gravillonnaire plus ou moins argilisé suivi d'un horizon plus nettement argileux. En l'absence des cuirasses, l'horizon gravillonnaire est remplacé selon le cas par un horizon limono-sableux ou limono-argileux. A ce niveau encore, des mesures ciblées ont permis d'approcher la résistivité de chaque horizon. Elle est comprise entre 300 et 600 Ohm.m pour les horizons gravillonnaires, entre 60 et 150 Ohm.m pour les horizons argileux et entre 70 et 200 Ohm.m pour les horizons limono-sableux. En somme, les couches indiquées sur l'image électrique regroupent bien des altérites de natures diverses et certainement de degrés de saturation également variables.

- Enfin en profondeur au alentour de 20 m, des ondulations de terrains résistants apparaissent. Même si l'interprétation 2D peut être erroné à cette profondeur, l'hypothèse de pointements du socle semble la plus plausible. En introduisant d'ailleurs d'autres paramètres dans le calcul d'inversion, on remarque que les résistivités calculées au niveau de ces couches dépassent 10.000 Ohm.m. En ce qui concerne les ondulations observées (qui affectent aussi les couches supérieures immédiates), nous ne disposons pas pour l'instant d'une explication géophysique mais plutôt d'hypothèses à vérifier plus tard : limites de bancs, affaissements préférentiels liés à la tectonique.

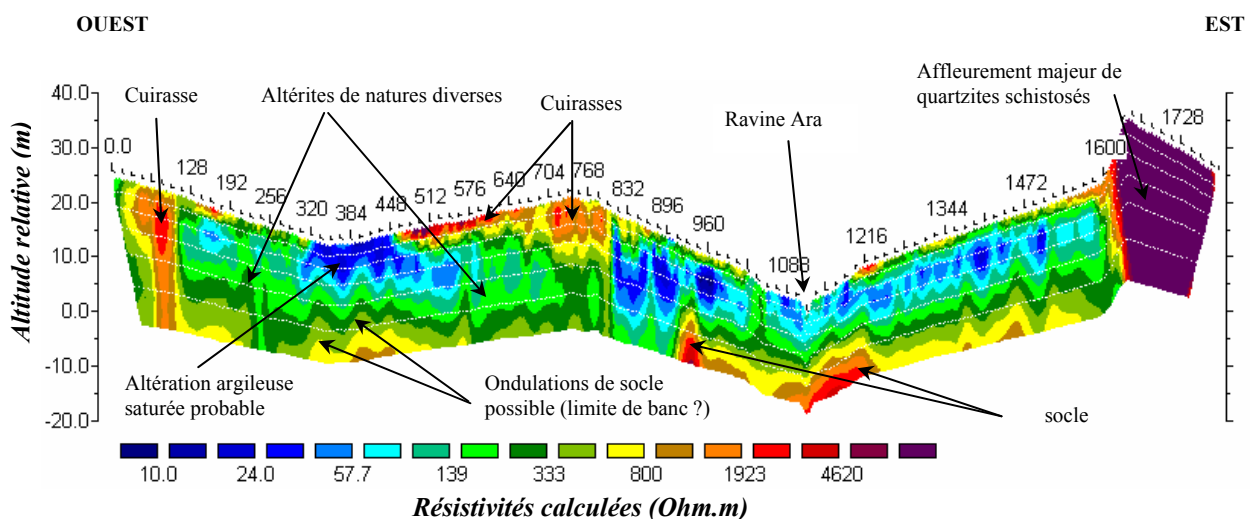


Figure 22 : *Electrique 2D en Wenner a. Résultats de l'inversion et interprétation de la distribution des résistivités du profil de reconnaissance P1.*

• *Le panneau électrique P2*

Il a été réalisé dans la partie est du bassin versant qui est une zone un peu plus anthropisée. D'une longueur et d'une profondeur d'investigation similaire à la précédente (environ 25 m) il est cependant orienté nord-sud. Il va du village de Nalohou II au nord à celui de Nalohou I au sud. Si du point de vue de l'organisation des conductivités observées sur la carte EM 34 son orientation n'est pas pertinente, c'est parce que sa mise en œuvre avait pour objectif principale la détection d'un éventuel accident de terrain au niveau de la ravine principale. Il s'agissait également de vérifier l'identité d'organisation des terrains dans les parties ouest et est du bassin.

L'inversion des données de ce panneau est basée sur l'utilisation des mêmes paramètres que le précédent (il s'agit du même type de protocole de mesure à savoir le Wenner α). Il peut de ce fait être interprété de la même manière d'autant qu'il présente des gammes et des distributions de résistivités pratiquement similaires (voir figure 23 ci-dessous). On peut remarquer en effet :

- La présence en surface de terrains résistants peu épais, qui correspondent à l'observation à des cuirasses de degrés d'altération variables,
- L'apparition sous les cuirasses de grandes couches conductrices qui s'étendent quasiment le long du profil. La nature de ces couches ne laisse pas de doute car une fois de plus, nous avons repéré aux environs de la distance 448 m, et à une dizaine de mètres à l'ouest du profil, un trou villageois avec un niveau de nappe inférieur à 2 m.

Ce panneau a cependant apporté deux informations majeures : l'absence d'un accident de terrain (du moins qui se traduit par un contraste de résistivités) au niveau de la ravine, et la plus grande proximité du substratum (autour de 15 m) comparé à ce qui a été observé au niveau du panneau P1.

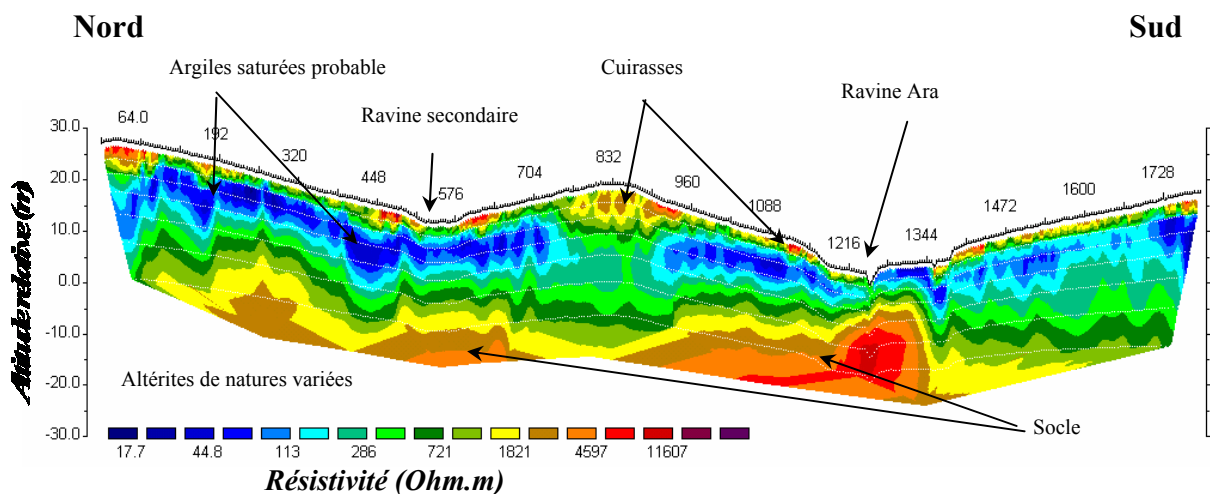


Figure 23 : *Électrique 2D en Wenner α . Résultats de l'inversion et interprétation de la distribution des résistivités du profil de reconnaissance P2.*

2.1.2. Conclusion à l'étude des panneaux

L'approche en coupe électrique 2D fournit les premiers clefs de compréhension de l'organisation du bassin et ce, à plusieurs titres.

Le premier intérêt de ces panneaux réside dans leur capacité à traduire plus clairement la structure des terrains prospectés. Pour simplifier leur lecture nous les avons repris sous forme de coupes schématiques qui résument les interprétations qui y ont été consacrées. A travers celles-ci on peut déjà relever des aspects importants de l'organisation du milieu qui constitueraient des réponses à certaines interrogations émises au début :

- Du point de vu de l'organisation superficielle, on remarque que les cuirasses occupent une place très importante même si leur présence n'est pas toujours directement transcrite en EM 34. Elles constituent généralement des couches peu épaisses de résistivités variables qui traduisent les différences de niveau de dégradation dans lesquelles elles se trouvent (forte résistivité pour les cuirasses en blocs massifs, et faible résistivité pour celles très altérées au point de s'assimiler à de simples horizons gravillonnaires). Enfin, il faut croire que ces cuirasses présentent une certaine perméabilité dans la mesure ou la plupart d'entre elles se situent au dessus d'une zone de nappe. Même si les zones à cuirasses épaisses qui ont été observées sur ces deux profils semblent indiquer des cas d'imperméabilité, il ne s'agit peut-être pas d'une généralité et l'exemple du puits de Babayaka qui est creusé dans la cuirasse le rappelle.
- Les nappes détectées se résument exclusivement à des nappes d'altérites superficielles qui sont de tailles, de formes et d'épaisseurs variables. Elles se situent à des profondeurs variant entre 0 m au niveau des zones d'affleurement et 7 m. Tel qu'il apparaît dans l'image électrique, les flux d'eaux dans ces nappes ne semblent pas se faire en direction du substratum mais plutôt vers les zones topographiquement bas telles les ravines.
- Enfin, la grande différence entre ces deux panneaux se situe au niveau de la profondeur du socle. Celui-ci est en effet nettement plus proche de la surface du sol sur le panneau P2 que P1.

Le second aspect important de la contribution des panneaux concerne la traduction en équivalence terrain de la mesure EM. Classiquement en EM 34, l'équivalence pour les couches résistantes superficielles porte sur l'épaisseur et elle porte sur la résistivité pour les couches conductrices (pour les raisons de réponse de l'instrument évoquées dans la partie matériel portant sur l'EM 34).

L'avantage des coupes schématiques synthétiques issues de l'interprétation des panneaux, est qu'elles permettent de traduire désormais les anomalies de la carte EM en équivalent nature réelle de terrain et donc de passer d'une organisation de conductivité à une réalité géologique.

Pour ce faire, nous avons identifié à partir du couplage entre les schémas et les mesures EM correspondantes, les grandes équivalences (voir figure 25, page 41) que nous énonçons comme suit:

- Une anomalie résistante correspond à un terrain à substratum affleurant (cas 8) ou proche (moins de 20 m) sans zone de nappe superficielle (cas 6), à une cuirasse épaisse (cas 1 et 4) ou alors à une superposition des deux.
- Une anomalie conductrice révèle la présence d'une nappe avec ou sans recouvrement cuirassé mince ou avec substratum proche ou non (cas 3 et 5).
- Une anomalie de conductivité intermédiaire traduit une succession de couches d'altérites probablement peu saturées, de natures variables mais d'épaisseur importante (cas 2).

En faisant fi des équivalences intermédiaires qui sont nombreuses et qui ont été classées par défaut dans l'un des trois groupes précédemment définis (cas 7, par exemple), il reste encore à admettre que les panneaux électriques ne répondent pas à tous les besoins d'interprétation et certaines questions restent entières :

- Puisqu'à priori un problème se pose dans la distinction (par le système d'équivalences) entre anomalies liées à un substratum proche et celles dues à de la cuirasse épaisse, quelle est alors la part des deux ?
- Les deux panneaux réalisés n'ont révélé aucun accident de terrain. Quelle explication donner à ces zones conductrices linéaires situées dans la partie est du bassin ?
- Le système de nappe déconnecté du substratum tel que le montre les panneaux, constitue-t-il le modèle unique sur le site ?

Pour répondre à ces interrogations, nous avons réalisé des sondages électriques ponctuelles dans les zones concernées.

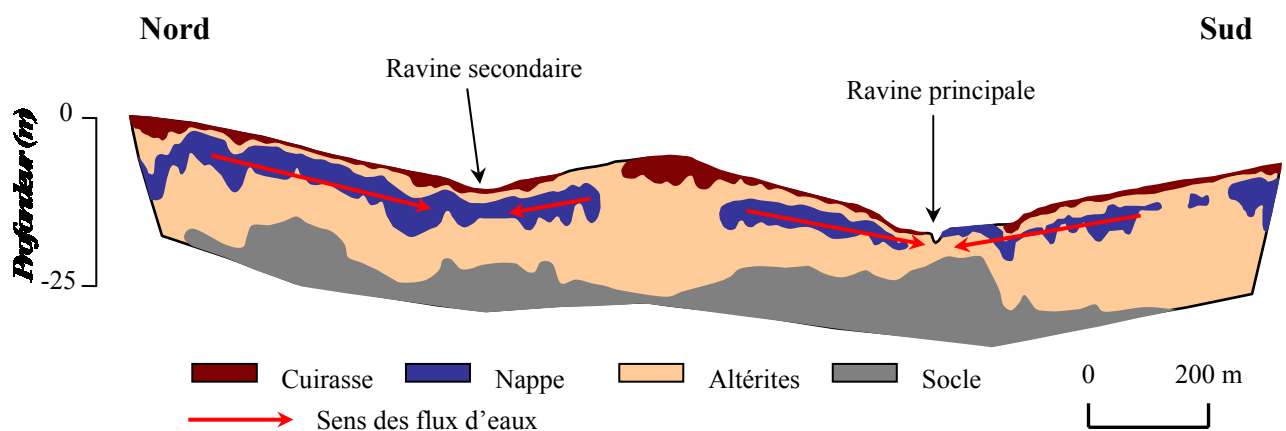


Figure 24 : Coupe géologique schématique du profil P2.

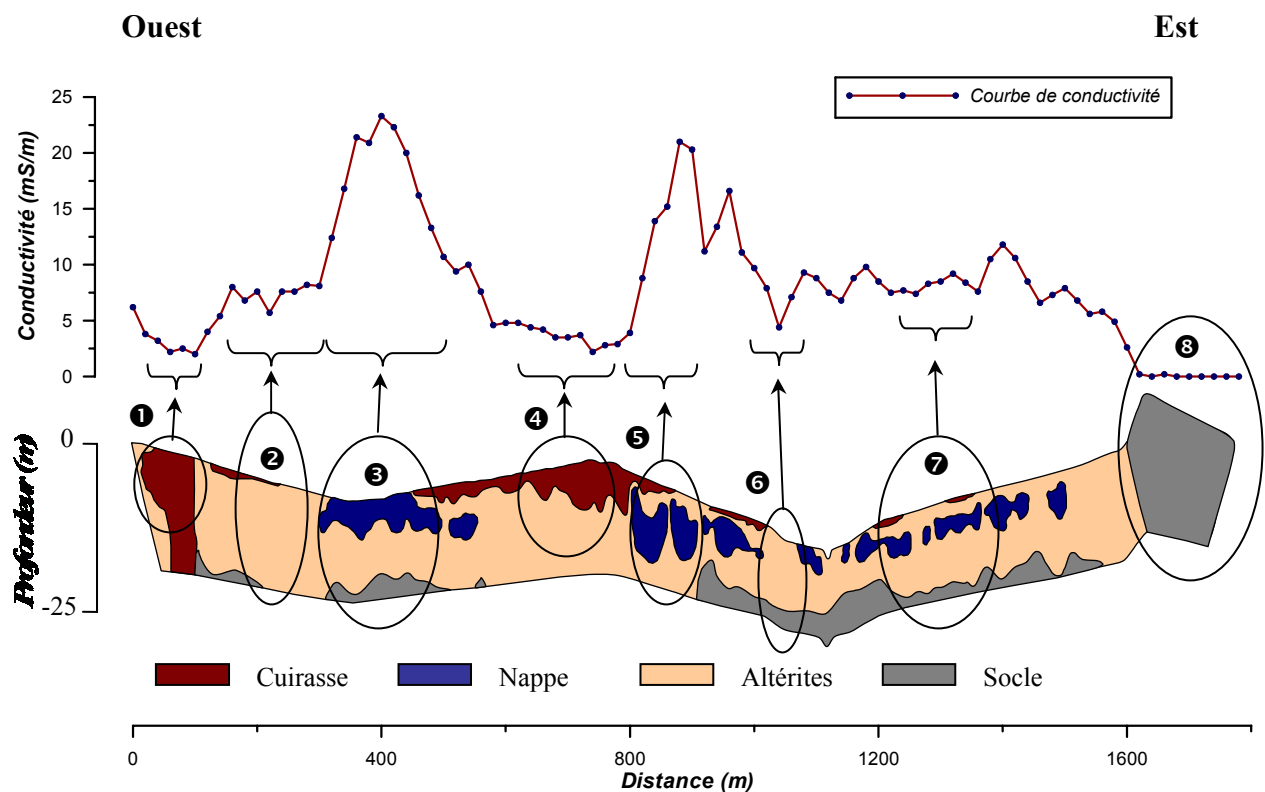


Figure 25 : Relations entre conductivités EM 34 et structures de terrain.

2.2. Les sondages électriques

2.2.1. Sondages en zones résistantes

Ils ont porté sur deux grandes zones. La première à ouest, est constituée d'une grande anomalie qui s'étant du nord au sud et de quelques unes nettement plus petites et dispersées. La seconde à l'est, est représentée par une anomalie résistante qui occupe l'extrême est du bassin et qui est recoupée à deux endroits par des ravines.

Dans la première zone, il s'agissait de déterminer la cause des anomalies en se focalisant sur trois hypothèses : la présence d'une cuirasse épaisse, la proximité du substratum ou alors une combinaison des deux. Pour cela quatre sondages ont été réalisés sur la grande anomalie de l'extrême ouest en suivant l'axe d'orientation de celui-ci. Les petites anomalies quant à elles ont fait l'objet chacune d'un sondage unique.

L'ensemble des sondages réalisés ont révélé une complexité d'organisation des anomalies au niveau spatiale (voir localisation et résultats de tous les sondages à partir de l'annexe 5, page 59).

Sur la grande anomalie, les résultats du sondage 4 (point de situé au nord) montrent une succession des quatre couches. Les deux premières couches superficielles qui présentent des résistivités de 1400 et 2200 Ohm.m s'identifient à de la cuirasse. Prises ensemble elles ont une épaisseur de 10 m et reposent sur une couche d'altérites très épaisse (30 m). Au point de sondage 3

à 500 m plus au sud, la couche de cuirasse disparaît et fait place à une altérite composite de résistivités variant entre 650 Ohm.m en surface et 450 Ohm.m en profondeur. Le substratum qui est proche de la surface du sol se trouve seulement à 6 m. Enfin, à l'extrême sud, au niveau du sondage 1, on note l'apparition de la couche cuirassée épaisse de 4 m, mais recouverte cette fois-ci par une couche de 964 Ohm.m de résistivité, et d'épaisseur équivalente. L'état de surface gravillonnaire que l'on retrouve sur place indique qu'elle pourrait correspondre à la partie superficielle altérée de la cuirasse sous-jacente. Le substratum qui est situé ici à 37 m est précédé d'une couche d'altérites d'une résistivité de 145 Ohm.m sur une épaisseur de 28 m.

Cette variabilité spatiale observée, concerne également les petites anomalies isolées. Le sondage 5 a mis en évidence la présence d'une cuirasse épaisse de 12 m environ avec une profondeur de substratum à plus de 35 m. La partie centrale de la cuirasse, contrairement aux autres modèles qui présentent un noyau très résistant, est altérée sur environ 2 m (cf. Figure 26, page 43). Au sondage 6, la cuirasse est inexistante et le substratum se retrouve à 15 m de profondeur.

Sur la base de ces résultats, il est certain que la cause des anomalies dans cette zone, même pour les celles grandes et à première vue homogènes, n'est pas unique. Cependant, moins que la proximité du substratum, ce sont les affleurements de cuirasses qui par leur dispersion et leurs différences d'épaisseur qui introduisent cette variabilité.

Dans la seconde zone à l'est, l'observation des parties de l'anomalie tronquée par les ravines montre des affleurements de schistes et gneiss. Lors de la prospection EM 34, les mesures relevées à ces endroits montraient des conductivités de l'ordre de 0,1 mS/m. En l'absence de formations superficielles cuirassées, nous avons déduit que l'unique cause de l'anomalie en ces points précis provenait de ces affleurements de socle. Dès lors, il s'est agit de vérifier que la cause de l'anomalie restait la même dans toute sa zone d'extension.

Les sondages qui ont été mis en œuvre (à l'exemple du sondage 23 sur la figure 27, page 43) ont confirmé la proximité de la roche au niveau de tous les points prospectés avec cependant des contrastes parfois assez marqués. Au point de sondage 26 au nord, le substratum se trouve à une profondeur de 10 m, précédé d'une couche d'altérite et d'un recouvrement superficiel cuirassé de 1,7 m. A l'extrême sud (point de sondage 24), la roche est encore plus proche et se situe à 6 m de profondeur. L'épaisseur de la cuirasse est également de l'ordre du mètre. Elle repose sur une altérite assez résistante qui pourrait correspondre à une horizon gravillonnaire issu de l'altération de la cuirasse ou à la partie superficielle du substratum rocheux.

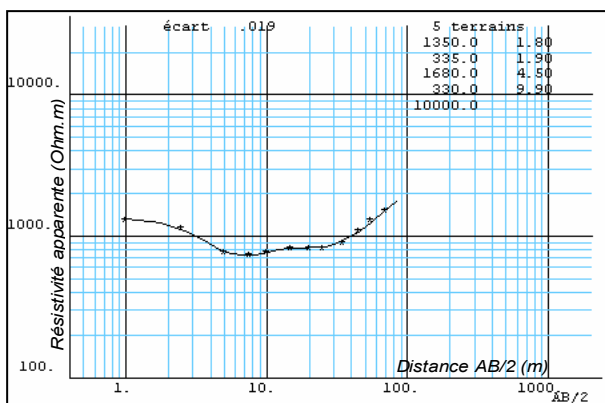


Figure 26 : Sondage 5, zone ouest. Allure de courbe de sondage sur terrain à cuirasse superficielle épaisse.

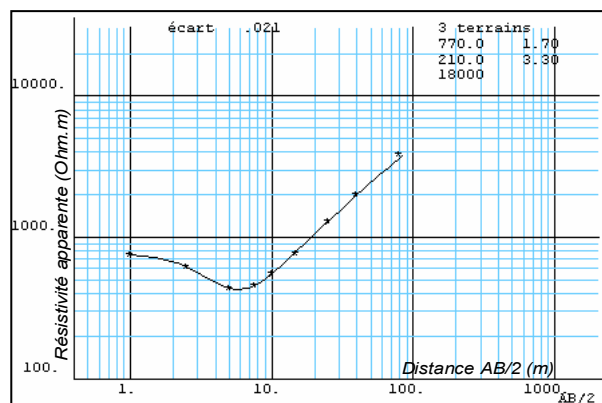


Figure 27 : Sondage 23, zone est. Allure de courbe de sondage sur terrain à substratum proche.

2.2.2. Sondages en zones conductrices

La mise en oeuvre des sondages dans les zones conductrices visait deux objectifs. Il s'agissait de vérifier au niveau des anomalies isolées à l'ouest du bassin, la conformité de la géométrie des nappes par rapport à celles observée à travers l'imagerie électrique 2 D, et de trouver une explication aux zones conductrices linéaires situées à l'est et au sud.

Au niveau des anomalies à ouest, les résultats révèlent l'existence de deux situations :

- Les sondages réalisés au centre des anomalies montrent que les nappes restent confinées dans les altérites tel que déjà observé sur les panneaux électriques. La succession des terrains reste d'ailleurs presque la même avec généralement en surface des cuirasses d'épaisseur de moins de 2 m suivies d'une couche d'altérites épaisses et du socle que l'on retrouve autour de 20 m (cf. Figure 28, page 44). Dans certains cas on distingue clairement les variations de résistivités qu'offre la zone de nappe avec des baisses de résistivités pouvant aller de 30 à 3 Ohm.m.
- Dans les zones d'affleurement de la nappe par contre, les couches saturées sont minces et en contact direct avec la roche qui situe entre 3 et 6 m (cf. Figure 29, page 44). La raison de cette proximité n'est pas liée à des pointements particulièrement accentués de la roche, mais plutôt aux niveaux topographiques qui sont bas à ces endroits.

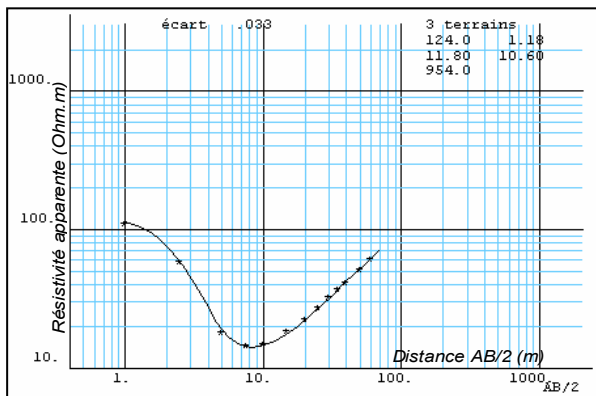


Figure 28 : Sondage 10. Mesures au centre d'une anomalie conductrice.

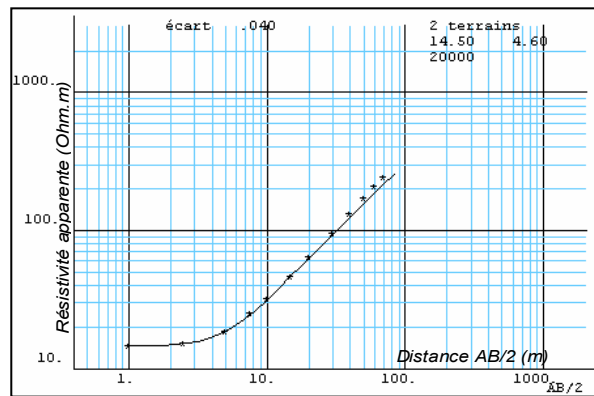


Figure 29 : Sondage 15. Mesures en zone d'affleurement de nappe.

Dans les zones conductrices linéaires à l'est et au sud du bassin, les sondages préliminaires qui y ont été réalisés ont montré que contrairement à ce qui pouvait être supposé, ces zones ne se caractérisent pas par une épaisseur d'altération importante. En effet, qu'il s'agisse de l'anomalie du sud ou de l'est, la couche d'altérites ne dépasse pas 18 m.

Pour comprendre l'organisation des terrains juste à proximité, une série de cinq sondages supplémentaires ont été réalisés le long d'un profil de 500 m qui recoupe obliquement l'anomalie du sud. Les résultats de ces sondages qui ont été complétés par des observations de terrains sont illustrés sur la figure 30.

On remarque que l'anomalie conductrice qui est une zone de nappe, est prise entre deux formations géologiques : des gneiss au sud-ouest, et un filon de quartz au nord-est. Sur le terrain, ces deux formations donnent des affleurements linéaires orientés nord-sud ce qui explique la forme et l'orientation de la zone de nappe. Sur la figure 30, nous avons limité cette nappe dans la zone d'altération pour être en conformité avec les données de sondages. Cependant, connaissant le niveau de fracturation des micaschistes sur le site, il est fort probable que l'extension de la nappe se fasse dans la roche.

La question à laquelle les sondages ne permettent pas de répondre reste celui du contact entre la formation de micaschistes et celle de gneiss. Au vu de nos résultats, aucun élément ne permet de dire si ce contact est diffus ou au contraire franc ou marqué par un accident quelconque (fracture, faille).

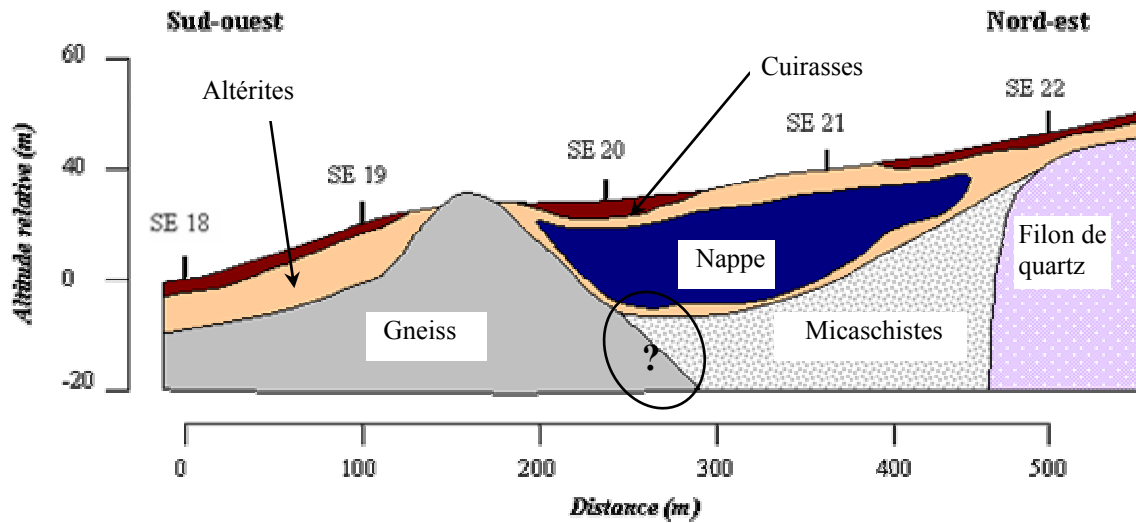


Figure 30 : Coupe géologique schématique de l'anomalie conductrice linéaire au sud du bassin versant.

2.3. Conclusion sur l'apport des sondages électriques

D'une manière générale, la mise en œuvre des sondages a permis l'obtention d'informations supplémentaires qui ont contribué à affiner l'interprétation des mesures EM 34. Seulement, dans ce bassin qui se caractérise par des terrains très variables, il se pose souvent le problème de leur représentativité par rapport aux milieux à proximité immédiate. Dans ces conditions, trouver des relations entre une série de sondages s'avère difficile, à moins de procéder par distances très rapprochées entre sondages. Une autre insuffisance de cette étude réside dans le manque de données topographiques fiables. Aussi, il nous est impossible de proposer au stade actuelle de nos connaissances, un système d'organisation générale des formations cuirassées ou du socle.

1. A propos de la méthodologie

L'expérience que nous avons acquis sur le terrain nous permet de faire la synthèse des problèmes et insuffisances méthodologiques et de proposer quelques recommandations pour des prospections du même type à venir.

1.1. Prospection EM 34

Les recommandations concernant la prospection EM34 portent essentiellement sur le choix des paramètres de cartographie et du système de positionnement.

- *Choix de la base*

Pour des raisons de contraintes de terrain, nous avons choisi d'établir notre base de contrôle de l'EM 34 sur un terrain résistant. Il serait pertinent à l'avenir de choisir une base plutôt conductrice. Cela permettra de mieux apprécier les éventuelles dérives de l'appareillage et apporter si nécessaire une meilleure correction aux données. Nous rappelons cependant que ce choix est surtout valable pour les prospections en saison sèche car l'intervention d'une forte pluie pourrait rendre une base conductrice désormais instable.

- *Configuration de l'appareil*

La configuration VCP qui a été utilisée semble la mieux adaptée pour l'exploration dans cette zone compte tenu du relief et du couvert végétal assez important. On pourra choisir les écartements de bobines entre 10 et 20 m, celui en 40 m nous paraissant assez difficile d'utilisation (à cause de la végétation notamment). Le seul problème de cette configuration est la nature un peu plus bruitée des mesures par rapport à celle HCP.

- *Choix des paramètres de cartographie*

A partir des essais qui ont été réalisés sur le terrain, nous estimons le seuil maximum de cartographie du bassin et probablement dans toute la zone, à un maillage de 100 m entre profils et un pas de mesure de 40 m. Ce seuil a été jugé optimum pour fournir un bon rapport résultats, temps de prospection (0.7 km² par jour avec un peu de dynamisme pour des opérateurs aguerris).

Pour donner une idée des temps de prospection, il faut savoir qu'une réduction du pas de mesure de moitié augmente le temps de travail d'à peu près 1/4 et que l'ajout d'un profil supplémentaire double celui-ci (voir détails illustrés en page 51). En outre, vu l'orientation des structures sur la carte géologique de la zone, la prospection se fera préférentiellement est-ouest (ou inversement) et non nord-sud.

- *Système de positionnement*

L'une des insuffisances de la carte de conductivités que nous avons présenté réside dans l'imprécision de la position des points qui y figurent (nous rappelons que l'erreur de positionnement avec le GPS GARMIN 12 était de 10 m en latitude et 13 m en longitude). A l'échelle de notre carte cela peut paraître peu important mais pour une étude de détails l'utilisation d'un système beaucoup plus précis (en longitude, latitude et altitude) se révélera nécessaire. Il permettra en outre de disposer d'une meilleure carte topographique de la zone prospectée.

1.2. Prospections électriques

- *Panneaux électriques*

Pour l'acquisition de l'imagerie électrique 2D du terrain, nous avons mis en œuvre une méthode de prospection rapide (Wenner Alpha) permettant de couvrir de grandes distances au détriment par exemple de la profondeur d'investigation. Il s'agit là cependant d'un choix circonstanciel lié au besoin de disposer des premières données de terrain et à la restriction du temps de prospection. Ce procédé qui était incontournable a également montré ses limites. D'où la nécessité de changer de dispositifs et de protocoles de mesures dans le cas de recherches plus ciblées.

- *Sondages électriques*

Malgré les problèmes de mesures qui ont été rencontrés sur le terrain (effets 2D, effets des pendages de couches), les sondages électriques se sont révélés un moyen indispensable et pratique pour discriminer les anomalies liés au cuirassement. Compte tenu de la simplicité de sa mise en œuvre nous le recommandons pour les premières vérifications des cas d'anomalies suspectes qui se présenteraient en prospection EM 34 par exemple.

2. A propos des questions initialement posées

Nous reprenons ici la synthèse de nos résultats sous forme de réponses par point au regard de la problématique initialement posée.

- ***Quelle est la géométrie du socle ?***

Elle est suffisamment complexe pour que nous puissions donner toute de suite des aspects claires de sa géométrie à partir des méthodes que nous avons utilisées. En imagerie électrique 2D, nous avons utilisé un protocole de mesures rapides dont les résultats à l'inversion nous donnent une image des 25 à 30 premiers mètres du sous-sol. A cette profondeur d'investigation, nous n'avons pu observer que les pointements de la roche, ce qui est insuffisant pour ébaucher une explication sur l'organisation du socle, ou sur l'existence d'une éventuelle pente générale dans le bassin. La seule information que nous pouvons en revanche confirmer, c'est sa grande proximité par rapport à la surface du sol à l'est (autour de 15 m) qu'à l'ouest (25 m voir plus) du bassin versant.

- ***Existe-t-il des accidents de terrain pouvant guider les écoulements souterrains ?***

Sur la carte de conductivité EM 34, deux zones d'anomalies conductrices semblent indiquer la présence d'accidents majeurs de terrain.

Le premier qui est situé le long de la façade est de l'affleurement majeur de quartzites est signalé sur la carte géologique de Djougou comme étant une zone de contact anormal ou de faille. Quant au second qui est situé à l'est, il part du village de Nalohou II au nord, à celui de Nalohou I au sud.

Le système de sondages électriques le long d'un profil que nous avons mis en œuvre pour essayer de caractériser le premier ne nous permet pas d'être précis mais il ne s'agirait vraisemblablement pas d'une faille mais peut-être d'une fracture. Une bonne explication pourrait être trouvée en se penchant également sur le rôle que jouent les filons de quartz sur le site.

- ***Où se situe la nappe phréatique ?***

Sur la base des observations de terrains, des résistivités mesurées ou calculées en électrique 2D et de l'inversion des données de sondages, nous sommes à même de dire qu'elles correspondent aux anomalies conductrices détectées par la prospection EM 34. Les nappes détectées sont pour la plupart des nappes d'altérites 'perchées' isolées du socle avec un sens de circulation des eaux qui ne semble pas se faire en direction du socle mais plutôt vers des points topographiquement bas en l'occurrence les ravines.

Existe-t-il des systèmes d'aquifères bicouches ? Nous ne pouvons répondre clairement à cette question. Les sondages électriques qui ont été réalisés ont montré que dans certains cas que la nappe était en contact avec le socle. Sachant que celui-ci est fortement schistosé, l'idée d'une infiltration à travers la roche nous paraît très probable même si elle n'a pas été prouvée. Dans tous les cas nous pensons que les méthodes de sondage TDEM et surtout RMP seront certainement plus performantes pour répondre à la question.

Nous rappelons également que les zones de nappes indiquées correspondent aux cas les plus simples à détecter (terrains se caractérisant par une très faible résistivité). Il n'est donc pas tout à fait exclus qu'il puisse exister ailleurs d'autres systèmes de nappe, car les résistivités mesurés s'étalent sur large gamme traduisant ainsi une grande diversité de la nature des terrains. Sans une bonne corrélation entre nature des couches, taux de saturation et mesures de résistivités, il est difficile de déceler certains terrains saturés à l'apparence résistantes.

- ***Quelles sont les zones d'altération d'épaisseur importantes ?***

Elles ressortent assez bien sur la carte EM et s'identifient aux zones que nous avons classé comme étant de conductivités intermédiaires et fortes. Cette discrimination est basée sur un cas général qui comporte cependant deux exceptions liées au jeux d'équivalences :

- Le cas des zones à recouvrement cuirassé très épais qu'on aurait tendance à assimiler à du substratum proche (conductivité également faible à la lecture EM 34) alors qu'elle peuvent bien comporté également des altérites épaisses.
- Le cas des zones aux couches superficielles très conductrices qui peuvent cacher parfois la présence d'un substratum proche.

- ***Quelles sont les zones préférentielles d'infiltration, de percolation ?***

Pour l'instant, nous ne disposons pas de réponse géophysique sur ce sujet. A priori les couches cuirassées et même le socle dans une certaine mesure, ne semble pas constituer de véritables barrières à l'infiltration. Cependant la meilleure façon de le prouver serait de procéder à un suivi temporelle. Dans notre cas, cette opération paraissait difficile à réaliser du fait de la saison de pluie déjà avancée au démarrage des prospections (il était déjà tombé 240 mm de pluie), mais également du manque d'informations suffisantes à l'interprétation éventuelle des résultats.

Ceci étant, les résultats acquis au cours de nos travaux peuvent servir de point de départ valable à un suivi qui pourrait se faire au cours de la saison sèche.

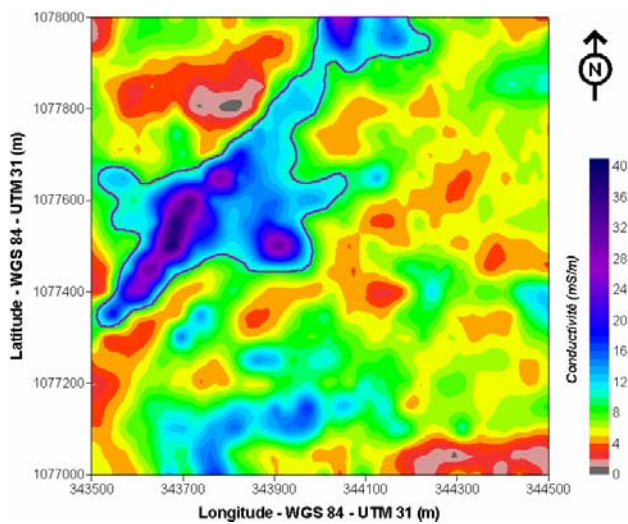
- ***Quelle est la nature des formations superficielles ?***

Les profils électriques 2D ont mis en évidence l'importance des recouvrements cuirassés dans le bassin versant. La méthode EM 34 ne permet cependant que leur reconnaissance partielle (cas des cuirasses épaisses). Il sera possible néanmoins de faire une carte de ces affleurements mais difficilement en EM 34 pour deux raisons : la mesure n'est pas discriminatoire (il faut passer par des modélisations), et la faible épaisseur des cuirasses exige une distance nettement plus réduite entre les bobines (moins de 10 m), ce qui relève plutôt du domaine de l'EM 31 ou de l'EM 38.

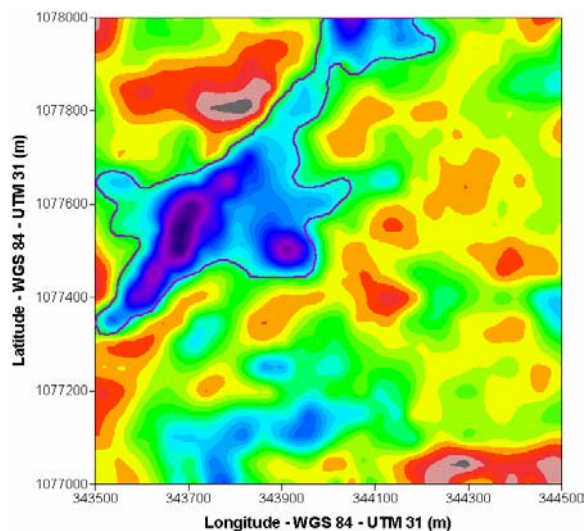
Pour les autres états de surface, nous savons qu'ils sont en majorité limono-sableux, mais l'état de la couverture végétal à un stade assez avancé de la saison des pluies, empêche tout essai de nomenclature ou de délimitation correcte.

- ***Quel est leur comportement hydrogéologique (perméabilité, etc.) ?***

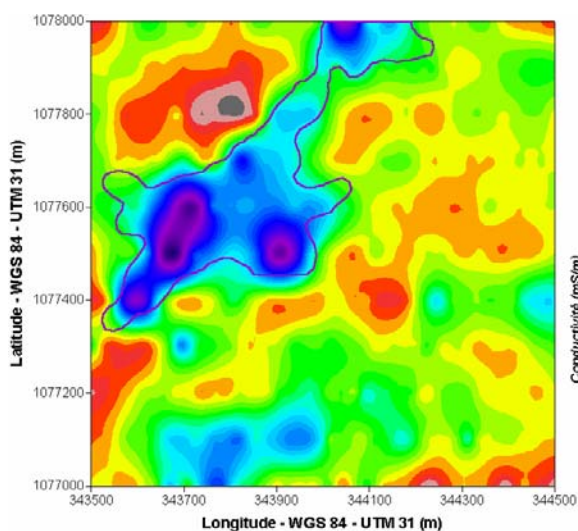
Les premières réponses à cette question viendront sans doute avec la réussite d'un suivi temporel. L'avis d'un pédologue sur le rôle des cuirasses ainsi que celui d'un hydrogéologue sur le comportement hydrogéologique des socles schistosés seront également d'un grand apport. Enfin, des mesures RMP pourraient évaluer la perméabilité hydraulique et la transmissivité des formations en présence.



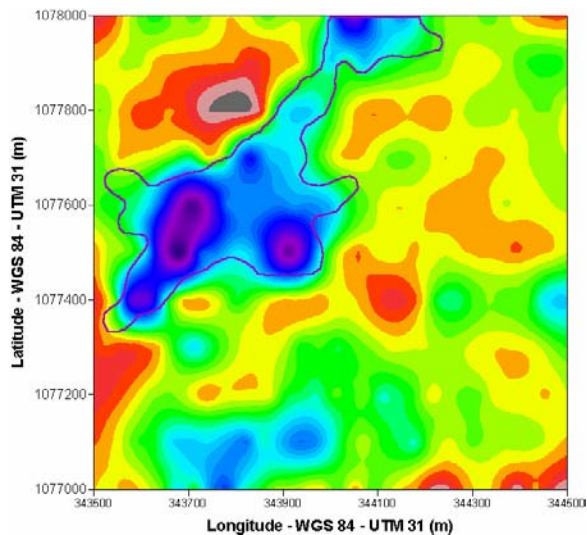
*Distance entre profils : 50 m
 Pas de mesure : 20 m
 Temps de prospection : 4 jours*



*Distance entre profils : 50 m
 Pas de mesure : 40 m
 Temps de prospection : 3 jours*



*Distance entre profils : 100 m
 Pas de mesure : 20 m
 Temps de prospection : 2 jours*



*Distance entre profils : 100 m
 Pas de mesure : 40 m
 Temps de prospection : 1 jour et demi*

Figure 31 : Estimation du temps de prospection en EM 34 d'un km² en fonction du maillage de cartographie et pour la configuration VCP 20 m.

CONCLUSION GENERALE

D'un point de vue géophysique, le bassin versant d'Ara se révèle très intéressant par sa complexité d'organisation aussi bien au plan géologique que pédologique. Les prospections qui y ont été menés montrent en outre qu'il se prête assez bien à l'utilisation des méthodes électriques et électromagnétiques.

Sur l'ensemble des questions posées au début, notre étude n'apporte que des réponses partielles. Il faut cependant rappeler qu'il s'agissait d'une étude préliminaire qui s'est faite dans une certaine restriction de matériel et de temps. Malgré les insuffisances qu'elle comporte, nous pensons qu'elle a permis la définition des éléments fondamentaux nécessaire à la réussite des futures prospections. Il s'agit notamment de la connaissance des choix méthodologiques et leurs implications sur les rapports temps de travail, mais également de la nature des informations qui sont facilement accessibles par les méthodes électriques et électromagnétiques.

Enfin, elle met en évidence la réelle nécessité d'intégration à l'avenir d'une équipe pluridisciplinaire dont les avis seront sans doute d'un grand apport à une meilleure compréhension du fonctionnement du bassin.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages

BELLAIR. P, POMEROL. C, 1977 : Eléments de géologie. Collection U, pages 187 – 224.

McNEILL. J D, 1980 : Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Technical Note 6, Geonics Ltd, 15 pages.

NABIGHIAN. N M, 1989 : Electromagnetic methods in applied geophysics – theory. volume 1, Society of Exploration Geophysicists, 513 pages.

REYNOLDS. J L, 1997 : An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley and sons Ltd, pages 415 – 586.

TELFORD. W M, GELDART. P L, SHERIFF. R E, 1990 : Applied geophysics. Second edition, Cambridge University Press, pages 342 – 576.

Thèses et mémoires

AFFATON. P, 1987 : Le bassin des voltas (Afrique de l'ouest) : une marge passive du protérozoïque supérieur tectonisé au panafricain. Thèse d'état, volume 2, Université d'Aix-Marseille, pages 426 – 449.

AL – FARES. W, 2002 : Caractérisation des milieux aquifères karstiques et fracturés par différentes méthodes géophysiques. Thèse doctorat, Université Montpellier II, Sciences et techniques du Languedoc, pages 28 – 120.

CABRERA. S, 2000 : Application des méthodes géophysiques dans l'aménagement du littoral et le suivi de l'eau dans le sol. Mémoire de DESS eaux souterraines, Institut Dolomieu, pages 28 – 53.

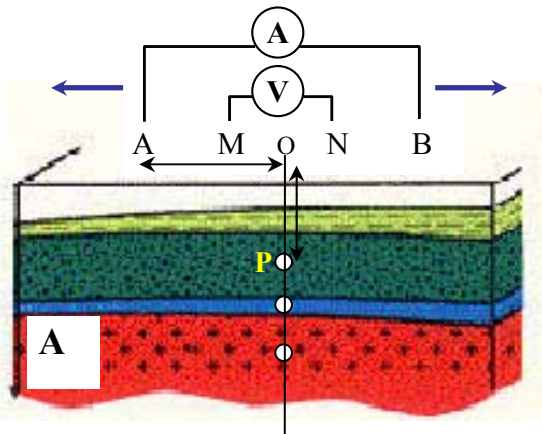
CHALIKAKIS. K, 2001 : Prospection électrique et électromagnétique appliquée à l'hydrogéologie. Mémoire DESS géophysique appliquée, Université Paris VI, Pages 5 – 20.

NDIAYE. T, 1991 : Mise en œuvre de méthodes géophysiques pour la prospection de graveleux latéritiques. Mémoire Ingénieur de conception, Université Cheikh Anta Diop, pages 12 – 57.

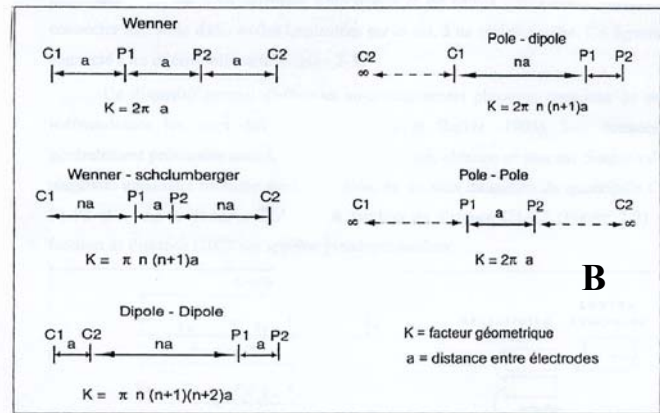
SOUDAIS. E, 2001 : Prospection géophysique sur le bassin versant de Sousson – Caractérisation des sols et des formations superficielles par une étude qui couple une prospection géophysique à des observations de surface. Mémoire DESS géophysique appliquée, Université Paris VI, pages 2 – 45.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Notions sur les dispositifs électriques et leur mise en œuvre.

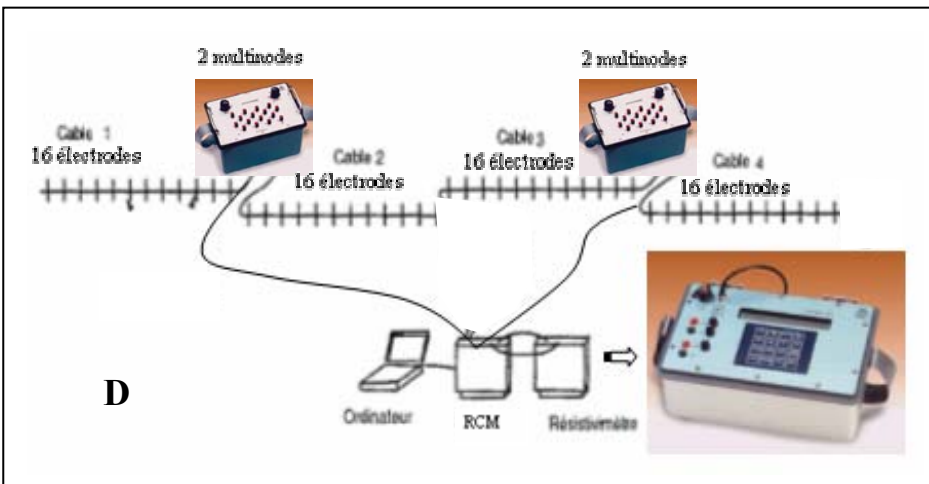
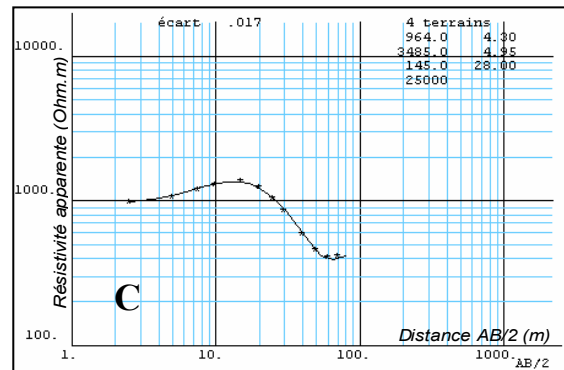


A : Dispositif de base de la mesure de résistivité électrique. Les électrodes d'injection du courant sont A et B, et les électrodes de mesure M et N. Le point P, qui est la profondeur à la quelle la mesure est faite, se trouve à une distance équivalente à AO, OM ou AB/2. En sondage Schlumberger, la mesure se fait sur un point fixe en écartant les électrodes d'injection et en respectant la règle géométrique du dispositif : $AB \geq 5 MN$.



B : Schéma des dispositifs de prospection électrique (Loke, 1997)

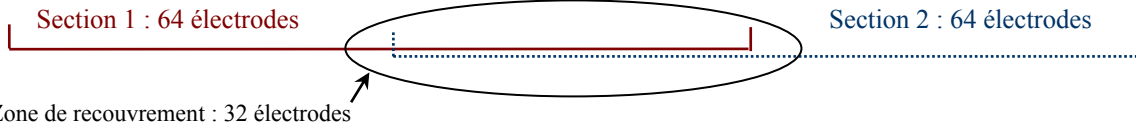
C : Interprétation d'un sondage à l'aide du programme QwseIn. Les données de sondages sont traitées en entrant dans le programme les valeurs de résistivités correspondant aux écartements AB/2. On obtient une distribution des valeurs mesurées par lesquelles on fait passer une courbe théorique en ajustant chaque fois le nombre de terrains, les résistivités ou les épaisseurs de couches.



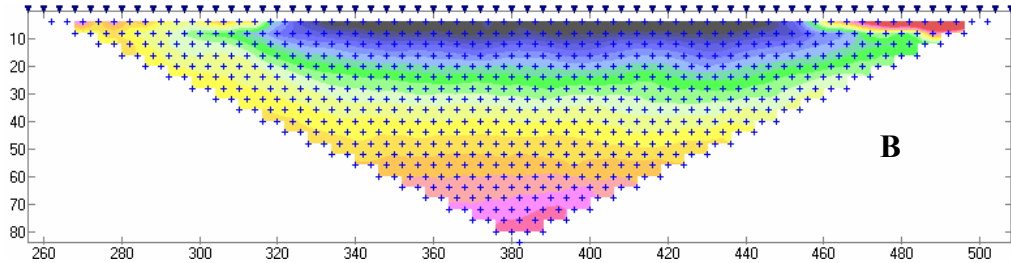
D : Dispositif multi-électrodes pour mesures de résistivités en imagerie électrique 2D. Les séries de 16 électrodes sont représentées décalées pour la commodité du dessin. En réalité elles sont mises en place sur la même ligne.

ANNEXE 2 : Notions sur le traitement des données en imagerie électrique 2D.

A

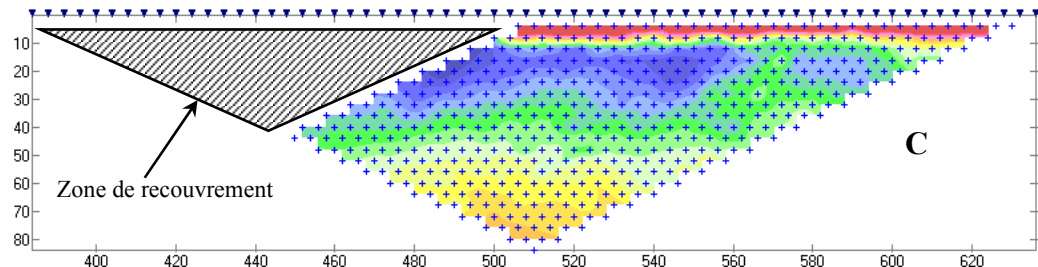
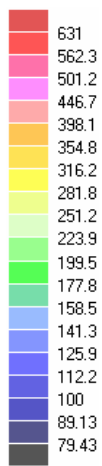


A : La mise en place du dispositif du panneau électrique se fait par section de 64 électrodes que l'on déplace le long d'un profil, en assurant à chaque fois un recouvrement de 32 électrodes sur la précédente.

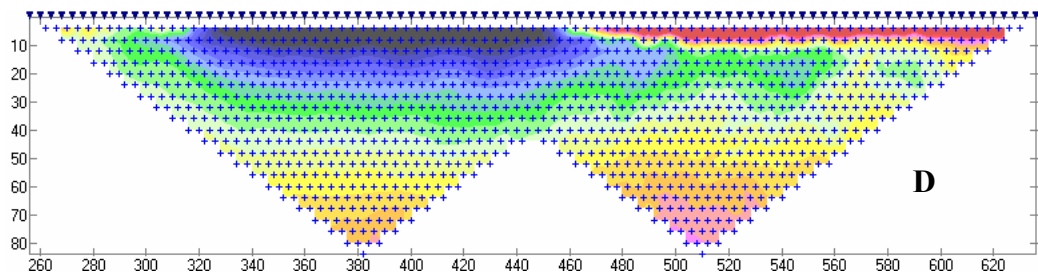


B : L'acquisition des mesures sur la première section du panneau utilise toutes les 64 électrodes. Il est possible ensuite à l'aide du programme X2IPI, de visionner la géométrie des points de la section, la distribution en fond des résistivités apparentes mesurées (voir également l'échelle des résistivités à gauche) et de traiter éventuellement les données (filtrage, suppressions).

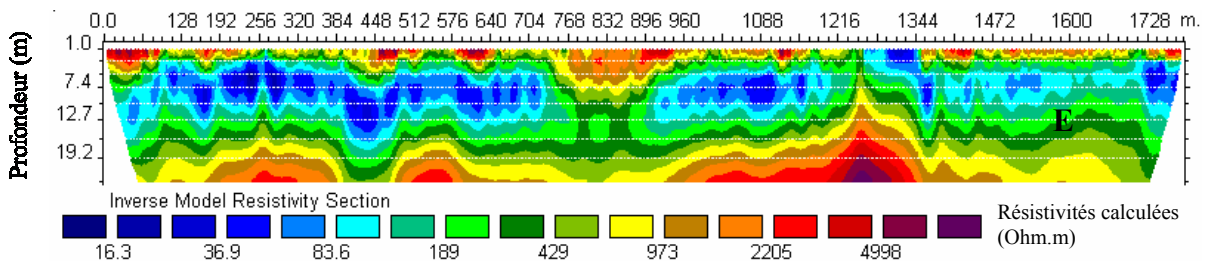
Résistivités apparentes mesurées (Ohm.m)



C : L'acquisition des mesures à partir de la deuxième section utilise 64 électrodes mais la mesure n'est pas faite dans la zone de recouvrement (cette partie existe déjà dans la première).

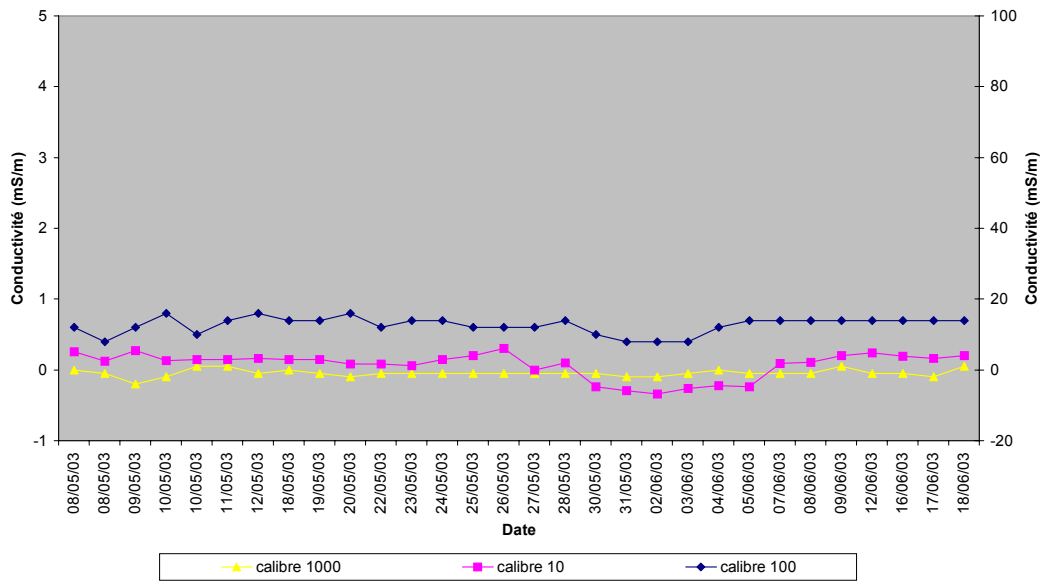


D : Sous X2IPI, les sections sont concaténées (jointes) en indiquant pour chaque section la position sur le profil (distance en m par rapport à la toute première électrode) des électrodes de début et de fin. Le jeu de données obtenu est enregistré sous format RES2DINV.

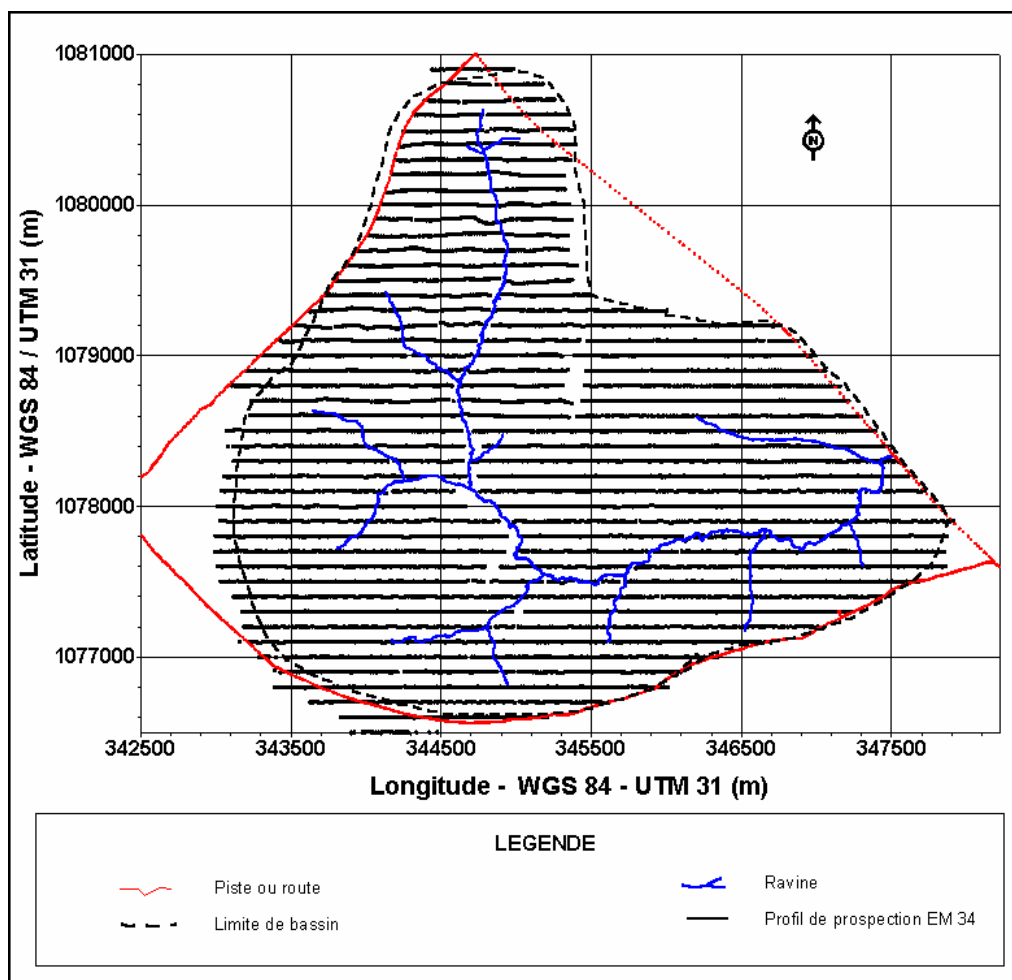


E : L'inversion à l'aide du programme RES2DINV des données du fichier précédemment obtenu, permet d'obtenir l'image d'une distribution de résistivités calculées, sensée correspondre au modèle du terrain qui a été prospecté. L'image ci-dessus est le résultat de 13 sections concaténées qui, contrairement à ce qui a été présenté dans les autres pages du document, ne contiennent pas de données topographiques.

ANNEXE 3 : Conductivités EM 34 à la base. Profils de prospection EM34 sur le bassin.

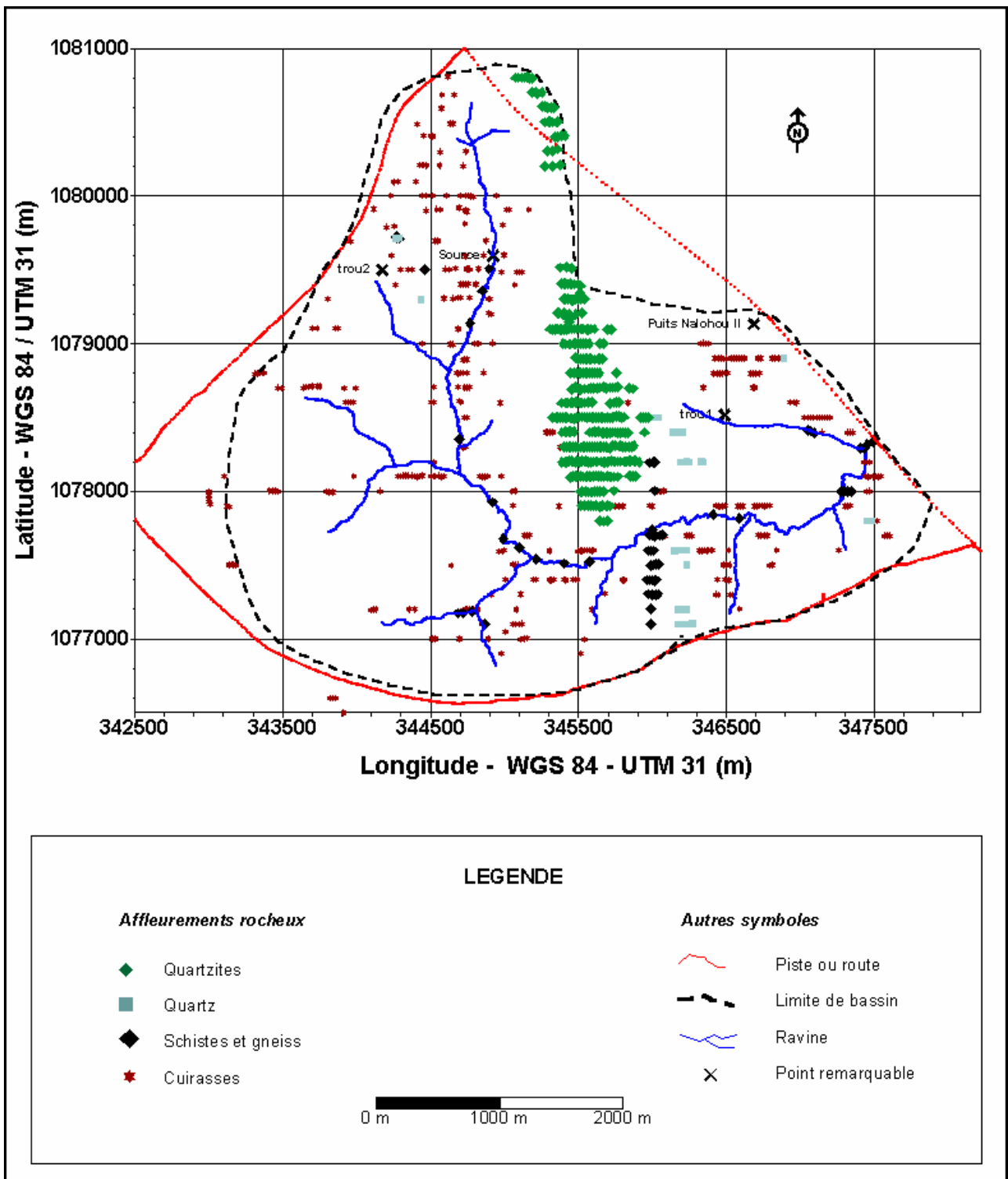


Variations journalières des conductivités EM 34 à la base.



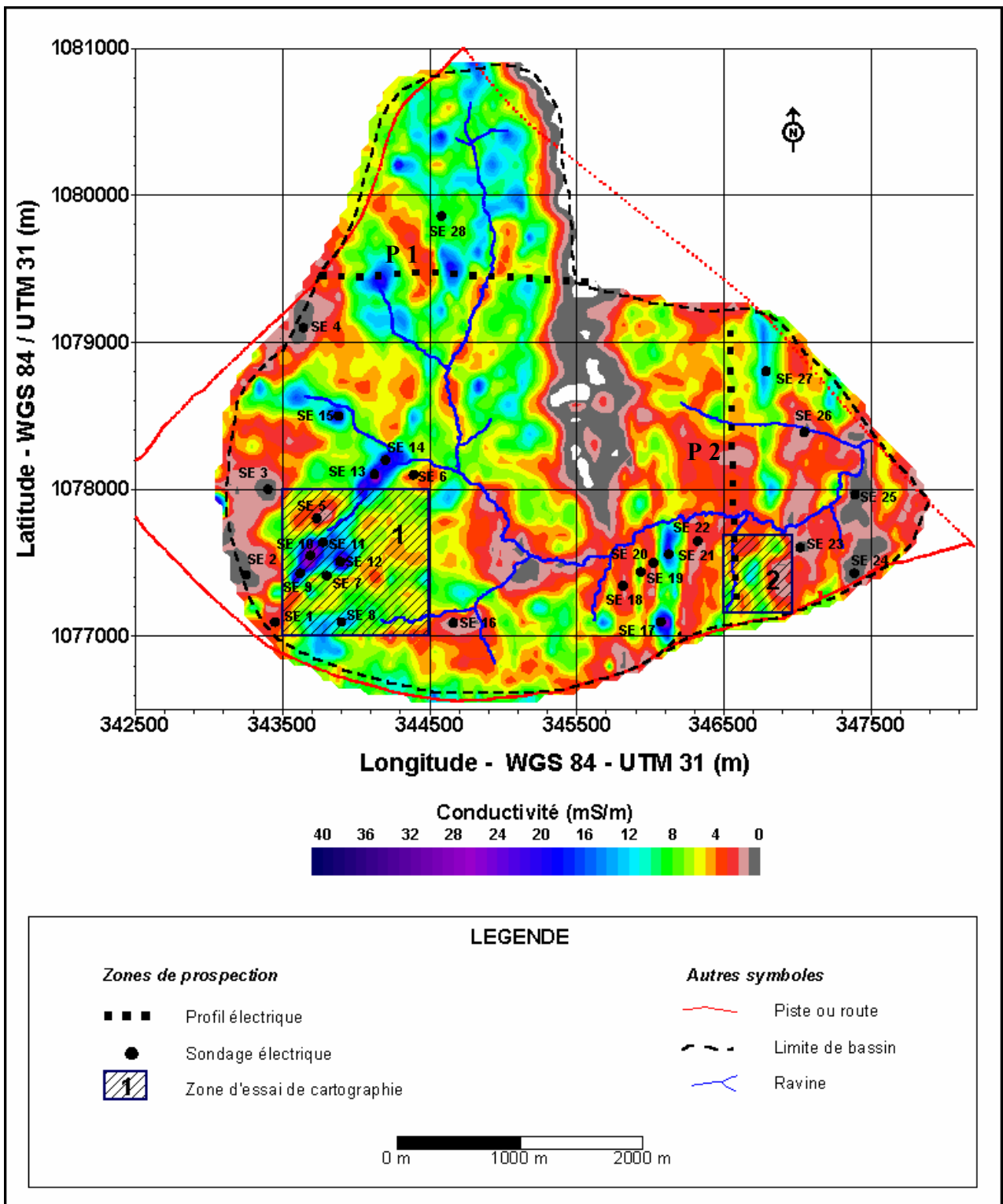
Allure des profils de prospection sur le bassin versant.

ANNEXE 4 : Localisation des points remarquables sur le bassin.



Localisations des affleurements rocheux et points remarquables sur le bassin versant.

ANNEXE 5 : Localisation des zones de prospection spécifiques sur le bassin.



Localisation des zones de prospection spécifiques sur le bassin versant.

ANNEXE 6 : Distribution des conductivités EM 34. Coordonnées des sondages.

Classes de conductivités (mS/m)	Nombre de points	Proportion (%)
0 - 1	629	8.80
1.1 - 2	658	9.20
2.1 - 3	678	9.48
3.1 - 4	761	10.64
4.1 - 5	820	11.47
5.1 - 6	754	10.55
6.1 - 7	619	8.66
7.1 - 8	543	7.60
8.1 - 9	466	6.52
9.1 - 10	325	4.55
10.1 - 11	253	3.54
11.1 - 12	168	2.35
12.1 - 13	123	1.72
13.1 - 14	92	1.29
14.1 - 15	61	0.85
15.1 - 16	61	0.85
16.1 - 17	28	0.39
17.1 - 18	25	0.35
18.1 - 19	19	0.27
19.1 - 20	14	0.20
20.1 - 21	7	0.10
21.1 - 22	6	0.08
22.1 - 23	7	0.10
23.1 - 24	1	0.01
24.1 - 25	6	0.08
25.1 - 26	6	0.08
26.1 - 27	6	0.08
27.1 - 28	2	0.03
28.1 - 29	3	0.04
29.1 - 30	2	0.03
> 30	12	0.17
Total	7149	100.00

N° Sondage	Altitude (m)	Longitude (m)	Latitude (m)
SE1	487	343448	1077098
SE2	491	343250	1077420
SE3	498	343400	1078000
SE4	495	343640	1079100
SE5	484	343733	1077804
SE6	464	344390	1078100
SE7	482	343800	1077412
SE8	477	343900	1077100
SE9	479	343620	1077430
SE10	471	343689	1077551
SE11	481	343774	1077641
SE12	488	343892	1077510
SE13	463	344123	1078104
SE14	468	344200	1078200
SE15	480	343880	1078500
SE16	466	344660	1077094
SE17	471	346070	1077100
SE18	443	345812	1077346
SE20	459	346020	1077500
SE19	457	345933	1077439
SE21	462	346125	1077560
SE22	465	346320	1077650
SE23	473	347018	1077605
SE24	459	347385	1077430
SE25	432	347390	1077965
SE26	450	347045	1078390
SE27	470	346785	1078805
SE28	486	344580	1079860

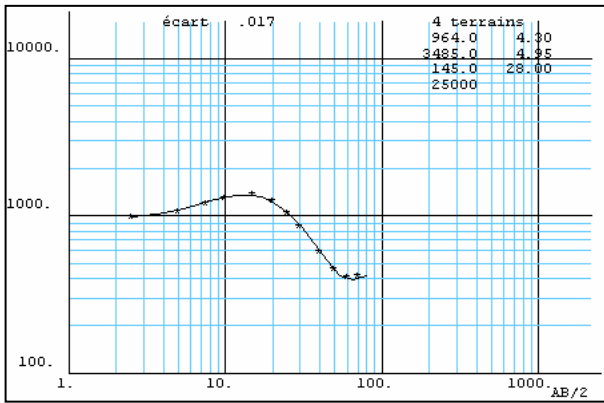
Coordonnées géographiques des points de sondages.

Conductivité EM 34. Nombre et proportion des points mesurés par classes de 1 mS/m.

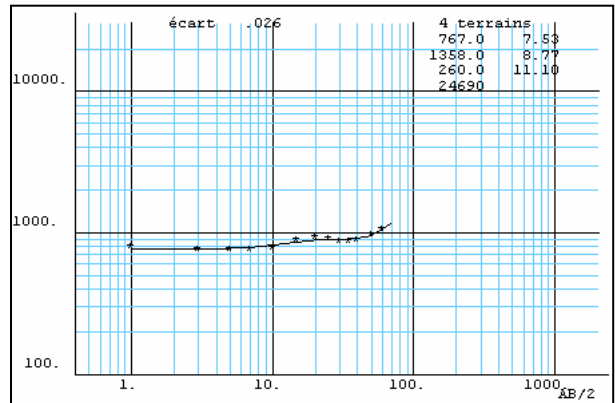
Profil électrique	Début du profil		Fin du profil	
	Longitude (m)	Latitude (m)	Longitude (m)	Latitude (m)
P 1	343775	1079453	345554	1079412
P 2	346541	1079060	346585	1077274

Coordonnées géographiques des points de début et de fin des profils électriques.

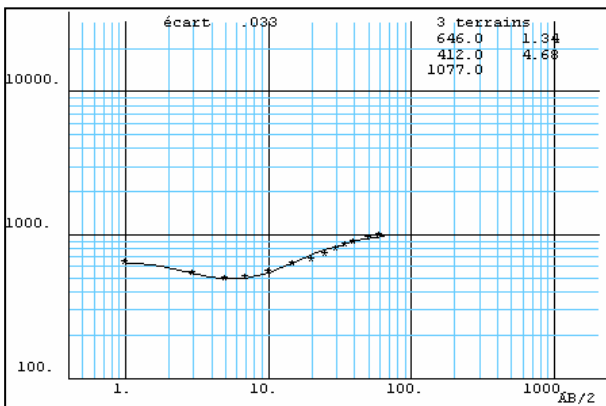
ANNEXE 7 : Résultats de sondages. Modèles de terrains en zones résistantes.



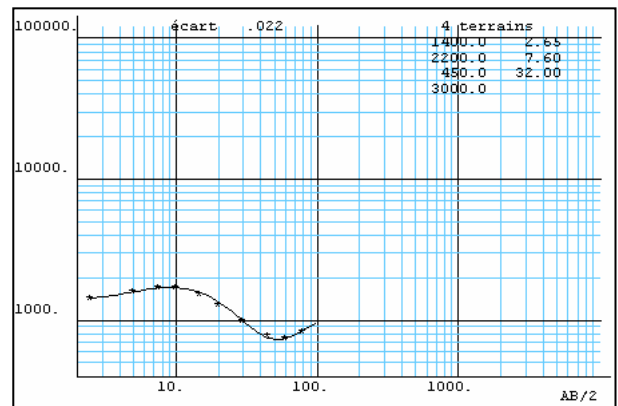
Sondage 1. cuirasses épaisses.



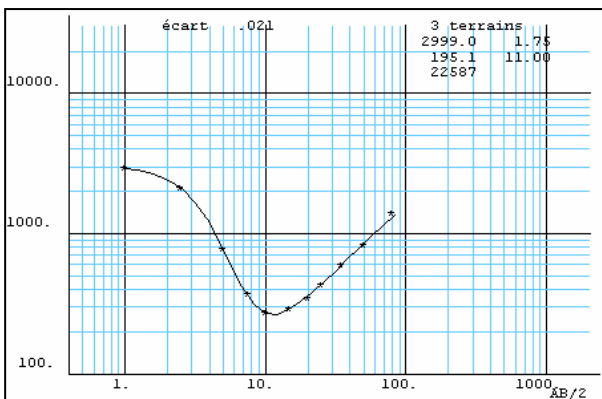
Sondage 2. cuirasses épaisses.



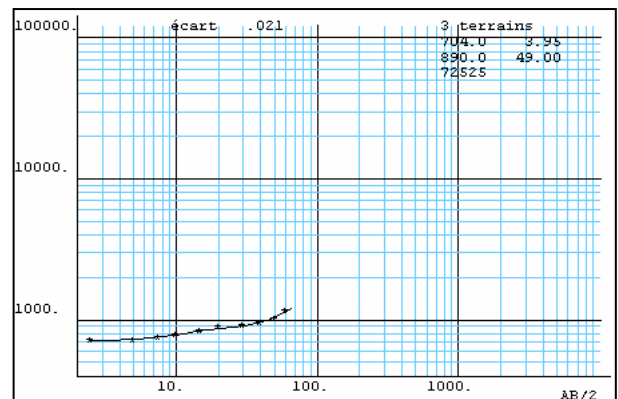
Sondage 3. Substratum proche.



Sondage 4. cuirasses épaisses.

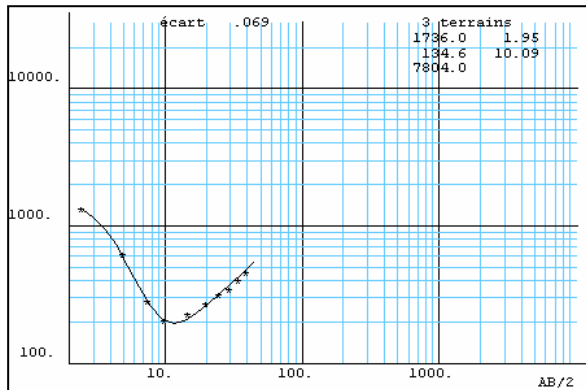


Sondage 6. Substratum proche.

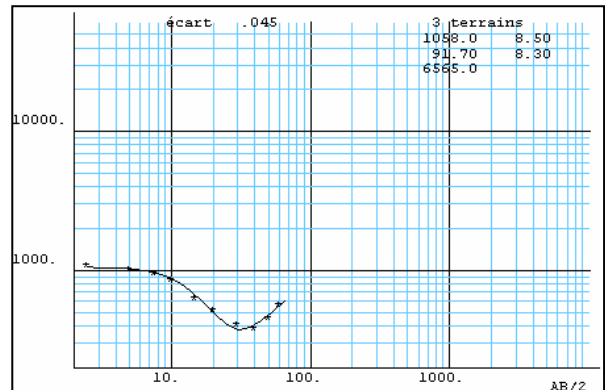


Sondage 16. Substratum proche.

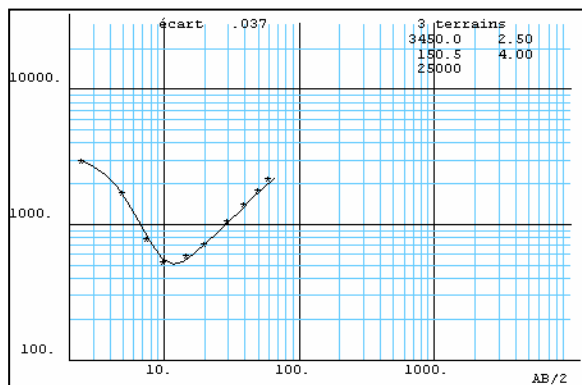
ANNEXE 8 : Résultats de sondages. Modèles de terrains en zones résistantes.



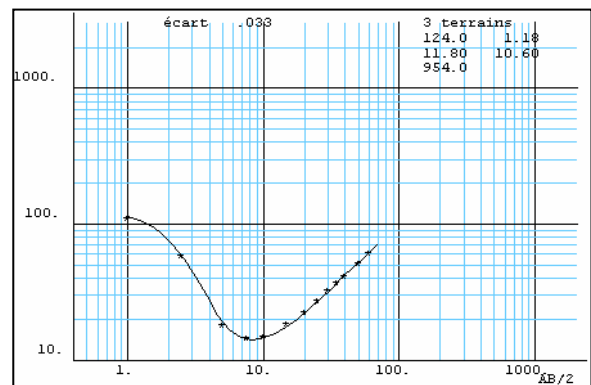
Sondage 18. Substratum proche.



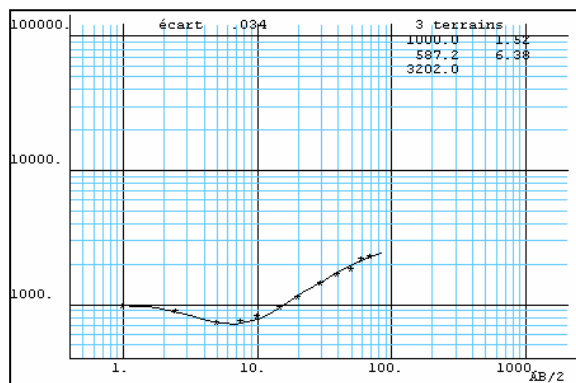
Sondage 20. Cuirasses épaisses et substratum proche.



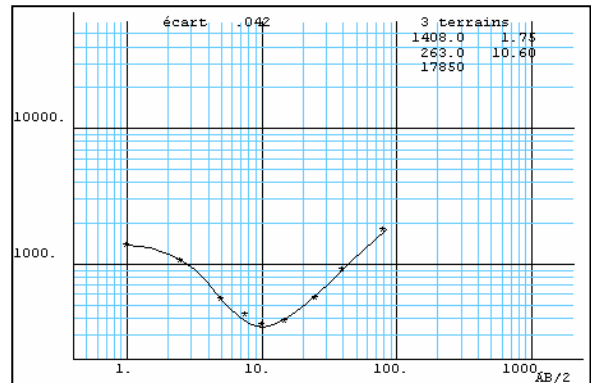
Sondage 22. Substratum proche.



Sondage 24. Substratum proche.

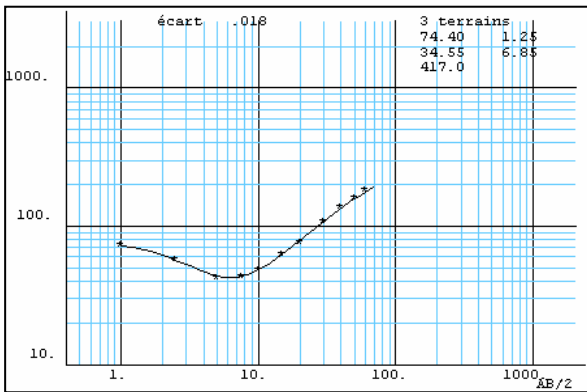


Sondage 25. Substratum proche.

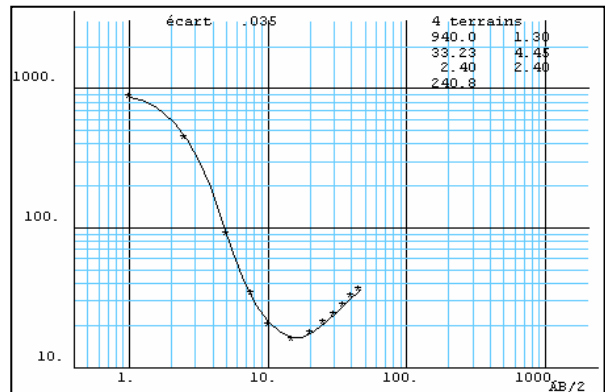


Sondage 26. Substratum proche.

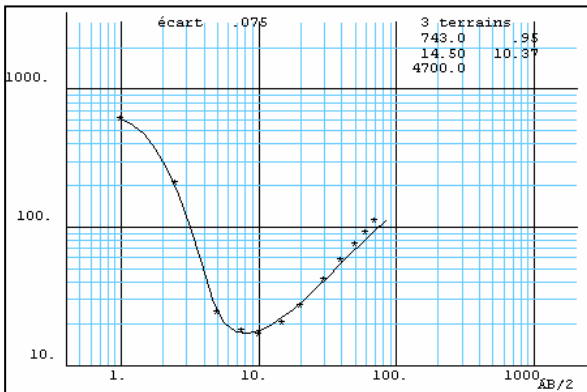
ANNEXE 9 : Résultats de sondages. Modèles de terrains en zones conductrices.



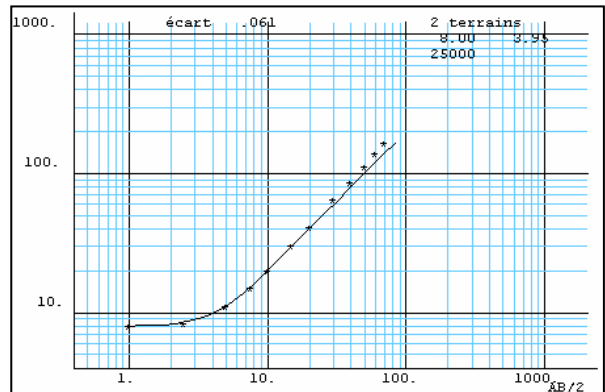
Sondage 8. Zone d'affleurement de nappe.



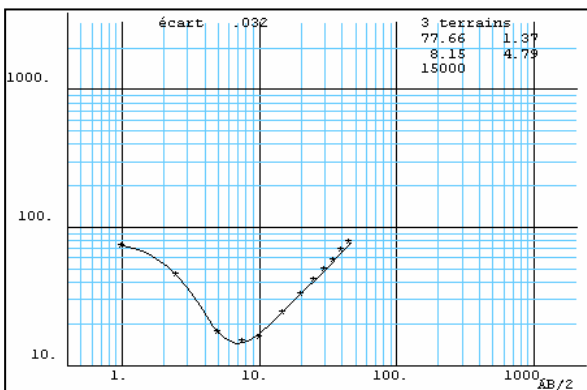
Sondage 9. Zone de nappe perchée.



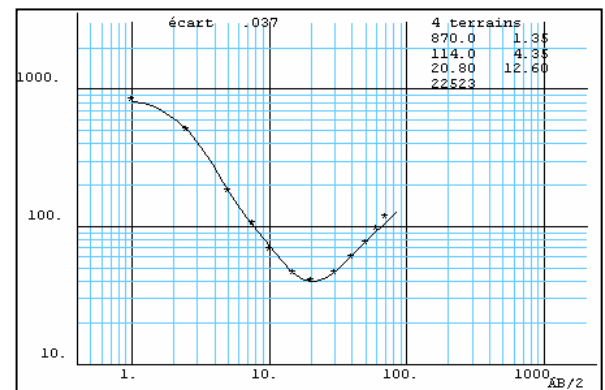
Sondage 10. Zone de nappe perchée.



Sondage 11. Zone d'affleurement de nappe.

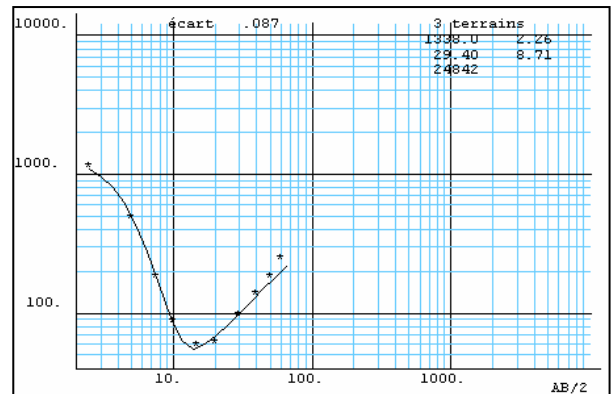
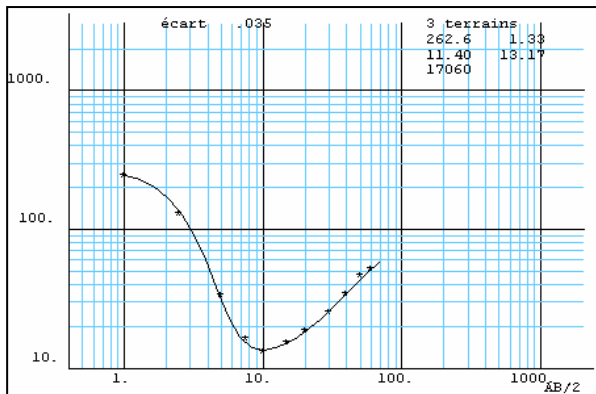


Sondage 13. Zone d'affleurement de nappe.

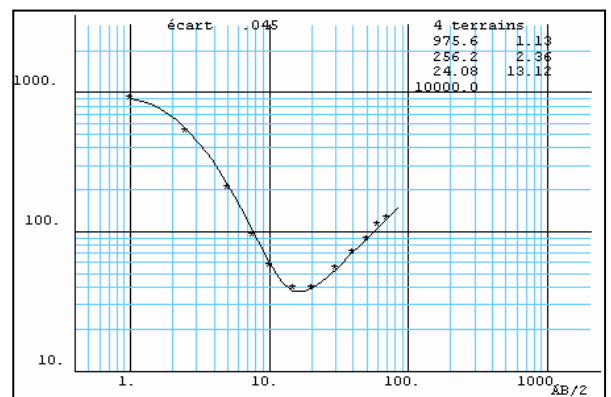
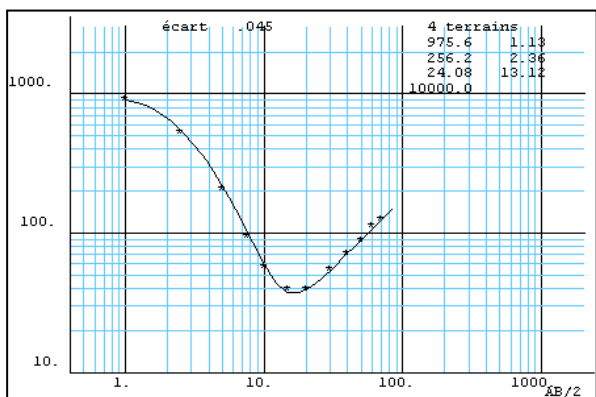


Sondage 14. Zone de nappe perchée en contact avec le substratum..

ANNEXE 10 : Résultats de sondages. Modèles de terrains en zones conductrices.



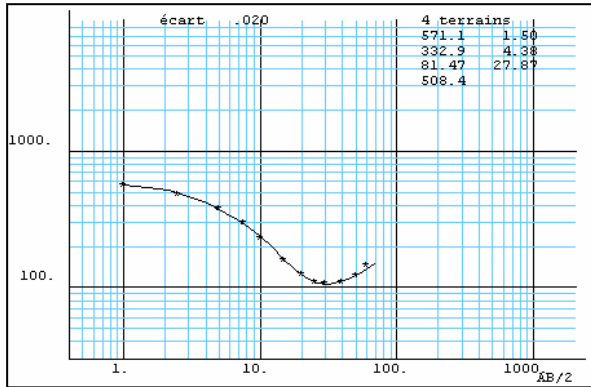
Sondage 19. Zone de nappe d'une petite anomalie conductrice linéaire au sud du bassin.



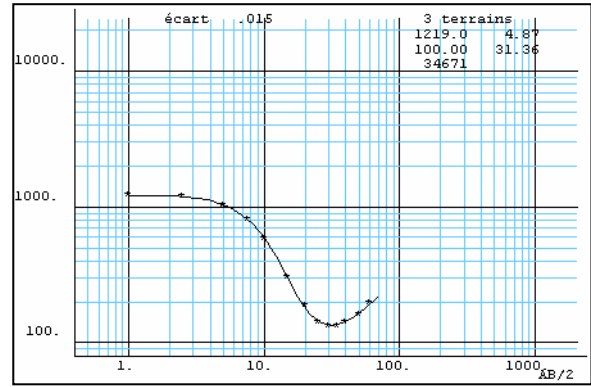
Sondage 21. Zone de nappe de l'anomalie conductrice linéaire au sud du bassin.

Sondage 27. Zone de nappe de l'anomalie conductrice linéaire au sud du bassin.

ANNEXE 11 : Résultats de sondages. Modèles de terrains en zones d'altérites épaisses.



Sondage 7.



Sondage 28.