

UNIVERSITE DE LA REUNION
LABORATOIRE DES SCIENCES DE LA TERRE

ORSTOM

INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE
SCIENTIFIQUE POUR LE
DEVELOPPEMENT EN COOPERATION

PROJET FAC

Appui à la gestion des ressources en eau et à la préservation de leur qualité à Maurice

Prospection électromagnétique des ressources en eau souterraine
SECTEURS DE BEAUX SONGES ET DE MOKA

Albouy Y.
Courteaud M.
Join J.L.
Ritz M.
Robineau B.

mai 1997

Université de la Réunion
Laboratoire des Sciences de la Terre
15, Avenue René Cassin - BP 7151
97715 Saint-Denis Messag Cedex 9
Tél : (262) 93-82-06 - Fax : 93-81-66

ORSTOM
UR Géophysique appliquée
Dept TOA
BP n° 1386 - Dakar
Tel : (221) 32-34-80 - Fax : 32-43-07

SOMMAIRE

Introduction	1
I. Cadre de l'étude	3
II. Méthodes géophysiques électromagnétiques	4
II.1 Sondages TDEM	4
II.2 Sondages CSAMT	5
II.3 Acquisition des données.....	7
III. Interprétation géophysique et hydrogéologique	9
III.1 Secteur de Beaux Songes	9
III.1.1. Modélisation et interprétation géophysique synthétique.....	9
III.1.2. Interprétation géologique et hydrogéologique.....	15
Validité des modèles géophysiques construits.....	15
Cartographie du substratum conducteur.....	18
Implication hydrogéologique.....	18
III.2. Secteur de Moka.....	20
III.2.1. Modélisation et interprétation géophysique synthétique.....	20
III.2.2. Interprétation géologique et hydrogéologique.....	24
Validation sur deux forages.....	24
Interprétation des profils géoélectriques.....	26
Implications hydrogéologiques.....	26
Conclusion	27

Liste des Figures

figure 1: Situation géographique et géologique des secteurs d'étude

figure 2: Dispositif de mesure CSAMT "Stratagem" EH4 de Geometrics

figure 3: Carte de localisation des sondages EM sur le secteur de Beaux Songes

figure 4: Profils géophysiques I, II et III de Beaux Songes

figure 5: Profils géophysiques (IV et V) de Beaux Songes

figure 6: Analyse des sondages S72 et S74

figure 7: Cartographie du substratum de Beaux Songes

figure 8: Carte de localisation des sondages EM dans le secteur de Moka

figure 9: Profils géophysiques M I et M II de Moka

figure 10: Analyse des forages CH110 et CH408

INTRODUCTION

Suite aux conclusions positives de l'étude de faisabilité sur la prospection électromagnétique des ressources en eau à l'île Maurice, effectuée par notre équipe en Mai 1996 (voir rapport remis en Juin 1996), et toujours dans le cadre du projet FAC intitulé "Appui à la gestion des ressources en eau et à la préservation de leur qualité à Maurice", nous avons réalisé du 2 au 23 mars 1997 une campagne de sondages électromagnétiques sur deux secteurs d'étude, sélectionnés par les responsables du projet, pour évaluer leur potentiel hydrogéologique.

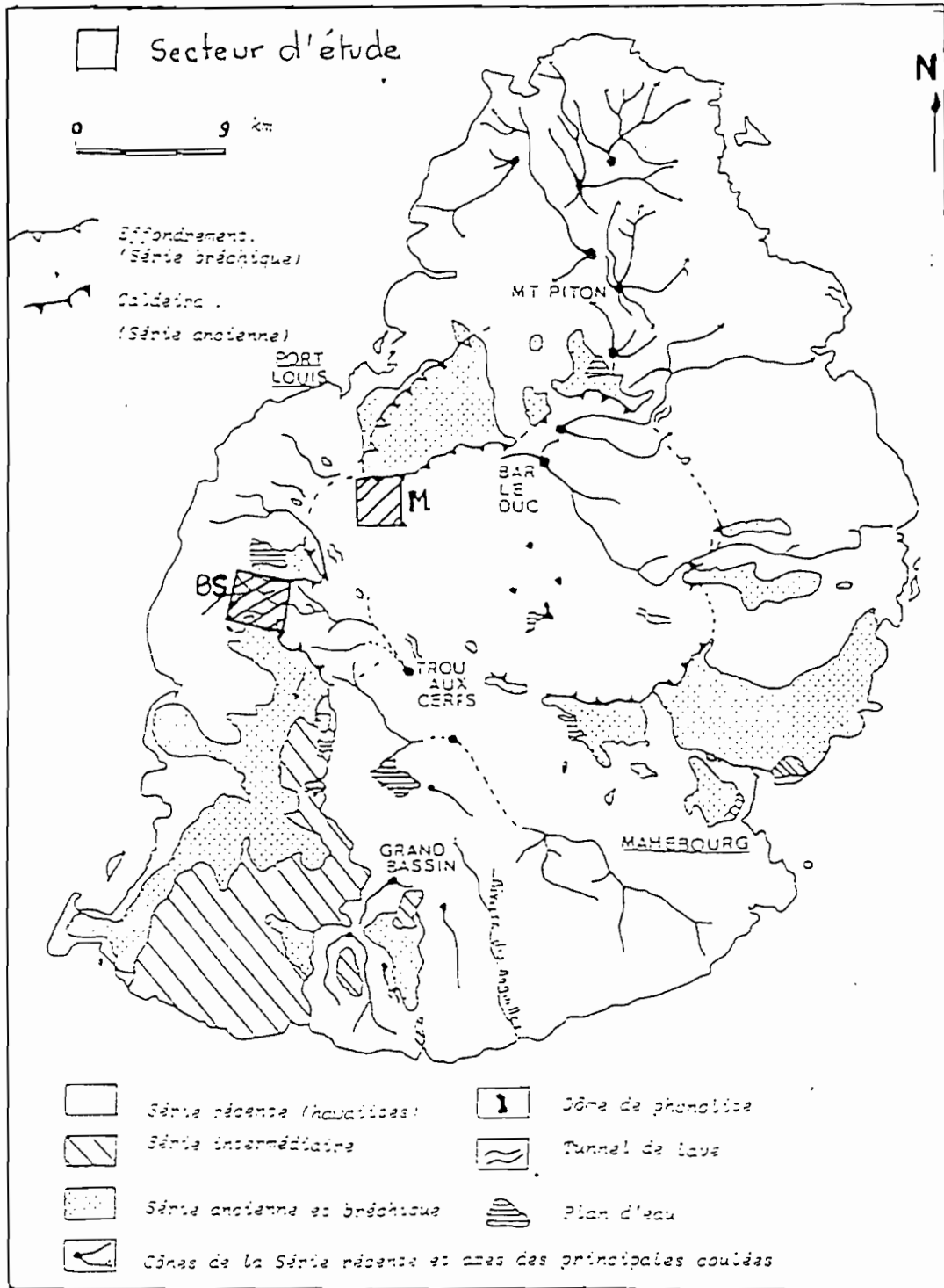
L'étude de faisabilité ayant montré à la fois l'intérêt et les limites de la méthode TDEM pour la prospection des aquifères profonds, nous avons proposé d'une part un couplage des méthodes TDEM et AMT, d'autre part un maillage assez serré sur les secteurs à prospector de façon à établir des profils transverses aux structures et/ou des cartes d'isobathes des différentes couches géoélectriques modélisées.

Dans l'impossibilité actuelle de louer une AMT en France à nos partenaires habituels, et connaissant l'apparition récente sur le marché de nouveaux équipements couvrant les possibilités combinées du TDEM et de l'AMT, nous avons décidé de louer un CSAMT (Audio Magnétotellurie à Source Contrôlée) modèle "Stratagem" EH4 de Geometrics, et de l'étalonner avec le TDEM utilisé en 1996.

Les levés géologiques réalisés récemment, la synthèse des données hydrogéologiques (forages) et géophysiques (essentiellement de l'électrique) disponibles, les résultats de notre première étude de faisabilité, ainsi que des impératifs économiques, ont amené les responsables du projet FAC à choisir deux secteurs d'étude pour la campagne 1997 : celui de Beaux Songes où de nombreux sondages EM viendront compléter les mesures effectuées en 1996, et celui de Moka où nous avons réalisé un double profil CSAMT et quelques sondages TDEM (figure 1). Nous présenterons donc, dans ce rapport, les résultats de la prospection électromagnétique effectuée dans chacun des secteurs, ainsi que les implications géologiques et hydrogéologiques qu'il est raisonnable d'en tirer.

Les données brutes des deux secteurs, sondage par sondage, sont disponibles dans les annexes jointes.

Figure 1: Situation géographique et géologique des secteurs d'étude
 Carte géologique simplifiée de Maurice, Perroud B.(1983)



I. CADRE DE L'ÉTUDE

Contexte géologique et géographique de l'île Maurice

Dans l'océan Indien, au coeur de l'archipel des Mascareignes, l'île Maurice, située par 57°35' de longitude et 20°15' de latitude est entièrement d'origine volcanique. Les premières formations aériennes apparaissent il y a environ 10 millions d'années (*Perroud, 1982*). Aujourd'hui considéré comme éteint, ce volcan bouclier a connu deux périodes principales d'activité. Une série ancienne (10 à 5 Ma) constituée par des basaltes alcalins et des trachytes forme l'essentiel du relief; plus tard, après une longue période d'érosion (5 à 3,5 Ma) une reprise de l'activité volcanique met en place une série récente (3,5 à 0,025 Ma) constituée de basaltes alcalins dont les coulées comblent en grande partie les principales dépressions creusées au cours de la période précédente par le jeu simultané de la tectonique et de l'érosion. La présence de niveaux très altérés intercalés dans la série récente a permis de distinguer une formation "intermédiaire" à la base de cette série.

Au terme de la phase ancienne, le massif volcanique culmine à environ 1000m avec une zone centrale effondrée en une vaste caldeira polylobée et entaillée profondément au cours de la période d'érosion qui suit (*Giorgi, 1997*).

Secteur de Beaux Songes

Le site de Beaux Songes correspond à une vallée haute (altitude moyenne de 250m) à fond plat et à faible déclivité vers l'ouest. Limité au nord et au sud par les reliefs du Mont St Pierre et Mont du Rempart, cette vallée s'ouvre vers l'ouest en même temps que la pente s'accroît sensiblement. La structure, identifiée par photographies aériennes et relevés de terrain, correspond à une paléovallée d'abord creusée dans les formations anciennes puis comblée par les coulées volcaniques des séries intermédiaires et récentes. Elle constitue un axe majeur pour les écoulements souterrains guidés par la topographie du substratum ancien moins perméable. Ceci est en partie vérifié sur le terrain par des sondages de reconnaissances et mesures géoélectriques. En revanche la profondeur maximum du creusement dans la série ancienne est inconnue et la morphologie de la paléotopographie du toit de la série reste à préciser.

Secteur de MOKA .

Situé au dessus (SE) de Port Louis le site de Moka correspond à l'extension nord de la haute plaine de Curepipe. Celle-ci se transforme en large plan incliné vers la mer en suivant

le rempart constitué par l'alignement de Guiby, Berthelot et Junction Peaks. Cette plaine est profondément entaillée par les affluents de la Grande River North West. Dans l'ensemble, la structure géologique du secteur de Moka est comparable à celle de Beaux Songes. Elle correspond encore au remplissage d'une dépression creusée dans les formations anciennes (affleurantes sur les remparts) par des coulées des phases intermédiaire et récente. La topographie du substratum constitue encore un guide majeur pour des écoulements souterrains au sein des formations intermédiaires et récentes. En revanche, à la différence du site de Beaux Songes, la structure est ici beaucoup plus large (au moins 4km entre les deux reliefs anciens de Junction Peak et du Corps de Garde) et la topographie du substratum est sans doute plus complexe.

II. MÉTHODES GÉOPHYSIQUES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Les méthodes électromagnétiques (EM) sont bien adaptées à la prospection des eaux souterraines. En particulier, elles peuvent être utilisées pour estimer les propriétés électriques des matériaux de subsurface. Comme les propriétés électriques des matériaux géologiques dépendent fortement de la porosité, du degré de saturation et de la conductivité de l'eau d'imbibition (*Keller et Frischknecht, 1966*), des informations importantes sur le contenu en eau et sa qualité peuvent être obtenues. Ces méthodes ont également montré leur efficacité en milieu volcanique insulaire (*Couteaud et al, 1996; Descloitres et al, 1997*).

Dans les zones de prospection de Beaux Songes et de Moka, nous avons utilisé deux techniques EM: la méthode Time Domain Electromagnetic (TDEM) et la méthode Audiomagnétotellurique à source contrôlée (CSAMT).

II.1 SONDAGES TDEM

La méthode TDEM est décrite par plusieurs auteurs (*McNeill, 1980; Kaufmann et Keller, 1983; Fitterman et Stewart, 1986*). C'est une méthode EM qui utilise une loupe d'émission dans laquelle circule un courant. Pendant l'émission de ce courant, un champ EM statique s'établit dans le sous-sol. Lors de la coupure brusque de ce courant, la force électromotrice induite dans le sous-sol produit des courants analogues aux courants de Foucault. Ceux-ci se propagent à travers le terrain et leur amplitude décroît avec le temps, produisant en surface un champ magnétique décroissant, qui est mesuré par la bobine réceptrice. L'analyse de la décroissance de ce champ pendant le temps où le champ primaire est coupé permet d'obtenir une courbe de résistivité apparente en fonction du temps.

Plusieurs configurations de mesure peuvent être utilisées. La profondeur d'investigation dépend de facteurs tels que la taille de la boucle d'émission, l'intensité du courant, la résistivité des terrains... D'une façon générale, les avantages de la méthode TDEM sont une résolution latérale correcte des résistivités, une bonne résolution du principe de l'équivalence, une bonne résolution des résistivités de corps conducteurs, la rapidité des mesures associée à une faible dispersion des résultats grâce à la source contrôlée. En revanche, la méthode se révèle impuissante à définir finement les terrains résistants.

II 2 SONDAGES CSAMT

La méthode CSAMT (*Goldstein et Strangway, 1975*) ne se distingue pas de la méthode audiomagnétotellurique (AMT, *Gagniard, 1953*) si ce n'est par la nature des signaux utilisés. Au lieu de travailler avec des signaux naturels, c'est à dire avec les variations aléatoires du champ magnétique terrestre, la méthode CSAMT fait appel aux signaux artificiels d'émetteurs dans la bande de 1 Hz à 100 Khz. En principe la technique CSAMT est similaire à celle de la source naturelle (AMT). Par la mesure en surface du champ EM induit par les courants électriques artificiels générés par l'émetteur, on en dérive, pour une fréquence donnée, la résistivité électrique du sous-sol. La mesure des composantes du champ EM est faite à une distance suffisante de l'émetteur de façon que le champ de la source peut être considéré comme une onde plane.

Pour un sous-sol homogène, la relation entre les composantes du champ EM peut être représentée sous la forme suivante:

$$\rho = 0.2/f (E/H)^2$$

ρ : résistivité électrique en ohm-m

f : fréquence du signal en Hertz

E : amplitude du champ électrique en mV/km

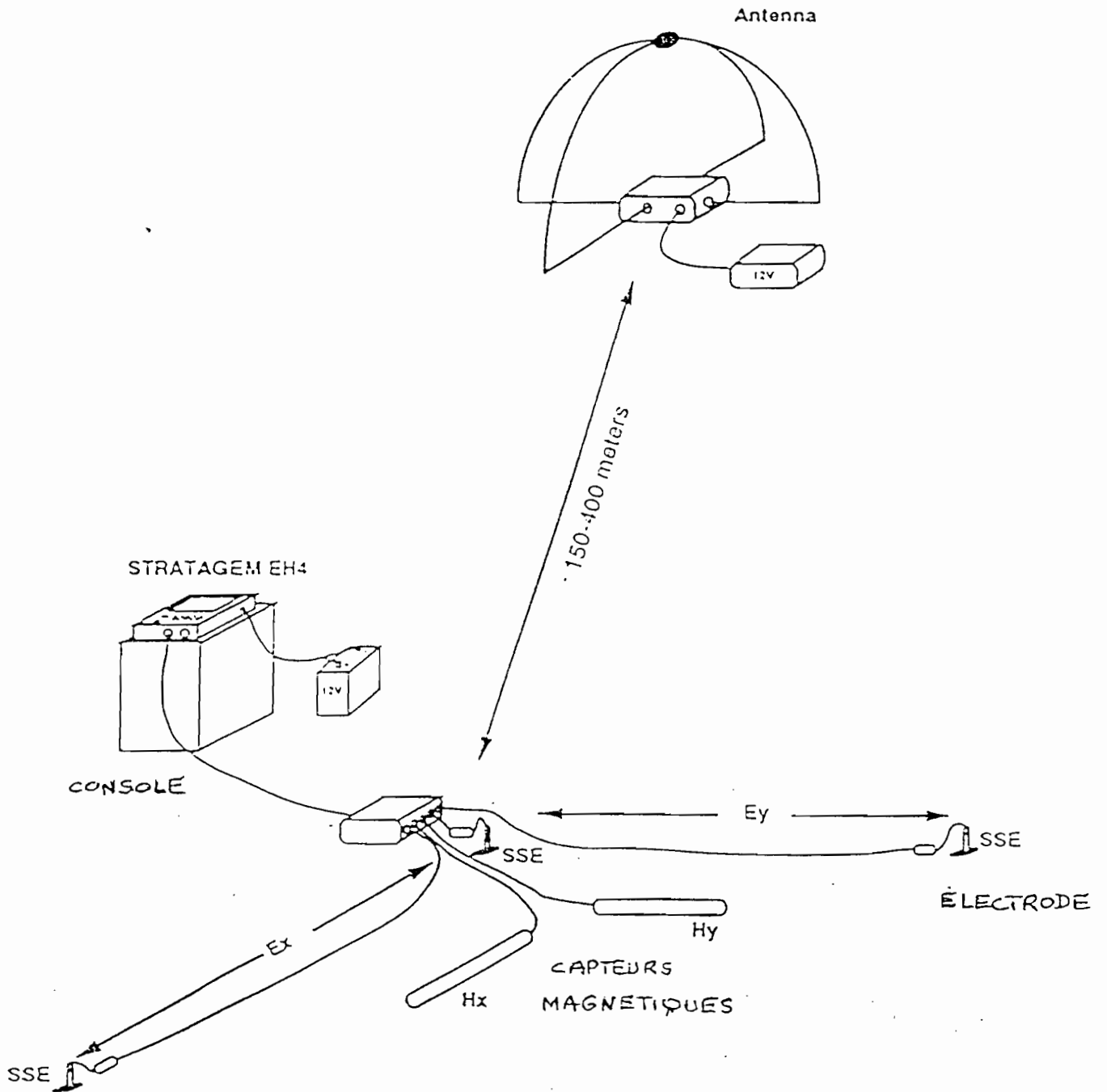
H : amplitude du champ magnétique en nT

Généralement la résistivité obtenue est une résistivité apparente par suite de l'hétérogénéité et de l'anisotropie des terrains réels. Dans cette situation simple, on observe que les champs E et H sont orientés perpendiculairement l'un à l'autre et que E accuse une avance de phase de 45° par rapport à H .

figure 2: Dispositif de mesure CSAMT "Stratagem" EH4 de Geometrics

STRATAGEM™ EH4

GEOMETRICS



Lorsque le sous-sol n'est pas uniforme, la relation entre E et H est de nature tensorielle et complexe: ces champs ne sont généralement plus exactement orthogonaux et le déphasage peut s'écarter de 45°.

La profondeur de pénétration (en mètres) de la méthode est reliée à la fréquence et à la résistivité électrique:

$$p = 503 (\rho/f)^{1/2}$$

Sa profondeur de pénétration importante, sa haute résolution et son immunité aux perturbations EM parasites fait de cette méthode un excellent outil pour cartographier rapidement les structures conductrices très fréquemment assimilées à des formations aquifères, pour localiser les zones de fracture et en déterminer l'extension et l'orientation.

Néanmoins, un inconvénient du CSAMT est la proximité de la source artificielle. Si l'antenne émettrice est trop proche de la zone d'étude, l'hypothèse d'onde plane qui simplifie l'interprétation des données n'est plus valable. En général, pour pouvoir interpréter les données CSAMT avec les techniques développées par la méthode AMT, il est nécessaire que l'émetteur soit localisé à une distance d'environ 3.5 fois la profondeur de pénétration (p) de la zone d'étude (*Goldstein et Strangway, 1975*).

II.3 ACQUISITION DES DONNÉES

Les mesures TDEM ont été exécutées à l'aide d'un Protem 47 de Geonics permettant de mesurer le champ magnétique induit selon trois cadences de 237, 62.5 et 25 Hz. La profondeur d'investigation est estimée entre 5 et 150 m, mais peut-être bien inférieure si les premières couches du sous-sol sont conductrices.

Les sondages ont été réalisés avec une boucle d'émission carrée de 100 x 100 m pour obtenir une pénétration maximale. L'installation du dispositif en zone cultivée (champ de canne à sucre) est assez long. Une fois le dispositif mis en place, la mesure est très rapide, moins de 15 minutes. La dispersion des données reste faible, lorsque l'on est suffisamment éloigné des lignes de haute tension pour les cadences de 237 et 62.5 Hz. Néanmoins, la cadence de 25 Hz est difficilement exploitable en raison de la faible intensité du courant d'injection (~ 2 A) disponible sur cet équipement ce qui réduit considérablement la profondeur d'investigation. En conséquence, peu de sondages TDEM ont été réalisés dans

les deux secteurs d'étude, si ce n'est pour améliorer certaines interprétations de données CSAMT présentant des problèmes, en particulier l'effet de "static shift" (*Berdichevsky et Dimitriev, 1976*).

La prospection CSAMT a été effectuée au moyen d'un système tensoriel Stratagem EH-4 de Geometrics permettant d'obtenir les valeurs de résistivité apparente et de phase à des fréquences différentes suivant deux directions de mesure orthogonales. Dans le cas de structures tabulaires (1-D), les valeurs mesurées suivant ces deux axes sont similaires, c'est à dire indépendantes de la direction de mesure. Pour des structures bi-dimensionnelles (2-D), les valeurs mesurées diffèrent suivant les axes de mesure et l'on peut définir les 2 directions des axes principaux, c'est à dire l'axe de la structure ('strike'). L'interprétation devra se faire à l'aide d'un modèle de structure conductrice 2-D.

L'antenne émettrice du Stratagem opère dans deux gammes de fréquence sélectionnées: 750 Hz- 65 KHz et 500 Hz- 3 KHz. Dans la gamme basse fréquence (10 Hz- 1 KHz), la source artificielle est remplacée par les signaux naturels du champ magnétique terrestre, c'est à dire que le Stratagem fonctionne comme un appareil AMT classique.

Cependant, les réponses CSAMT et AMT peuvent être perturbées par la présence d'inhomogénéités superficielles (*Berdichevsky et Dimitriev, 1976*). Cette distorsion (static shift) se manifeste sur les données par un décalage parallèle des courbes de résistivité apparente, qui est indépendant de la fréquence; les courbes de phase ne sont pas affectées. L'interprétation des courbes d'amplitude distordues peut conduire à des structures de résistivité erronées. Un schéma de correction basé sur l'inversion des courbes de sondage TDEM peut être utilisé pour obtenir les valeurs correctes de la résistivité apparente. A partir du modèle TDEM à la même station de mesure, la réponse AMT/CSAMT est calculée et les courbes distordues sont alors déplacées au niveau de la courbe calculée, éliminant ainsi l'effet de 'static shift' (*Pellerin et Hohmann, 1990*).

III. INTERPRÉTATION GÉOPHYSIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

III.1 SECTEUR DE BEAUX SONGES

III.1.1. Modélisation et interprétation géophysique synthétique

La figure 2 montre la position des sondages EM effectués dans cette zone. Une quarantaine de sondages CSAMT y ont été réalisés de façon à couvrir la zone entière. Néanmoins, la présence de lignes à haute tension ne nous a pas permis de réaliser un maillage serré et continu de stations à cause des perturbations engendrées dans les mesures par les courants parasites. 8 sondages TDEM ont été effectués aux mêmes sites que les sondages CSAMT.

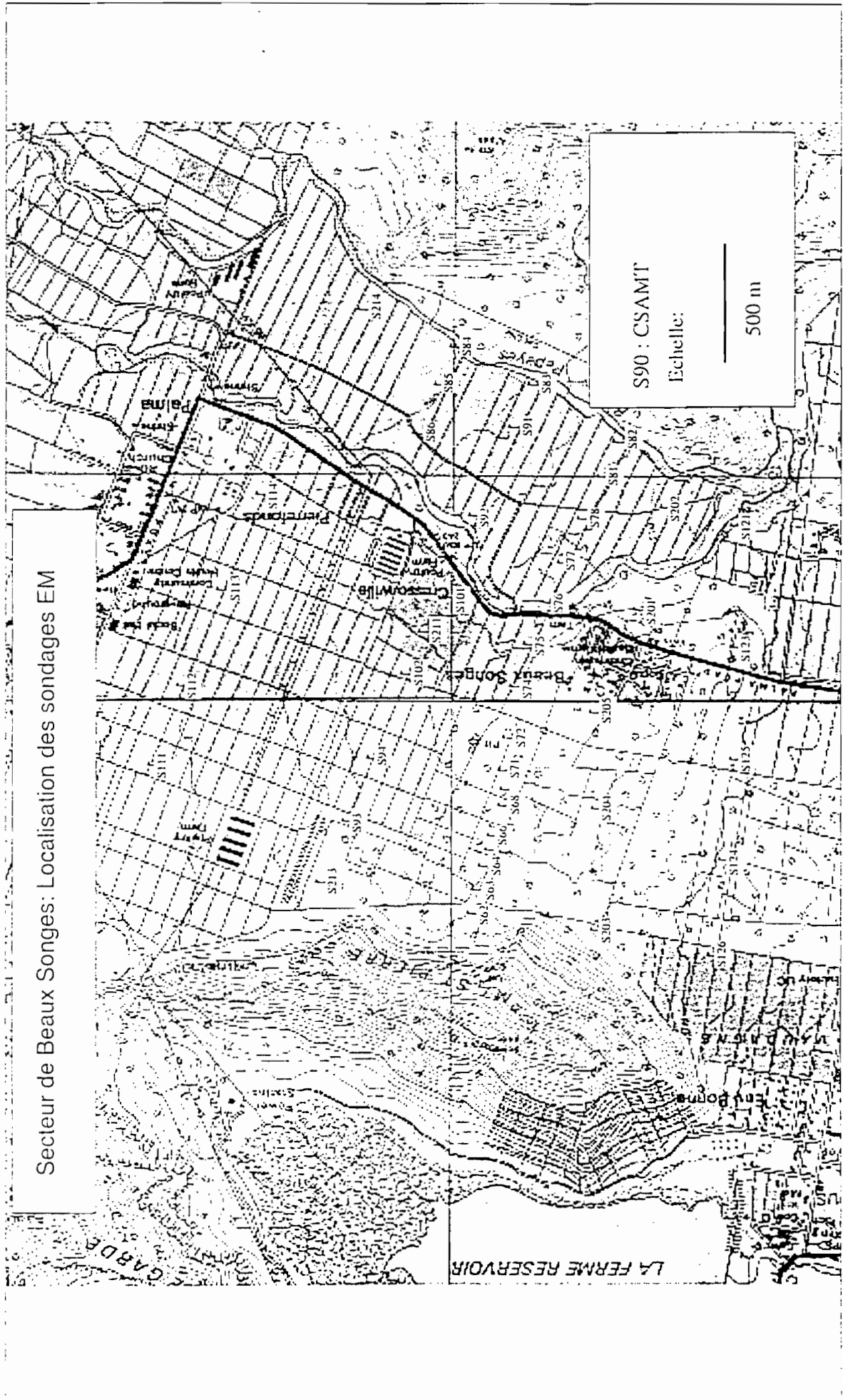
Sondages TDEM

Le traitement et la modélisation des données ont été réalisés au moyen du logiciel TEMIX GL (*Interpex Ltd., 1989*). Il s'agit d'une interprétation interactive utilisant un modèle de structure 1-D. Les sondages TDEM réalisés correspondent aux sites S69, S71, S75, S101, S112, S113, S204 et S214 (Figure.2). A l'exception du site S214, ces courbes montrent une décroissance de la résistivité apparente en fonction du temps croissant (Fig. X2-1 et 2, annexe 1) avec un palier compris entre .1 et .6 ms. Le site S214 montre au contraire une remontée de la résistivité apparente à la fin de la gamme de temps ($t > .2$ ms).

La modélisation 1-D (Fig X2-1 et 2, annexe 1) permet de reconnaître 4 terrains dont la résistivité décroît avec la profondeur:

- * un premier terrain relativement résistant de l'ordre de 200 ohm-m (800 ohm-m pour le site S75) avec une épaisseur d'environ 10- 20 m ;
- * un second terrain d'épaisseur réduite (< 5 m), conducteur d'environ 10 ohm-m ;
- * un troisième terrain moyennement résistant (< 100 ohm-m), d'épaisseur importante (100-140 m) ;
- * un quatrième terrain conducteur (10-30 ohm-m), correspondant au substratum et assez difficile à mettre en évidence avec le TDEM à cette profondeur.

figure 3: Carte de localisation des sondages EM sur le secteur de Beaux Son



Pour le site S214 (Fig. X2-2, annexe 1), la modélisation montre une structure à 3 couches, moyennement conducteur/conducteur/résistant. Il n'a pas été possible d'obtenir le toit supposé du dernier terrain conducteur comme pour les autres stations à cause de la dispersion des données à la cadence 62.5 Hz.

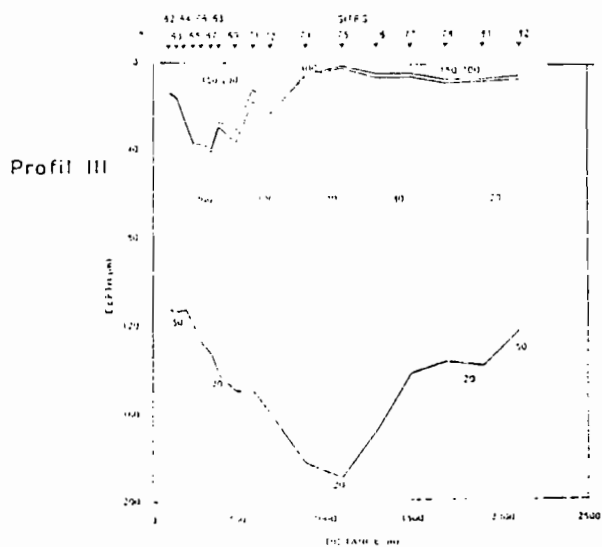
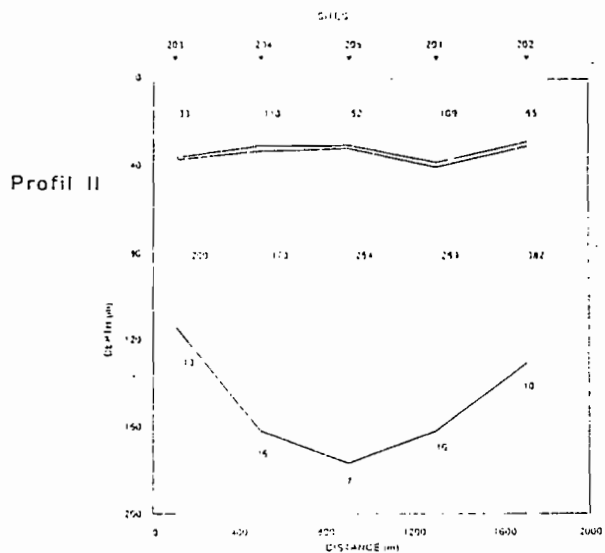
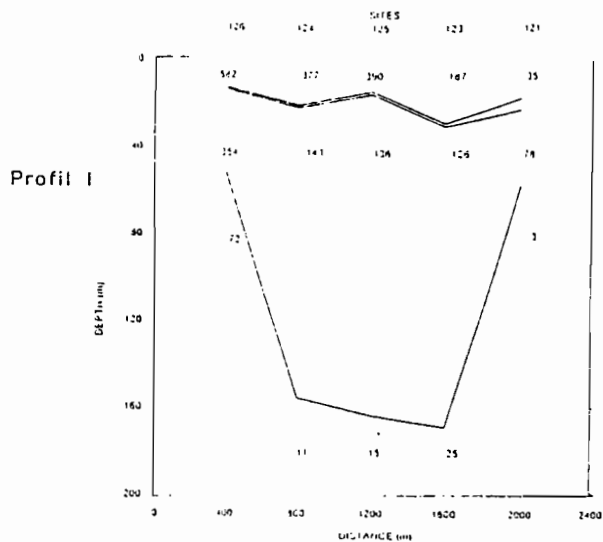
Superposées au modèle 1-D le mieux adapté aux données TDEM, les figures X2-1 et 2 (annexe 1) montrent pour chaque site de sondage les modèles équivalents, c'est à dire le taux de résolution des paramètres du modèle: résistivité et profondeur. On constate, en général que la profondeur du toit du dernier terrain est très mal résolue, avec des variations de l'ordre de 20-30%. Par contre, la résistivité et la profondeur des couches supérieures sont bien définies.

La méthode TDEM est donc capable de repérer avec une bonne résolution les couches superficielles et la couche moyennement résistante (< 100 ohm-m); c'est l'ajustement du modèle TDEM et du modèle CSAMT qui permettra de reconnaître véritablement le substratum conducteur.

Sondages CSAMT

En général, l'analyse tensorielle des données montre, pour chaque station du secteur d'étude, un sous-sol dépourvu d'anisotropie; il n'y a pas de direction privilégiée (Fig X3-1 à 11, annexe 2). Cependant, le 'static shift' (*Berdichevsky et Dimitriev, 1976*) est visible au site S65 (Fig. X3-1, annexe 2). Le décalage parallèle des courbes d'amplitude est flagrant au site S65 alors que les courbes de phase sont confondues. La comparaison par rapport aux courbes de sondage des stations proches (S64 et S66) permet cependant de valider les valeurs de résistivité apparente de la courbe supérieure. Les courbes de sondage ont alors été interprétées par des modèles 1-D à l'aide du logiciel EMIX MT (*Interpex Ltd., 1993*) pour obtenir une stratification verticale de la résistivité en fonction de la profondeur. Les données de la résistivité apparente en fonction de la fréquence, ainsi que les résultats des interprétations à chaque station sont montrés en annexe 2.

figure 4: Profils géophysiques I, II et III de Beaux Song



Les courbes de sondage sont caractérisées par une résistivité plus ou moins importante dans la gamme haute fréquence, un minimum de résistivité apparente vers 10 000-5000 Hz, un maximum de résistivité vers 1000-500 Hz et une décroissance de la résistivité en fonction de la fréquence à la fin de la gamme de mesure. Ce schéma est produit par une structure à 4 niveaux avec un deuxième et quatrième niveaux conducteurs. Le résultat de la modélisation 1-D est montré pour l'ensemble des stations en annexe 2 avec les modèles équivalents. En général, les paramètres physiques de résistivité et de profondeur sont bien définis, en particulier la profondeur du dernier niveau conducteur est bien résolue. Un modèle général peut-être défini sur l'ensemble de la zone d'étude:

- * une première couche moyennement résistante avec une résistivité dans la gamme 100-500 ohm-m et une épaisseur variant entre 5 et 30 m;
- * une deuxième couche conductrice (< 15 ohm-m) d'épaisseur réduite (< 10 m);
- * une troisième couche moyennement résistante dont la résistivité varie entre 80 et 300 ohm-m et qui peut atteindre une épaisseur maximum de 180 m;
- * une quatrième couche conductrice de résistivité < 20 ohm-m qui représente le substratum. Son épaisseur ne peut être définie car nous sommes en limite de mesure de la gamme basse fréquence de l'équipement.

Synthèse géophysique du secteur de Beaux Songes

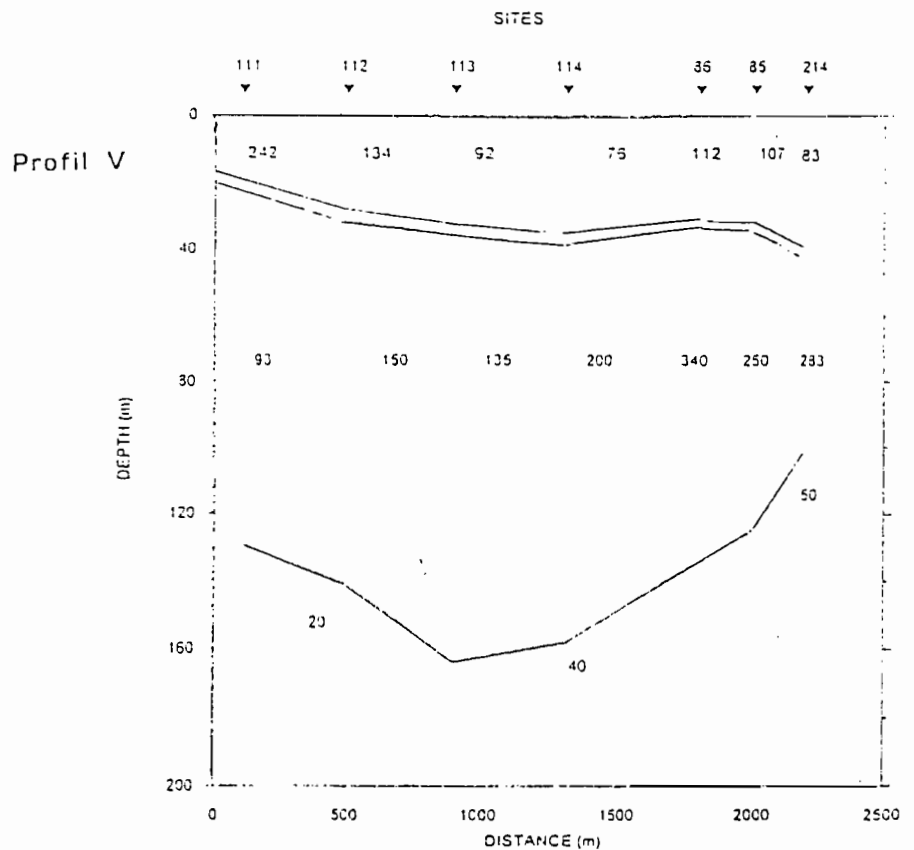
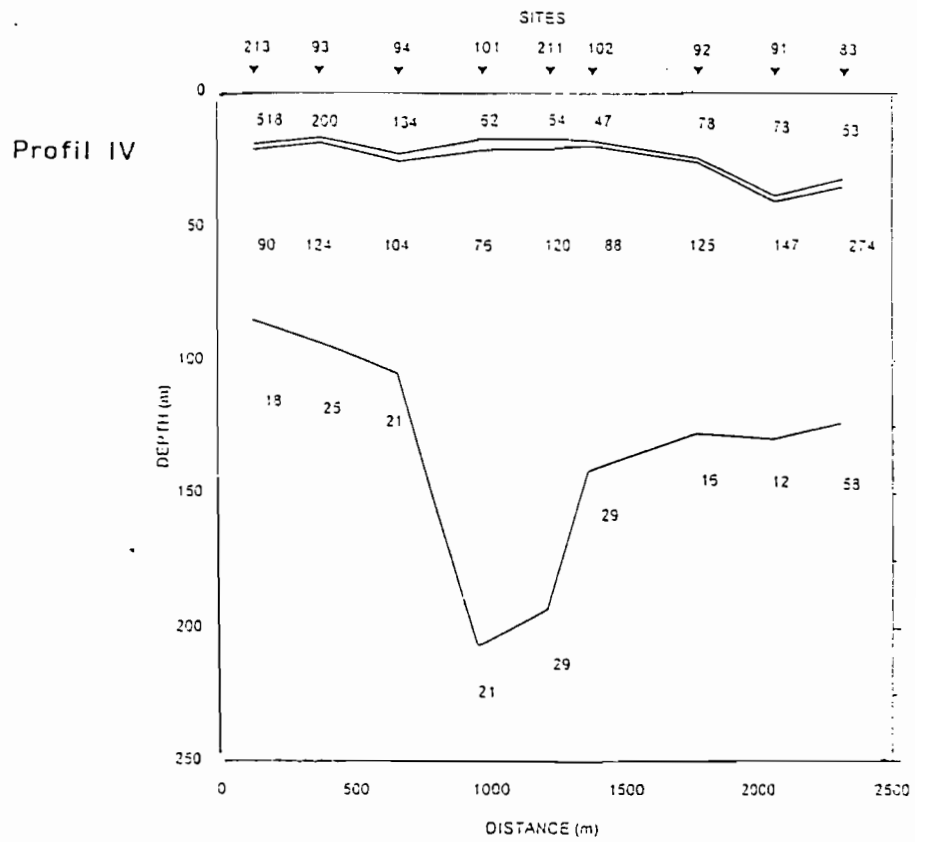
Les résultats de l'interprétation EM dans le secteur de Beaux Songes permet de proposer 5 coupes géoélectriques synthétiques.

Zone Aval , Profils I,II et III (Figure 3):

Le profil III à l'amont du verrou est le plus représentatif, avec 17 sondages CSAMT et TDEM. On distingue successivement de la surface vers le bas, les terrains suivants:

- * un terrain moyennement résistant avec une résistivité qui varie entre 370 et 130 ohm-m. Ce terrain s'amincit considérablement du nord vers le sud, passant de quelques mètres d'épaisseur au site 82 à quelques dizaines de mètres au site 67. Cette transition est brutale et s'effectue au niveau du site 72 ;

figure 5: Profils géophysiques (IV et V)



- * un terrain conducteur (< 15 ohm-m) d'épaisseur faible de 2 à 10 m ;
- * un terrain moyennement résistant dont la résistivité varie entre 400 et 60 ohm-m. Les stations 62-67 montrent des résistivités supérieures au premier terrain, contrairement aux stations du reste du profil. L'épaisseur de ce terrain est importante, elle augmente progressivement de la station 62 (~ 100 m) à la station 75 (~170 m) pour diminuer de nouveau vers le sud ;
- * le substratum conducteur présente des résistivités assez uniformes au centre du profil (stations 65-78) de l'ordre de 10-20 ohm-m, et des résistivités plus importantes (~ 50 ohm-m) sur ses extrémités.

Profil II (Figure 3)

Ce profil est comparable au profil précédent avec cependant, une profondeur du substratum moins importante.

Profil I (Figure 3)

Ce profil est caractérisé par une remontée brutale du substratum conducteur aux stations 126 et 121 où la couche conductrice se situe à 50-60 m de la surface.

Zone Amont , profil IV et V (Figure 4):

Sur ces profils, on retrouve les mêmes caractéristiques géoélectriques que pour les profils I et II et III. Sur le profil IV, on constate cependant une forte variation de l'épaisseur de la troisième couche, entre les stations 94-101 au nord et entre les stations 102-92 au sud. L'épaisseur maximum (~185 m) de cette couche se situe au droit de la station 101.

Le profil V est identique aux profils précédents avec un approfondissement du dernier interface résistant/conducteur au centre du profil (stations 113-114). On constate également, à l'extrémité sud du profil, que les résistivités du troisième terrain sont supérieures à celles du terrain superficiel (stations 86-84). Les résistivités du substratum sont nettement plus élevées que celles du profil I.

III.1.2. Interprétation géologique et hydrogéologique

Validité des modèles géophysiques construits

Les modèles géophysiques utilisés sont validés par comparaison à des sondages mécaniques réalisés sur la zone. A proximité des forages les plus profonds repérés sur le

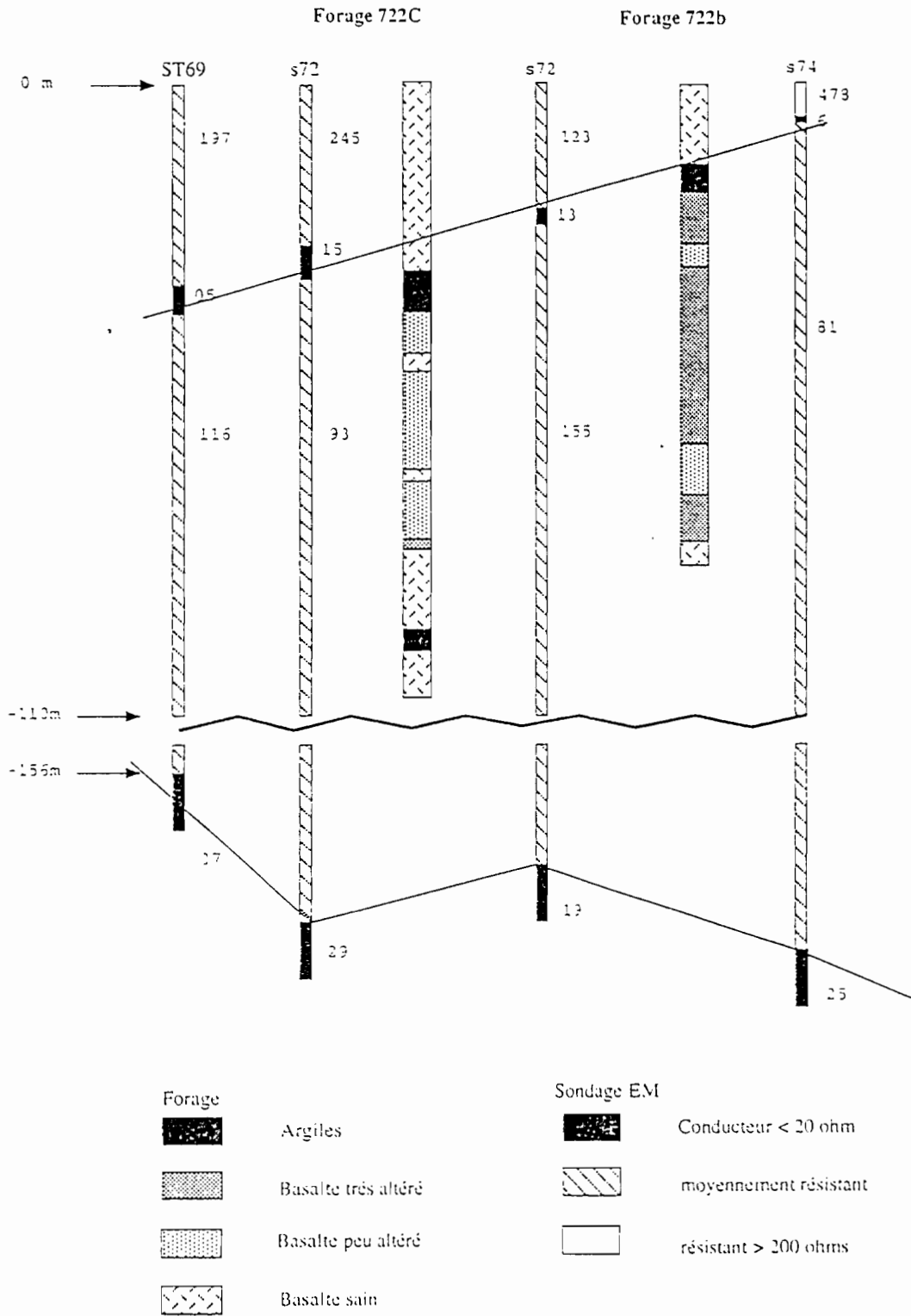
secteur, il a été réalisé un sondage CSAMT et/ou un sondage TDEM. La géologie observée sur ces ouvrages a servi de guide pour l'interprétation et la modélisation des sondages géophysiques. Le calage est évalué à posteriori par comparaison avec le modèle géoélectrique final choisi au terme de la modélisation. Pour tenir compte de la représentation géoélectrique nécessairement simpliste d'un milieu stratifié complexe, nous avons recherché une expression simple de chaque description lithologique (série volcanique distinguée selon différents états d'altération). Ceci permet d'obtenir des logs comparables aux modèles géophysiques obtenus.

Les logs géologiques et géophysiques sont présentés en figure 5 établie d'après les forages réalisés récemment dans le cadre du projet FAC (F722 b et 722 c).

Dans l'ensemble les modèles géoélectriques traduisent les principales distinctions volcanologiques. Elles sont représentées par trois terrains principaux:

- 1 • Un premier terrain moyennement résistant ($33 < \rho > 600$ ohm.m entre 0 et 40m de profondeur) pour les formations de la série récente. Les deux méthodes employées, en particulier le CSAMT, discernent mal cette formation superficielle dont la résistivité obtenue semble correspondre à une équivalence sur trois couches (sol, coulées volcaniques non saturées puis saturées) distinguables dans la série récente. Les résistivités obtenues varient en fonction de l'épaisseur relative de chacune de ces couches. Les valeurs les plus basses apparaissent dans la partie sud d'un axe Cresson-ville/Beaux Songes (figure 6).
- 2 • Le deuxième terrain présent sous une mince couche très conductrice est attribuable aux formations de la série intermédiaire. Ce terrain présente des résistivités moyennes de 184 ohm.m ($61 < \rho < 391$ ohm.m) . Des variations latérales de résistivité sont notables. Ainsi, sur le site des forages 722b et 722c, la résistivité augmente sensiblement du nord vers le sud (sondage S74 vers S71). Cette tendance est cohérente avec la variation latérale de l'état d'altération des formations observées sur les forages 722b (basalte altéré et très altéré) et 722c (basalte altéré ou sain)
- 3 • Enfin, un substratum conducteur de résistivité moyenne 29 ohm.m ($3 < \rho < 105$) est rencontrée à une profondeur supérieure à 150m. Cette profondeur est plus importante que celle des formations attribuées à la phase ancienne dans les deux forages , elle pourrait correspondre à un faciès différent dans la série ancienne (zéolitisation?). Ce substratum s'approfondit vers le sud pour former un thalweg, dont l'axe est défini aud droit du sondage S75 sur le profil de la figure 3.

Analyse des sondages CSAMT S72, S74 et TDEM
ST69, ST 71
calés sur les forages 722b et 722c



Certaines couches géoélectriques n'ont pas de signification volcanologique. Il s'agit essentiellement:

- des formations volcaniques situées au dessus du niveau piézométrique (résistivité supérieure à 400 ohm.m), très superficielles, elles ne sont détectés que par le TDEM et par souci d'homogénéité, elles ont été regroupés avec le niveau sous-jacent dans l'interprétation.
- un niveau altéré et argilisé situé sous la surface piézométrique, de résistivité moyenne 7 ohm.m ($2 < \rho < 35$ ohm.m), il est interprété comme une interface de type paléosol entre la phase récente et la phase intermédiaire, et se situe à une profondeur moyenne de 24 m ($2,5 < \text{profondeur} < 40$ m) avec une épaisseur moyenne de 2 m (1 à 6m).

Cartographie du substratum conducteur

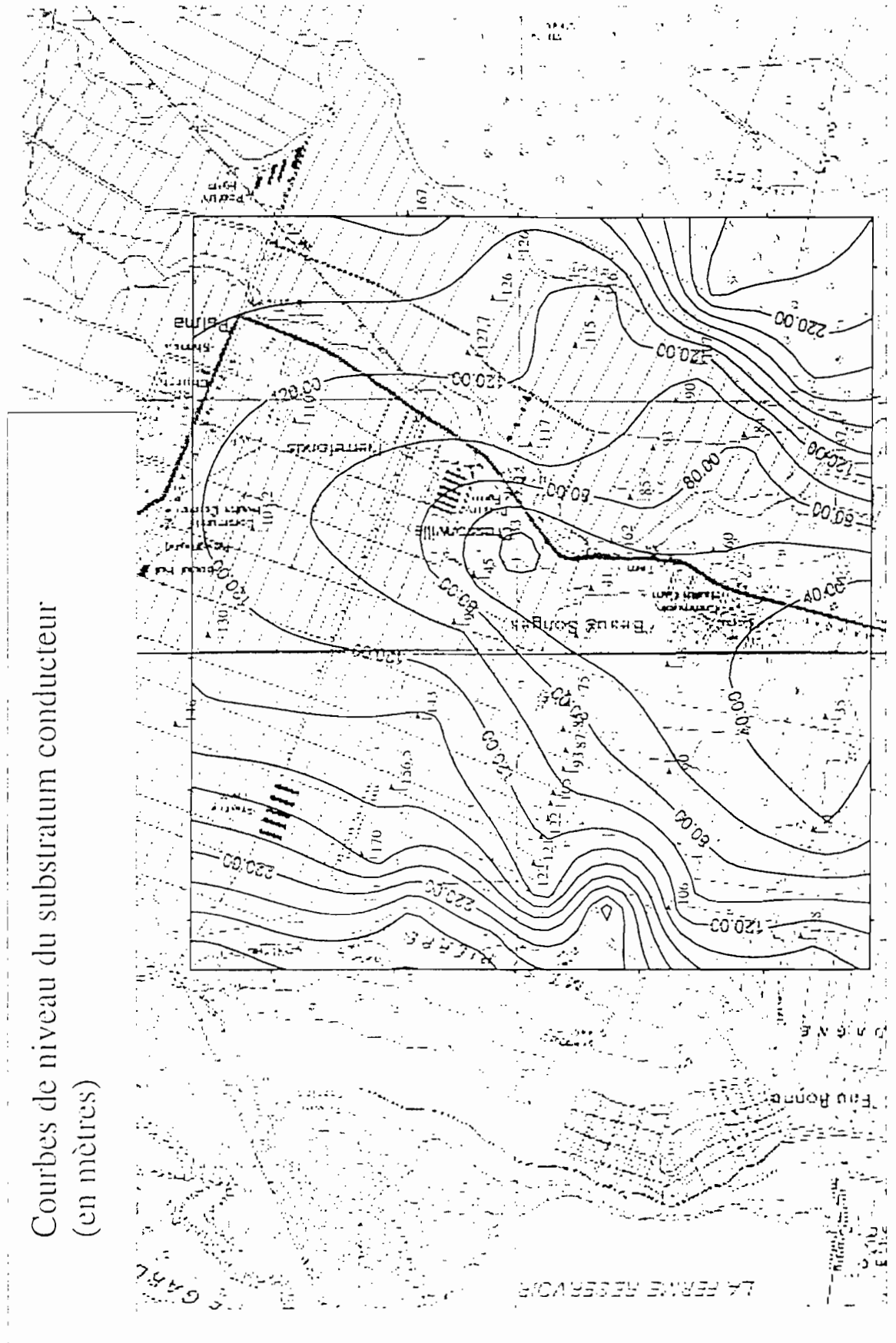
La figure 6 présente la surface topographique du toit de la série ancienne telle qu'elle peut être déduite des profondeurs du substratum conducteur obtenues par les modélisations effectuées. En exprimant l'altitude des points en mètres au dessus du niveau de la mer, les courbes de niveau observées permettent de visualiser l'axe d'un thalweg creusé dans les formations anciennes puis comblé par les coulées des séries intermédiaire et récente. L'altitude de cette topographie augmente rapidement vers l'Est avec un fond de vallée situé à 35m à l'ouest de Beaux Songes et passant à 110m au niveau de Pierrefonds.

Implication hydrogéologique.

La reconnaissance et la cartographie des formations géoélectriques du secteur de Beaux Songes permettent de préciser la géométrie de l'aquifère volcanique.

La signification hydrogéologique des différents niveaux définis par la géophysique s'appuie sur l'hypothèse d'une relation résistivité/perméabilité des formations. En l'absence d'eau saumâtre interstitielle, les faibles résistivités sont interprétées comme significatives de la présence d'argile ou d'une minéralisation secondaire conductrice (e.g. chlorite ou zéolite) colmatant la porosité primaire de la formation. Sur le secteur prospecté, l'absence d'eau saumâtre d'origine directement marine est confirmée par l'altitude des interfaces conductrices observées systématiquement au dessus du niveau de la mer.

figure 7: Cartographie du substratum de Beaux Son;



Courbes de niveau du substratum conducteur
(en mètres)

Ainsi la baisse de résistivité des formations est associée à une diminution de la perméabilité et les résistivités inférieures à 30 ohm.m peuvent être considérées représentatives des formations semi perméables ou imperméables, en fonction de leur épaisseur.

Deux caractéristiques principales définissent l'aquifère de Beaux Songes.

1 • Le substratum conducteur (épaisseur "infinie") identifié au sein des formations anciennes forme le mur de l'aquifère. Sa morphologie est caractéristique d'une paléovallée dont la topographie est évaluée sur la figure 6.

2 • La couche conductrice attribuée au toit de la série volcanique intermédiaire est présente sur toute la zone. Elle peut contribuer à stratifier l'aquifère en séparant 2 nappes, l'une libre dans les formations volcaniques récentes avec une épaisseur variable, de 2m dans la partie sud à 40 m dans la partie nord, et l'autre, plus ou moins captive sous ce terrain conducteur (épaisseur moyenne 2m). Elle se développe dans les formations de la phase intermédiaire et vraisemblablement une partie de la phase ancienne. Son épaisseur moyenne est de 111 m, variant de 40 m près des versants actuels à 186 m dans l'axe de la paléovallée.

III.2. SECTEUR DE MOKA

III.2.1. Modélisation et interprétation géophysique synthétique

La zone d'étude de Moka est montrée sur la figure 8 avec la position des stations EM. Deux profils CSAMT orientés grossièrement Nord-Sud, quasiment parallèles, et distants de 600 m, ont été réalisés, comportant chacun une dizaine de stations espacées d'environ 400 m ; soit au total 22 sondages CSAMT auxquels s'ajoutent des sondages TDEM implantés soit sur des sites AMT soit entre les 2 profils.

Sondages TDEM

Onze sondages TDEM (14T1 à 19T2) ont été effectués dans ce secteur (Fig. 8). Les résultats des mesures sont montrés sur les figures X4-1 à 3, annexe 3, avec leur interprétation 1-D et leur modèles équivalents. On constate que, mis à part le terrain superficiel, la stratification verticale des couches est mal définie, avec des variations importantes de résistivité et d'épaisseur des terrains sous-jacents. Néanmoins, toutes ces stations sont caractérisées par un niveau conducteur (< 20 ohm-m) en profondeur.

Sondages CSAMT

Un ensemble de 22 sondages (131 à 192) a été réalisé dans ce secteur (Fig. 8). Les résultats des mesures pour chaque sondage sont représentés en annexe 4 (Fig. X5-1 à 6). A l'exception des sondages 131, 132, 192 et 133, la modélisation 1-D met en évidence une structure à 4 terrains: moyennement conducteur / conducteur / moyennement résistant / conducteur. L'analyse des modèles équivalents montre que les interfaces sont bien résolues.

Une coupe géoélectrique le long du profil Moka I (sites 131 à 182) est présentée sur la figure 9 qui montre successivement, de la surface vers le bas, les niveaux géoélectriques suivants:

- *une couche moyennement conductrice, de résistivité pratiquement uniforme variant entre 40 et 70 ohm-m. Son épaisseur est variable, mais elle a tendance, à partir de la station 141, à augmenter vers le Sud jusqu'à la station 181 où on assiste à une diminution brutale entre 181 et 182. Entre les stations 131 et 133, l'épaisseur de cette couche augmente également vers le Sud ;

- * une couche conductrice (10-20 ohm-m) d'épaisseur restreinte (<10 m) est présente sur l'ensemble du profil à l'exception des stations 131 à 133 ;

- * une couche moyennement résistante (180- 70 ohm-m) ayant une épaisseur maximum au droit des stations 141-166 et qui s'amincit considérablement vers le Sud à partir de la station 164. Cette couche disparaît brutalement vers le Nord au niveau de la station 133 ;

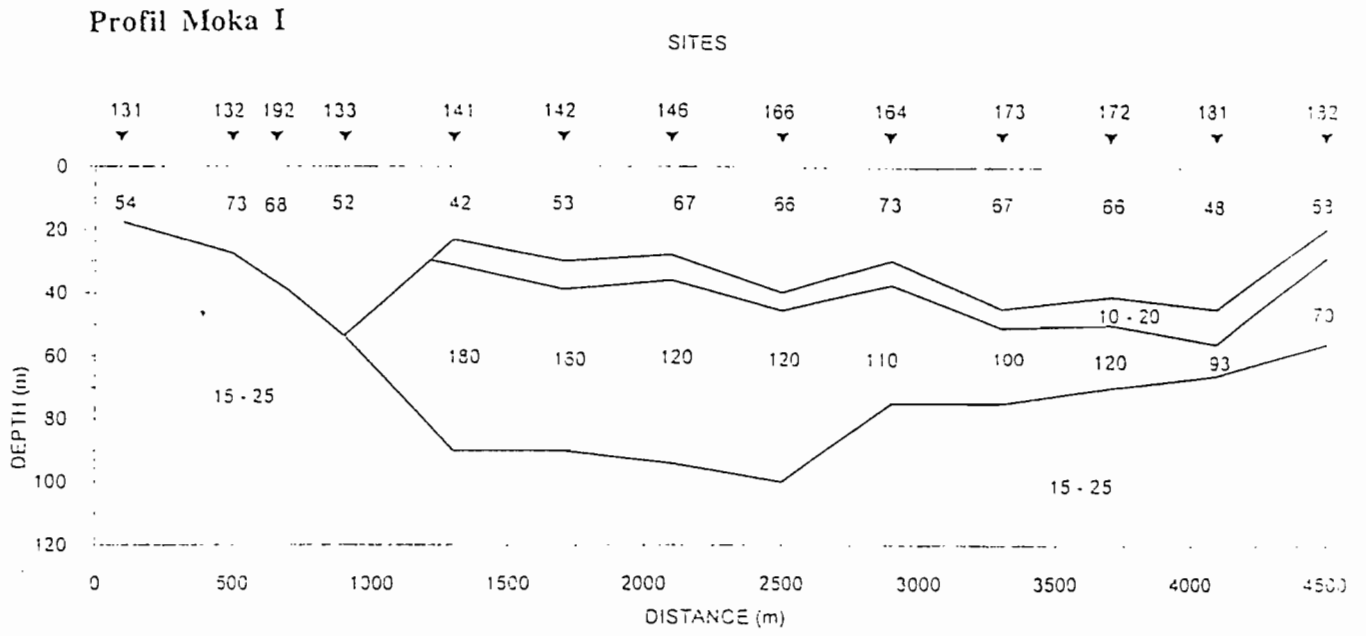
- * le substratum conducteur (15-25 ohm-m) visible sur tout le profil.

Les sondages CSAMT le long du profil Moka II (sites 191 à 183)(fig. 9) présentent les mêmes caractéristiques (Fig X5, annexe 4) que ceux du profil I, avec une stratification à 4 couches. Mais très peu de variations latérales existent entre les stations, sauf entre 161 et 171. Sur ce profil on peut voir :

- * la première couche, moyennement conductrice, avec une résistivité comprise entre 40 et 65 ohm-m. Son épaisseur varie très peu d'une station à l'autre, elle est de l'ordre de 20 m ;

- * la deuxième couche conductrice (10-20 ohm-m), de faible épaisseur, mais elle s'épaissit brusquement au Sud de la station 145 (~ 30 m) pour finalement s'amincir de nouveau à partir de la station 184 ;

figure 9: Profils géophysiques M I et M II de A



Profil Moka II

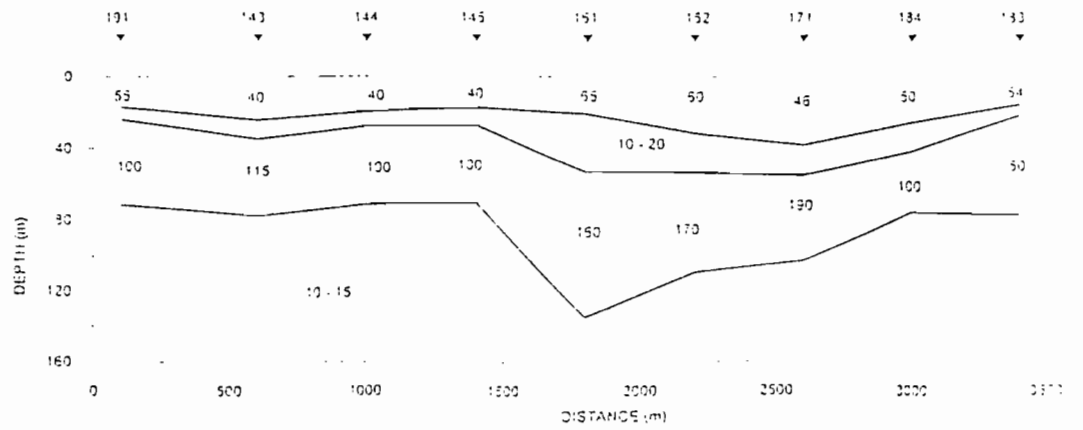


Figure 9: Profils géophysiques M I et M II de Moka

* la troisième couche moyennement résistante avec une résistivité comprise entre 100 et 190 ohm-m, à l'exception de la station 183 où la résistivité est beaucoup plus faible (~ 50 ohm-m). L'épaisseur (~ 50 m) de cette couche varie très peu, sauf au niveau des stations 161-171 où l'on constate une augmentation brutale de l'épaisseur qui atteint 90 m au droit de la station 161 ;

* la quatrième couche représente le substratum conducteur de faible résistivité (10-15 ohm-m), présent sous toutes les stations.

III.2.2. Interprétation géologique et hydrogéologique

Validation sur deux forages

Pour chaque sondage, il existe une multitude de modèles géoélectriques possibles, plus ou moins complexes et avec des variantes. En général le choix s'est fait (i) vers le modèle le plus simple, c'est à dire celui faisant intervenir le moins de couches géoélectriques, (ii) en vérifiant la continuité avec les modèles des sondages voisins, (iii) en calant un ou deux sondages EM sur des forages existants dans la zone.

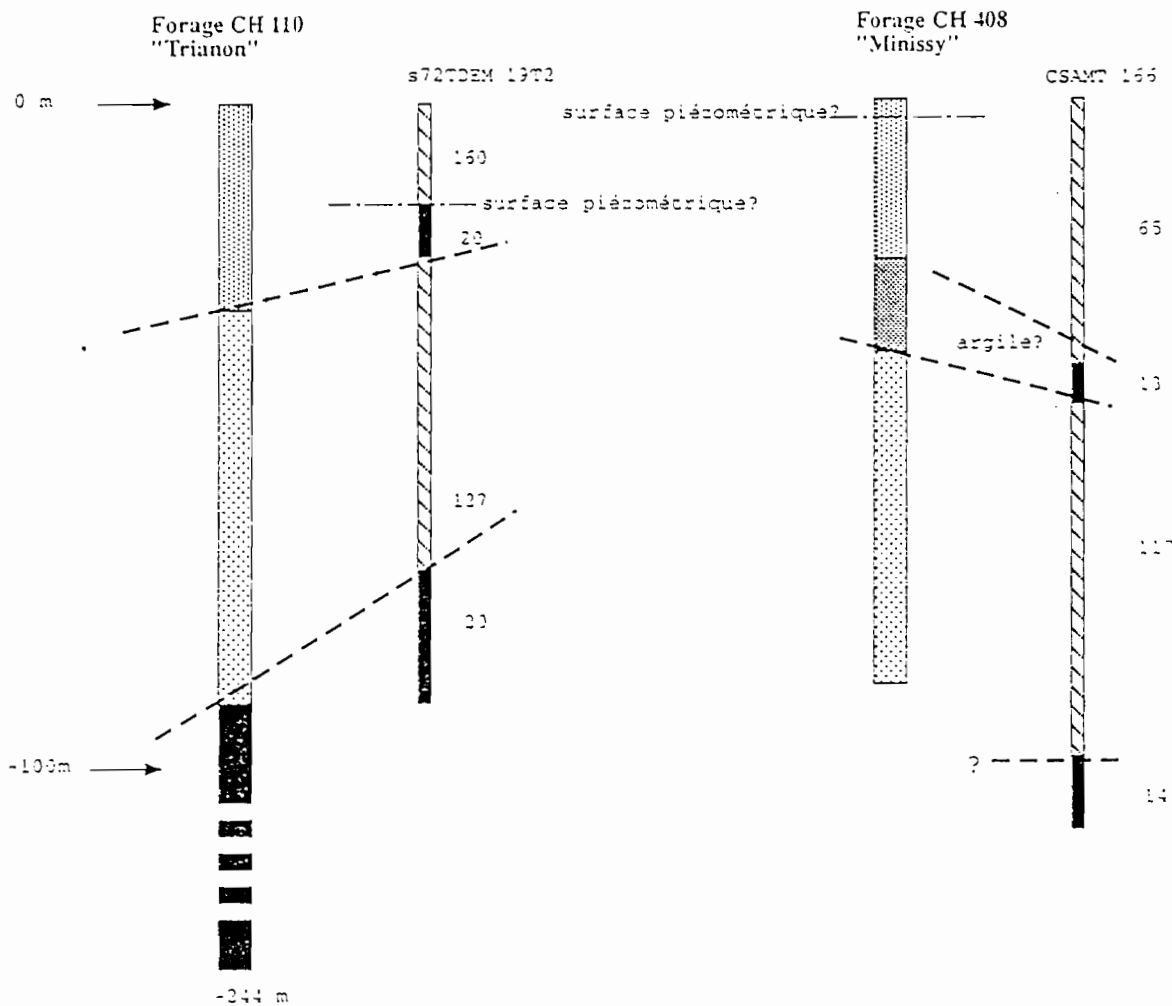
Bien entendu, la colonne lithologique très précise, fournie pour un forage ne peut être utilisée directement pour l'interprétation d'un modèle géoélectrique simple et il convient de regrouper les différents termes lithologiques en unités superposées de résistivité globalement différente. Certes la précision n'est pas parfaite, mais cela permet de valider des options choisies pour la modélisation.

Dans ce but nous avons effectué un sondage TDEM sur le forage CH(corehole)110 et un sondage CSAMT près du CH 408 (figure 8). La modélisation et le calage nous amènent au résultat montré sur la figure 9. Il apparaît, dans les forages, 3 unités dont la plus profonde n'est atteinte que par CH110. De haut en bas on distingue:

1- Un manteau d'altération très épais (30 à 40m) qui présente une résistivité moyenne en zone désaturée (voir CH110), signe d'un faible taux d'argile (sol ferrallitique ?), et une résistivité plus faible quand la nappe est proche de la surface (voir CH408). Il apparaît de façon incontournable sur le modèle CSAMT 166, une mince couche très conductrice autour de 40 m de profondeur qui ne peut représenter qu'un niveau d'altération très argileux développé sur les coulées sous-jacentes.

2- La série des coulées dites intermédiaires, plus ou moins altérées, saturées, avec une résistivité moyenne de 20 ohm.m. Son épaisseur est importante sur toute la zone, autour de 90 m d'après CH110. Noter l'imprécision du TDEM à cette profondeur.

Analyse des sondages CSAMT M166 et TDEM M19T2 calés sur les forages Ch 110 et Ch408



Forage		Sondage EM	
	Deep red tuffs sur coulées intermédiaires		Conducteur < 20 ohm
	Idem très altéré		moyennement résistant
	Série intermédiaire +/- altérée		résistant > 200 ohms
	Série ancienne, zéolitisée, argilisée		

3- Le substratum des basaltes anciens très argilisés, chloritisés et/ou zéolitisés, de faible conductivité (de 10 à 20 ohm.m). Le CSAMT s'avère efficace pour situer le toit de ce substratum.

Les modèles géoélectriques choisis pour la zone de Moka seront donc, sauf pour les sondages Nord près des reliefs, des 4 terrains puisque la présence de la couche mince intermédiaire très conductrice s'avère généralisée.

Interprétation des profils géoélectriques

La comparaison des deux profils géoélectriques CSAMT (MI et MII), grossièrement Nord-Sud, permet d'appréhender la structure géologique de la zone:

1- une superposition de quatre couches géoélectriques que l'on interprète de bas en haut comme un substratum de basalte ancien, une série de coulées de l'intermédiaire, une mince couche argileuse au toit de ces coulées, et enfin un épais manteau d'altération en partie saturé;

2- une topographie irrégulière du toit du substratum conducteur. Un axe d'approfondissement (paléo-vallée?) est observé au droit des stations 166 (MI) et 161 (MII);

3- une géométrie très différente au nord du sondage 141, le long du profil M1 seulement (le profil MII n'atteint pas la zone de Moka-ville). Il faut admettre la présence d'un accident qui affaisse le substratum ancien entre 133 et 141, sans affecter le profil MII; sa direction est probablement NW- SE.

Implications hydrogéologiques

Comme pour le secteur de Beaux Songes, il est difficile de faire intervenir des eaux saumâtres d'origine marine pour expliquer la présence de couches très conductrices à de telles altitudes. Il faut donc admettre :

1- la présence d'un substratum de coulées anciennes argilisées, chloritisées et/ou zéolitisées, semi-perméable voir imperméable, qui porte l'aquifère ;

2- la possibilité d'une stratification de l'aquifère avec une mince couche argileuse au toit des coulées intermédiaires saines, qui séparerait une nappe superficielle développée dans le manteau d'altération et une nappe inférieure, au potentiel plus important (transmissivité plus importante) dans les coulées saines ;

3- que les zones d'approfondissement du toit du substratum conducteur sont à priori favorables. L'axe passant par les sondages 166 et 161 mérite une exploration préférentielle.

CONCLUSION

La prospection géophysique par méthode Audio-Magnétotellurique a permis de prospecter, à plus de deux cent mètres de profondeur, le toit des formations volcaniques de la phase ancienne. Dans cette tranche d'investigation, cette méthode, à faible pouvoir de résolution dans les terrains superficiels, nécessite généralement l'utilisation conjointe d'une autre technique adaptée aux faibles profondeurs. La méthode TDEM a été utilisée pour mieux définir les premiers terrains dont la géométrie et les résistivités interviennent dans la modélisation plus profonde établie à partir de l'AMT. Pour éviter à l'avenir ce "tandem", nous avons choisi d'utiliser un nouveau matériel d'audio magnétotellurie dont nous avons pu tester le pouvoir de résolution des premiers terrains en vue d'une utilisation non couplée. Ce matériel, basé sur la méthode CSAMT est censé couvrir les possibilités conjointes du TDEM et de l'AMT. L'équipement "stratagem" EH4 de Geometrics s'est avéré à la fois fiable et pratique et les performances annoncées, testées avec le TDEM de Geonics pour la partie source contrôlée, sont confirmées.

Dans les délais impartis, les objectifs fixés pour cette mission ont été atteints, c'est à dire une cartographie à maille serrée des couches géoélectriques dans le secteur de Beaux Songes et deux grands profils dans la plaine de Moka.

Les principaux résultats, en terme d'hydrogéologie, permettent de mieux cerner la géométrie des aquifères des deux secteurs prospectés.

- Sur la zone de Beaux Songes, la topographie du substratum conducteur formant le mur de l'aquifère a pu être cartographiée. Un mince terrain conducteur intermédiaire généralisé pourrait contribuer à stratifier cette structure en séparant 2 nappes.

- Sur la zone de Moka, les mêmes caractéristiques sont encore observées et une zone d'approfondissement du toit du substratum conducteur est identifiée.

BIBLIOGRAPHIE

Berdichevsky M.N. et Dimitriev V.I. (1976). Basic principles of interpretations of magnetotelluric sounding curves. In: A. Adam Ed, Geoelectric and Geothermal Studies, Akademiai Kiado, Budapest, pp. 165-221.

Cagniard L. (1953). Principe de la méthode magnéto-tellurique, nouvelle méthode de prospection géophysique. Ann. Géophys., 9, 95-125.

Courteaud M., Ritz M., Descloîtres M., Robineau B. & Coudray J. (1996). "Cartographie audiomagnétotellurique du biseau salé en milieu volcanique insulaire: la région littorale du Baril, île de la Réunion", *C. R. Acad. Sci. Paris.*, t. 322, série IIA, p. 93-100..

Descloîtres M., B. Robineau, M. Courteaud & M. Ritz, (1997) "Electrical structure beneath the collapsed eastern flank of Piton de la Fournaise volcano, Reunion Island. Implications to the quest for groundwater"; *Water Ressources Research.*, Vol. 33, N°1, p. 13-19.

Fitterman D.V. et Stewart M.T. (1986). Transient electromagnetic sounding for groundwater. Geophysics, 51, 995-1005.

Goldstein M.A. et Strangway D.W. (1975). Audio frequency magnetotelluric with a grounded dipole source. Geophysics, 40, 669-683.

Giorgi L. (1997) Etat des connaissances géologiques et hydrogéologiques de l'Ile Maurice, communication au "World day for water-1997" Université de Maurice

Interpex Ltd. (1989). TEMIX GL user's manual: Transient electromagnetic data interpretation software.

Interpex Ltd. (1993). EMIX MT user's manual: Magnetotelluric data interpretation software.

Join J.L., Ritz M. et Robineau B. (1996). Prospection électromagnétique des ressources en eau à l'Ile Maurice. Etude de faisabilité. Rapport LSTUR et ORSTOM.

Kaufman A.A. et Keller G.V. (1983). Frequency and transient soundings. Elsevier Science Publishers.

Keller G.V. et Frischknecht F.C. (1966). Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon, Oxford.

McNeill J.D. (1980). Applications of transient electromagnetic techniques. Technical note, Geonics Ltd.

Pellerin L. et Hohmann G. (1990). Transient electromagnetic inversion: a remedy for magnetotelluric static shifts. *Geophysics*, 55, 1242-1250.

Perroud B. (1982). Etude volcano-structurale des îles Maurice et Rodrigue (Océan Indien Occidental). Origine du volcanisme. Thèse de doctorat de spécialité, Université de Grenoble.