

ORSTOM

**INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE
SCIENTIFIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT
EN COOPERATION.**

BP 1386 DAKAR SENEGAL.

**TEL :221 32 34 80
FAX :221 32 43 07**

LABORATOIRE DE GEOPHYSIQUE.

**PROSPECTION GEOPHYSIQUE PAR LA METHODE TDEM
DES AQUIFERES DE LA CALDEIRA DU VOLCAN FOGO
(ARCHIPEL DES ILES DU CAP-VERT).**

RAPPORT DE MISSION

**M.DESCLOITRES
M.RITZ**

Dakar, Août 1994.

Remerciements:

Nous tenons à remercier:

l'INGRH, Praia,
l'INIT, Praia
le BURGEAP,
le Gabinete FOGO-BRAVA,

pour le concours qu'ils ont apporté à cette étude, et particulièrement pour nous avoir communiqué leur expérience des aquifères de Fogo.

1 INTRODUCTION.

Ce compte-rendu présente les principaux résultats de la mission géophysique effectuée par le laboratoire de géophysique de l'ORSTOM de Dakar dans la caldeira du volcan Fogo (Archipel du Cap-Vert) du 5 avril au 4 mai 1994. L'objectif principal de cette campagne de mesures était de déterminer la géométrie des aquifères de la caldeira en étudiant les variations des résistivités du sous-sol, et de tenter d'évaluer le potentiel aquifère de cette structure.

2. ETUDES ANTERIEURES.

Quelques études géophysiques ont été menées auparavant à Fogo et dans la caldeira. On peut citer celles de la C.G.G. (1972, 1984) et celles entreprises par l'université de Lund en 1982 et 1988. Les méthodes géophysiques employées ont été essentiellement les sondages électriques à courant continu et la méthode électromagnétique Very Low Frequency (V.L.F.). En 1993, l'ORSTOM a réalisé une mission de reconnaissance en utilisant la méthode V.L.F et la méthode électromagnétique Audiomagnétotellurique (AMT).

Les sondages électriques à courant continu ont permis de dresser une image géoélectrique du sous-sol sur certains profils, mais peu de sondages ont été réalisés dans la caldeira elle-même. Cette méthode et les études hydrogéologiques ont néanmoins permis d'établir les premières hypothèses des circulations d'eau souterraine sur les flancs du volcan Fogo. Un modèle de fonctionnement hydrogéologique général de l'île a été dressé (BURGEAP, INIT, Lund).

La méthode V.L.F testée par l'université de Lund a permis d'obtenir une image partielle de la distribution des résistivités apparentes dans la caldeira. Cette méthode se heurte cependant d'une part à des difficultés de mise en oeuvre sur le terrain (contact des électrodes, qualité de réception des ondes) et d'autre part à des difficultés d'interprétation autre que qualitative. L'ORSTOM en 1993 a rencontré des difficultés semblables. La méthode V.L.F, si elle reste rapide à mettre en oeuvre, n'est pas, à notre avis, une méthode suffisamment précise pour cartographier de façon précise et sûre les terrains aquifères.

La méthode A.M.T, qui permet une profondeur d'investigation importante (supérieure à 2 Km), a aussi été testée par l'ORSTOM en 1993. Elle s'est heurtée à des difficultés de mise en oeuvre sur le terrain (essentiellement à cause des mauvais contacts des électrodes et des effets de relief possibles). De plus, l'appareillage que nous avons utilisé ne permettait pas un enregistrement précis du signal. Les résultats obtenus ne se prêtaient pas à une analyse fiable. Le choix de l'ORSTOM s'est porté, en 1994, vers une méthode géophysique E.M rapide: la méthode T.D.E.M.

3. METHODE T.D.E.M.(Time Domain Electro Magnetism).

La méthode T.D.E.M est une méthode électromagnétique. Elle permet de réaliser des sondages géophysiques pour caractériser les résistivités ρ du sous-sol. On trouvera en annexe III une description succincte de celle-ci.

Un de ses principaux avantages est l'utilisation d'une source électromagnétique contrôlée produite par un générateur. Elle est particulièrement adaptée à la détection des terrains conducteurs, comme les terrains aquifères.

4. LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE ET DES POINTS DE MESURES T.D.E.M.

La zone étudiée s'étend sur 52 km², entre les coordonnées X= 779,784.75 et Y= 1650.5,1695.5 (cf carte de la figure 1). L'annexe n° 1 présente une vue en trois dimensions de la structure de la caldeira.

Les premières séries de points de mesure T.D.E.M se répartissent selon trois profils presque rectilignes (fig 1):

- "CAL A", comprend 24 stations et est orienté est-ouest au centre de la zone.
- "CAL B", comprend 11 stations et est orienté sud-ouest nord-est, au sud de la zone.
- "CAL C", comprend 5 stations et est orienté nord-ouest sud-est, au nord de la zone.

Le pas de mesure entre les stations est variable. Il est de 100 mètres pour CAL A, 200 mètres pour CAL B. Pour CAL C, à cause des difficultés de mise en oeuvre dans les coulées volcaniques de type AA, un pas de 500 mètres a été choisi.

Les autres séries de points T.D.E.M se répartissent en deux arcs de cercle principaux correspondant aux contours dessinés par la caldeira. Nous avons réalisé des profils restreints, plus ou moins perpendiculaires à la paroi, comprenant deux à six stations espacées de 100 à 150 mètres. Chaque profil est en général distant de 300 mètres du voisin.

Cette disposition des stations de mesures a été guidée par les résultats des sondages géophysiques: le premier point est toujours réalisé au plus proche de la paroi. Si les courbes de sondages montrent clairement la présence de terrains conducteurs relativement superficiels en ce point, une deuxième station est réalisée 100 à 150 mètres plus loin, en direction du Pico. Et ainsi de suite jusqu'à obtenir une courbe de sondage identique à celles obtenues dans la partie centrale de la caldeira, courbes qui ne montrent pas de terrains conducteurs superficiels.

La numérotation des points de mesure est la suivante:

- "ACHA" 1 et 2 sont deux stations situées au sud-est de la zone.
- "CASA" 1 à 23 se trouvent dans le quart sud-ouest de la caldeira principale.
- "BOC" 1 à 20 et "CHA" 1 à 14 se situent dans le quart nord-ouest de la caldeira principale.
- "BAN" 1 à 18 se situent dans la caldeira secondaire au nord de la zone.

Au total, 117 sondages géophysiques T.D.E.M ont été réalisés sur le site. Leurs coordonnées X, Y, Z sont répertoriées en annexe II.

5. ACQUISITION DES DONNEES ET INTERPRETATION.

5.1. ACQUISITION DES DONNEES.

L'appareil utilisé pour cette étude est un PROTEM 47 de GEONICS. Spécialement conçu pour la sub-surface, il permet de mesurer la décroissance du champ magnétique induit selon des canaux compris entre 0.007 et 7 ms, qui correspondent à trois cadences: 237, 62.5 et 25 hz.

VOLCAN FOGO. TOPOGRAPHIE DE LA PARTIE SOMMITALE

LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE.
POSITION DES POINTS DE MESURE TDEM.

Nord

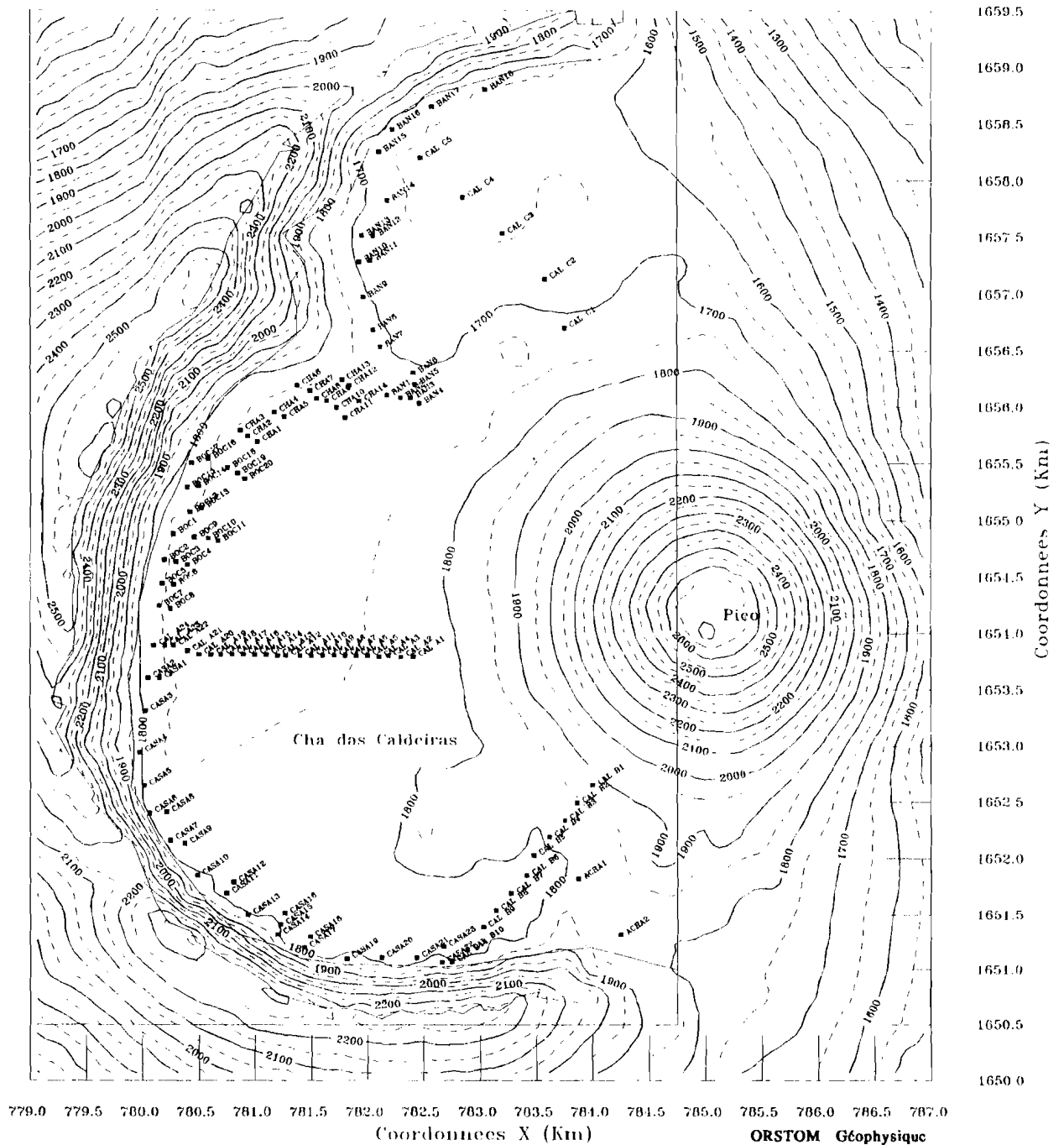


Figure 1: LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE.
Les carrés noirs représentent les points de sondage TDEM.

La profondeur d'investigation du modèle 47 est estimée entre 5 et 150 mètres, mais est bien supérieure si les premiers terrains sont résistants, comme c'est le cas pour cette étude.

Nous avons choisi le dispositif de sondage centré, en déployant à chaque station une boucle de câble de 100 mètres par 100 mètres, qui garantit une pénétration maximale pour cet appareillage.

Pour améliorer la qualité des résultats, cinq séries de mesures au moins ont été réalisées et moyennées aux cadences de 237, 62.5 et 25 Hz.

5.2. HYPOTHESES D'INTERPRETATION.

Les modélisations ont été réalisées avec le logiciel TEMIX GL d'INTERPEX Ltd. Il s'agit d'une interprétation interactive utilisant un modèle géoélectrique 1D (milieu stratifié horizontalement). Les variations latérales importantes des résistivités, si elles existent, n'ont pas été analysées. L'hypothèse d'une stratification horizontale des résistivités est cependant celle qui représente généralement le mieux la géométrie des aquifères dans ce type de terrain.

La modélisation des courbes T.D.E.M est, comme toute interprétation géophysique, soumise à des hypothèses de départ. Aucune étude par forage n'ayant été faite dans la caldeira (à l'exception du forage de l'INIT pour lequel il n'y a d'autre information que la température de fond de puits), aucun calage sur forage des résistivités des terrains n'est possible dans la zone de la caldeira.

Cependant, nous avons réalisé quelques essais en bord de côte au nord de S.Filipe (Praia Ladrao) au plus proche de forages hydrauliques connus. De plus, notre expérience sur d'autres sites volcaniques avec cet appareillage (Ile de la Réunion), ainsi que les données disponibles dans la littérature permettent de dégager les tendances suivantes, qui nous ont servies de guide pour l'interprétation des courbes de sondage TDEM:

- Les terrains volcaniques basaltiques sont, en l'absence d'eau, résistants (entre 1000 et 15000 Ohm.m).

- Les aquifères au sein des terrains volcaniques constitués d'intercalation de coulées massives et de scories présentent des résistivités comprises entre 75 et 300-500 Ohm.m, si l'eau est peu ou pas minéralisée.

- C'est la minéralisation de l'eau qui détermine de façon prépondérante les variations de résistivité des terrains volcaniques aquifères.

La distinction entre les différents terrains aquifères est, dans la plupart des cas, possible avec la méthode T.D.E.M qui permet une excellente résolution des terrains conducteurs. L'harmonisation de l'interprétation est faite de proche en proche pour chaque sondage.

5.3. EXEMPLE DE RESULTATS.

Les stations T.D.E.M. CAL A 21, CASA 2, BAN 9 et CHA 12 nous fournissent les exemples des principaux types de courbes obtenues dans la zone d'étude (fig 2 et 3).

Deux types de calcul ont été utilisés pour l'interprétation: le premier est un modèle simple, deux, trois ou quatre terrains représenté en pointillés; le second est modèle dit "multi-

Figure 2: RESULTATS DES SONDAGES TDEM CAL A21 et CASA 2.

A gauche, points expérimentaux et courbe déduite du modèle (traits pleins).

A droite, modèles géophysiques. En traits pointillés, modèle 2, 3 ou 4 terrains. En traits continus, modèle multi-couches.

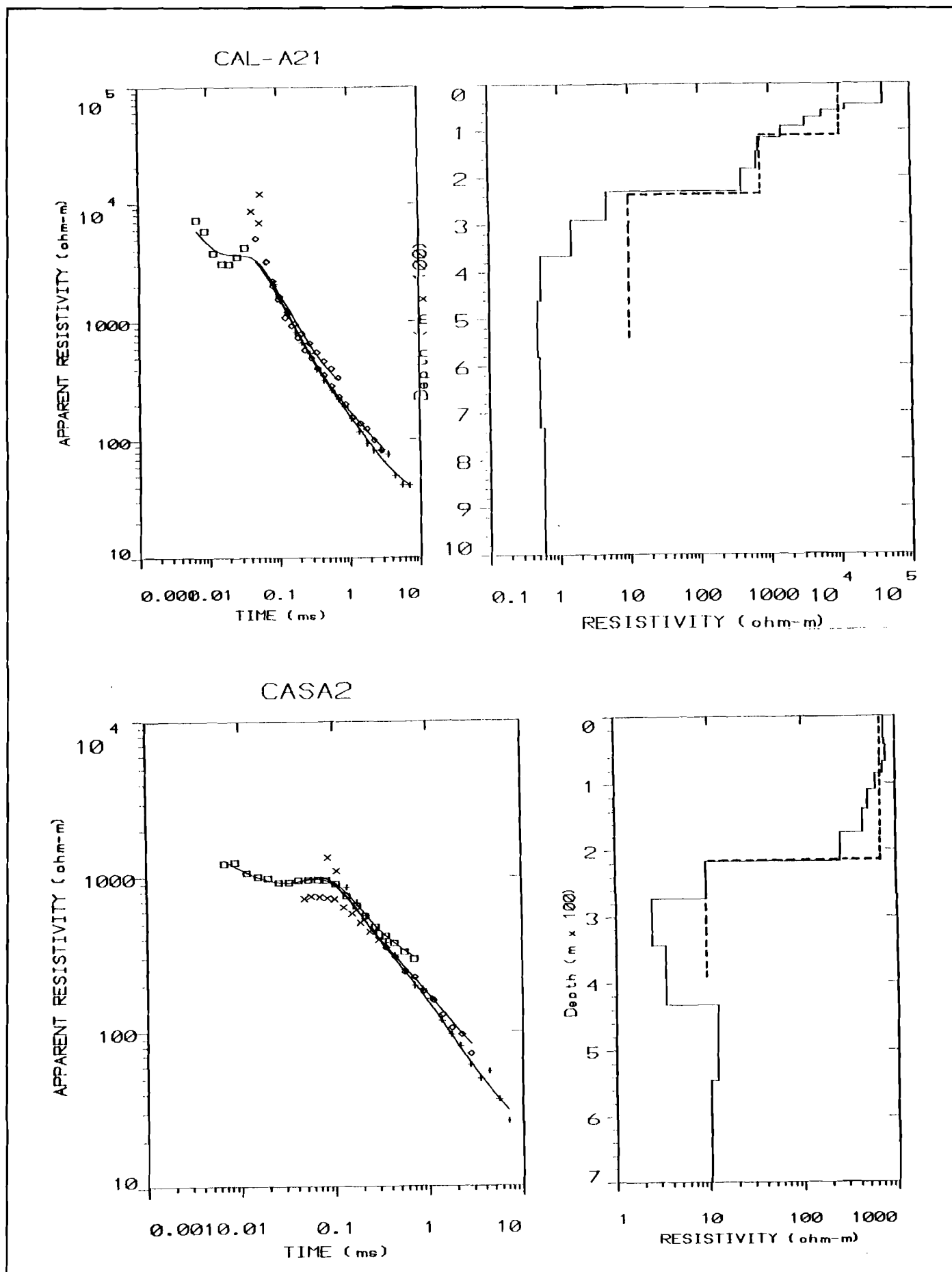
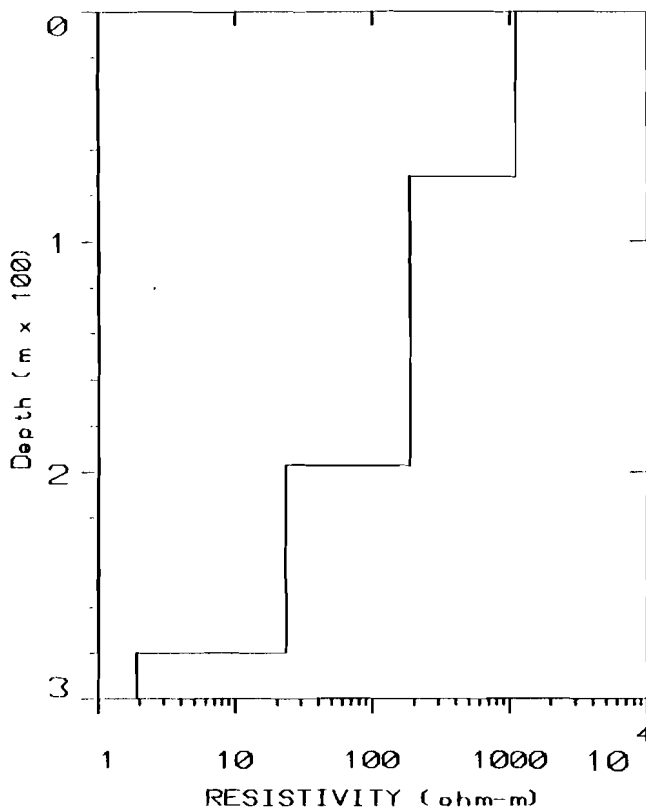
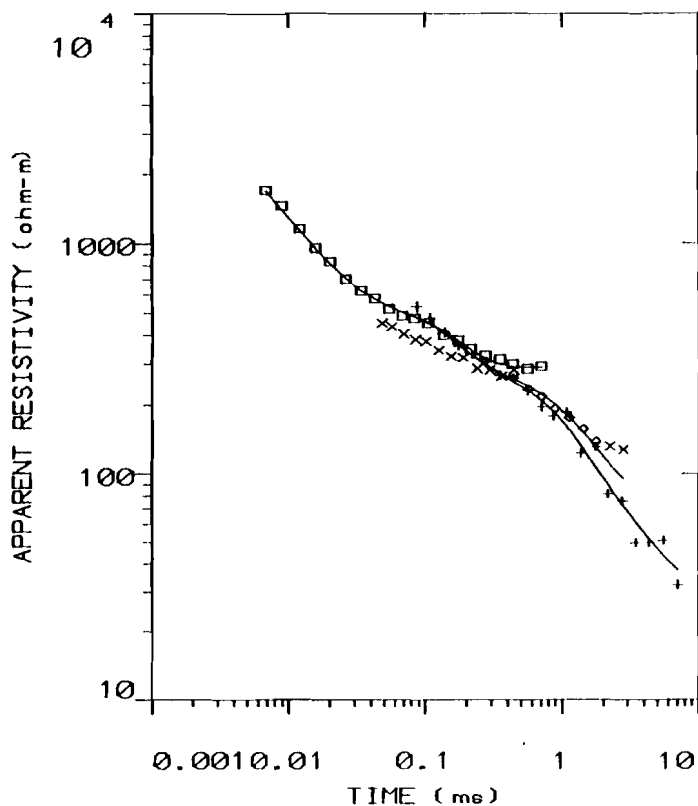


Figure 3: RESULTATS DES SONDAGES TDEM BAN 9 et CHA 12.

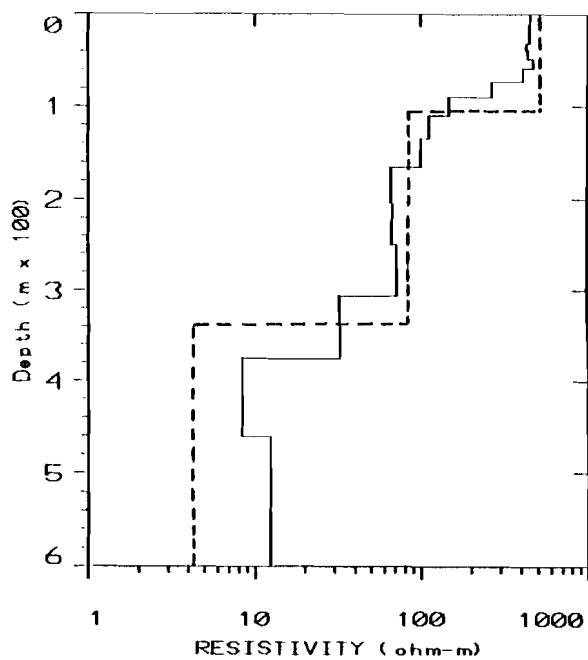
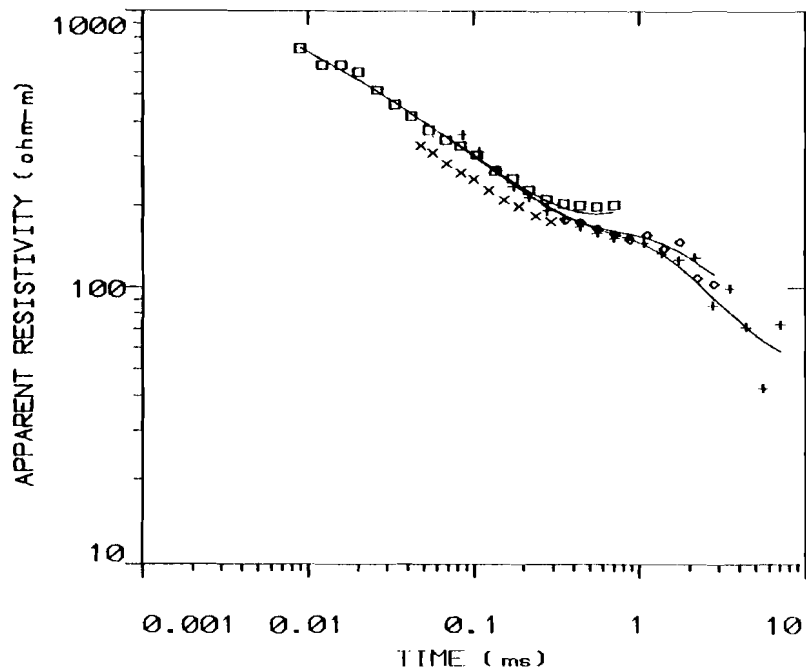
A gauche, points expérimentaux et courbe déduite du modèle (traits pleins).

A droite, modèles géophysiques. En traits pointillés, modèle 2, 3 ou 4 terrains. En traits continus, modèle multi-couches.

BAN9



CHA12



couches", en traits continus. Les deux types de calcul présentent des résultats analogues.

CAL A 21 et CASA 2 sont représentatives de la zone centrale de la caldeira. L'interprétation en 2 ou 3 terrains montre la succession des terrains suivante depuis la surface:

- le premier terrain est résistant (1000-10000 Ohm.m); son épaisseur varie entre 100 et 250 mètres en général.
- le second terrain calculé pour CAL A 21 est moyennement résistant (800 Ohm.m).
- enfin, le troisième terrain pour CAL A 21 et le second pour CASA 2 est très conducteur (10 Ohm.m) et situé à plus de 220 mètres de profondeur.

BAN 9 est un exemple d'interprétation 4 terrains:

- le premier terrain est moyennement résistant (1000 Ohm.m), de 70 mètres d'épaisseur.
- le second terrain est conducteur (200 Ohm.m), de 120 mètres d'épaisseur.
- le troisième terrain est très conducteur (25 Ohm.m), de 85 mètres d'épaisseur.
- le quatrième terrain est encore plus conducteur (2 Ohm.m)

CHA 12 est un exemple d'interprétation 3 terrains qui ressemble à celle de BAN 9, sans le troisième terrain très conducteur de 25 Ohm.m:

- le premier terrain est moyennement conducteur (700-800 Ohm.m), de 100 mètres d'épaisseur.
- le second terrain est conducteur (80 Ohm.m), de 230 mètres d'épaisseur.
- le dernier terrain est très conducteur (5-10 Ohm.m).

6. CORRELATION ENTRE RESISTIVITES ET GEOLOGIE.

La teneur en eau et la minéralisation de celle-ci jouent un rôle primordial dans les variations des résistivités. D'autres facteurs influencent ces variations: on peut citer par exemple la présence d'argile, la porosité de la roche, la température:

a) Les terrains étudiés en profondeur depuis la surface de la caldeira sont les mêmes que ceux visibles quelques centaines de mètres sous le sommet de la paroi grâce à l'affaissement. Il s'agit principalement d'une superposition de coulées massives, de scories ou de cendres, entrecoupés de dykes métriques.

La présence d'argile en grande quantité n'a pas, à notre connaissance, été décrite. Une zéolithisation des matériaux volcaniques n'intervient qu'à des profondeurs très importantes et sous des conditions particulières de température. Une chute de la résistivité dans les premières centaines de mètres peut difficilement être expliquée par une argilisation des matériaux, bien que nous ne puissions pas exclure totalement cette possibilité.

b) Une température importante, particulièrement en milieu volcanique, pourrait être un

facteur de chute de la résistivité; le forage de l'INIT (situé à 50 mètres à l'est de la station T.D.E.M. CHA 12) ne montre pas de gradient de température. Celle-ci reste stable à 19°C environ à plus de 100 mètres de profondeur.

En l'absence d'autres informations, la température ne devrait pas être un facteur influençant les valeurs de résistivités, au moins pour les terrains superficiels.

c) La porosité des roches n'est pas connue. Elle est probablement extrêmement variable, et il est logique de supposer que celle-ci dépend de la stratification due à l'empilement de matériaux volcaniques à la fois compacts ou scoriacés.

C'est donc, à priori, la présence d'eau et sa minéralisation qu'il faut invoquer pour expliquer les variations de résistivités constatées dans les premières centaines de mètres de profondeur, la porosité pouvant influencer les résistivités dans les terrains saturés. Si des forages profonds futurs détectent des argiles en quantité importante, cette hypothèse devra être partiellement révisée.

Les résistivités des terrains conducteurs décroissent de quelques centaines d'Ohm.m à moins de 10 Ohm.m. En première analyse, nous avons choisi de classer les terrains aquifères suivants:

- TYPE I: terrain volcanique partiellement ou totalement saturé d'eau pas ou peu minéralisée: 100-200 Ohm.m.(valeurs extrêmes 75 et 500 Ohm.m.).

- TYPE II: terrain volcanique saturé d'eau assez minéralisée: 20-75 Ohm.m. Ce type peut être le terrain de transition entre les types I et III.

- TYPE III: terrain volcanique saturé d'eau très minéralisée: inférieur à 20 Ohm.m. La nature de cette minéralisation n'est pas connue. Probablement due aux échanges eau-matériaux, elle est à priori favorisée par une stagnation ou un écoulement lent de l'eau dans la roche. D'autres phénomènes peuvent être invoqués, comme la circulation de fluides ou de gaz d'origine volcanique.

7. GEOMETRIE DES AQUIFERES.

Les hypothèses d'interprétation et leurs implications possibles dans la définition des aquifères de la caldeira nous conduisent à proposer un modèle hydrogéologique du site, basé sur le calcul de cartes d'isorésistivités et d'isop profondeurs.

Nous présentons dans ce rapport deux cartes et cinq coupes géoélectriques, qui permettent une première analyse de la géométrie de l'aquifère.

Remarque: Les cartes ont été calculées à l'aide du logiciel SURFER (Golden Software Inc.) sur la base d'une grille de 100 X 150 points, puis lissées par calcul matriciel. Ce type de calcul, s'il a l'avantage de pouvoir extrapoler les résultats entre les points de mesure, peut conduire néanmoins à certaines déformations inhérentes au calcul. Les indications que donnent ces cartes, en particulier pour les profondeurs, peuvent être imprécises. On peut raisonnablement estimer une erreur possible de 10 à 15% sur les profondeurs, dans les zones où la densité des points de mesure est faible.

7.1. CARTES D'ISORESISTIVITES ET D'ISOPROFONDEURS.

La carte de la figure 4 "RESISTIVITE DU SECOND TERRAIN" présente les courbes d'isorésistivités tracées à partir des interprétations géophysiques des sondages T.D.E.M. (représentés en carrés noircis). Le second terrain est un terrain conducteur aquifère. Selon les zones, il est soit de type I, de type II ou de type III.

Le terrain de type III (saturé en eau très minéralisée) est présent sur toute la zone d'étude. Il forme le substratum conducteur. La faible densité des mesures dans le centre de la caldeira ne permet pas d'en tracer les lignes d'isorésistivités en dessous de 15 Ohm.m. Ce substratum conducteur est surmonté soit de terrains résistants non saturés (cas du centre de la caldeira et de la zone de coordonnées 780-1653.5), soit de terrains de type II ou de type I, soit de la succession de type II puis I.

Les terrains de type II (saturés d'eau assez minéralisée) forment en quelque sorte une zone de transition entre les terrains aquifères I et III, comme cela apparaît sur les coupes présentées ci-après.

C'est le terrain de type I qui retient toute l'attention puisque la minéralisation de l'eau serait très faible et la rendrait propre à la consommation. La limite d'isorésistivité 75 Ohm.m tracée en ligne épaisse sur la carte de la figure 4 pourrait marquer la limite de l'extension vers l'est de ce terrain.

A l'intérieur de ces zones, les terrains volcaniques seraient partiellement voire totalement saturés d'eau. La limite non-saturation / saturation est impossible à déterminer en géophysique sans calage sur des forages. D'une manière générale, à minéralisation égale, plus la résistivité d'un terrain sera basse, plus grande sera sa saturation.

La carte "PROFONDEUR DES PREMIERS TERRAINS CONDUCTEURS" de la figure 5 représente la profondeur du toit des aquifères de type I, II et III. Son analyse, combinée avec celle des résistivités, permet de dégager les tendances suivantes, qui seront clairement montrées sur les coupes:

- l'aquifère de type III est situé à des profondeurs importantes (supérieures à 220 mètres) et est présent dans toute la zone, sans exception.

- l'aquifère de type II se situe en général en dessous du type I (sa profondeur n'apparaît donc pas systématiquement sur la carte).

- l'aquifère de type I est concentré le long de la paroi:

- * au sud, il forme une bande étroite, à des profondeurs comprises entre 100 et 180 mètres.

- * à l'ouest, dans la zone de Boca Fonte, il forme une lentille située à plus de 60 mètres sous la surface. Cette lentille est isolée des autres aquifères par deux zones dites stériles.

- * au centre et au nord, il forme une zone plus étendue entre les villages de Portela et Bangaieira. C'est à l'ouest de Portela que sa profondeur est estimée à moins de 60 mètres.

- * Au nord de Bangaieira, l'aquifère de type I réapparaît à des profondeurs de plus de 100 mètres.

Figure 4: CARTE D'ISORESISTIVITE (Ohm.m)

RESISTIVITE DU SECOND TERRAIN.

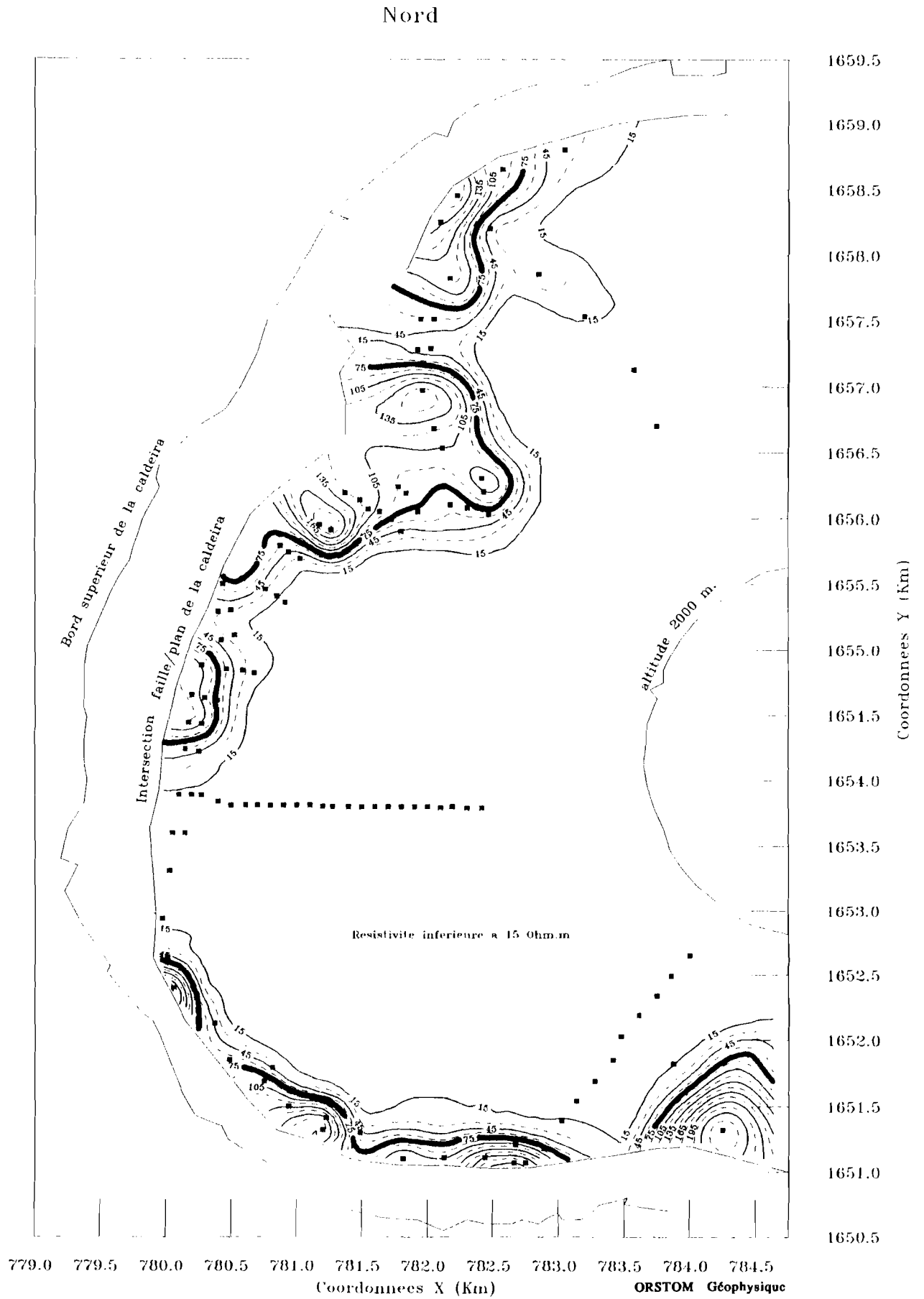
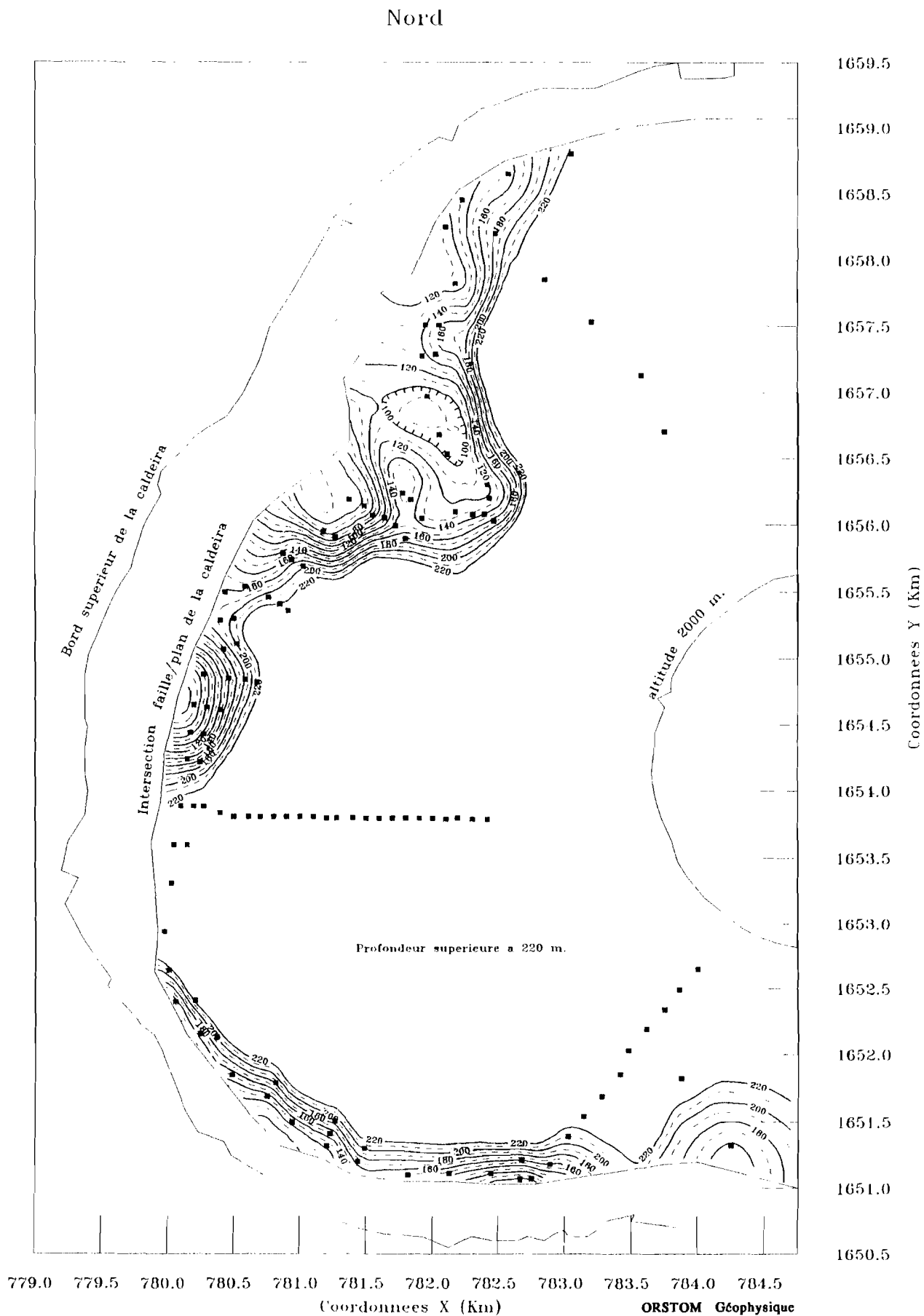


Figure 5: CARTE D'ISOPROFONDEUR (m.)

PROFONDEUR DES PREMIERS TERRAINS CONDUCTEURS.



7.2 COUPES GEOELECTRIQUES.

L'analyse des données géophysiques et l'interpolation réalisée par le calcul des cartes permet de définir 5 coupes géoélectriques (figure 7) dont la localisation est montrée sur la carte de la figure 6. Sur ces coupes sont représentés à l'échelle:

- la surface topographique,
- le toit du premier terrain conducteur de type I: il marque la limite entre les terrains résistants ($> 1000 \text{ Ohm.m}$) et les terrains de résistivité 100 à 200 Ohm.m en général (valeurs extrêmes 75 et 500 Ohm.m),
- le toit du deuxième terrain conducteur ($20 < \rho < 75 \text{ Ohm.m}$),
- le toit du substratum conducteur ($\rho < 20 \text{ Ohm.m}$).

La coupe A passe par l'aquifère le plus étendu du SSO au NNE. Cette coupe est détaillée sur la figure 8 où est aussi représentée la variation des résistivités de chaque terrain. C'est au sud du promontoire séparant les villages de Portela et de Bangaeira que l'aquifère de type I est le plus proche de la surface. Le type II est aussi assez épais, mais son épaisseur s'amenuise rapidement vers le NE, contrairement au type I. La pente générale des aquifères plonge doucement vers le NE. L'inflexion marquée à la distance 3 Km est probablement due à un artefact de calcul, aucun point TDEM n'ayant été fait dans cette zone très escarpée. A la distance 600 mètres, on distingue l'extrémité est de l'aquifère de Boca Fonte, plus épais en réalité si l'on s'approche de la paroi.

La coupe D est perpendiculaire à la coupe A et passe au coeur de l'aquifère principal. L'étendue latérale du type I est importante, alors que l'épaisseur du type II diminue rapidement vers le SE. L'approfondissement du substratum conducteur est bien marquée sous les types I et II et peut être expliqué en première analyse par la charge hydrostatique importante dans cette zone.

Les coupes B, C et E passent par les profils géophysiques CAL B, A et C respectivement. Les données sont par conséquent bien contraintes. Seules les coupes B et E montrent un terrain de type I surmontant le substratum conducteur situé à plus de 240 mètres de profondeur, et ce exclusivement dans la zone proche de la paroi.

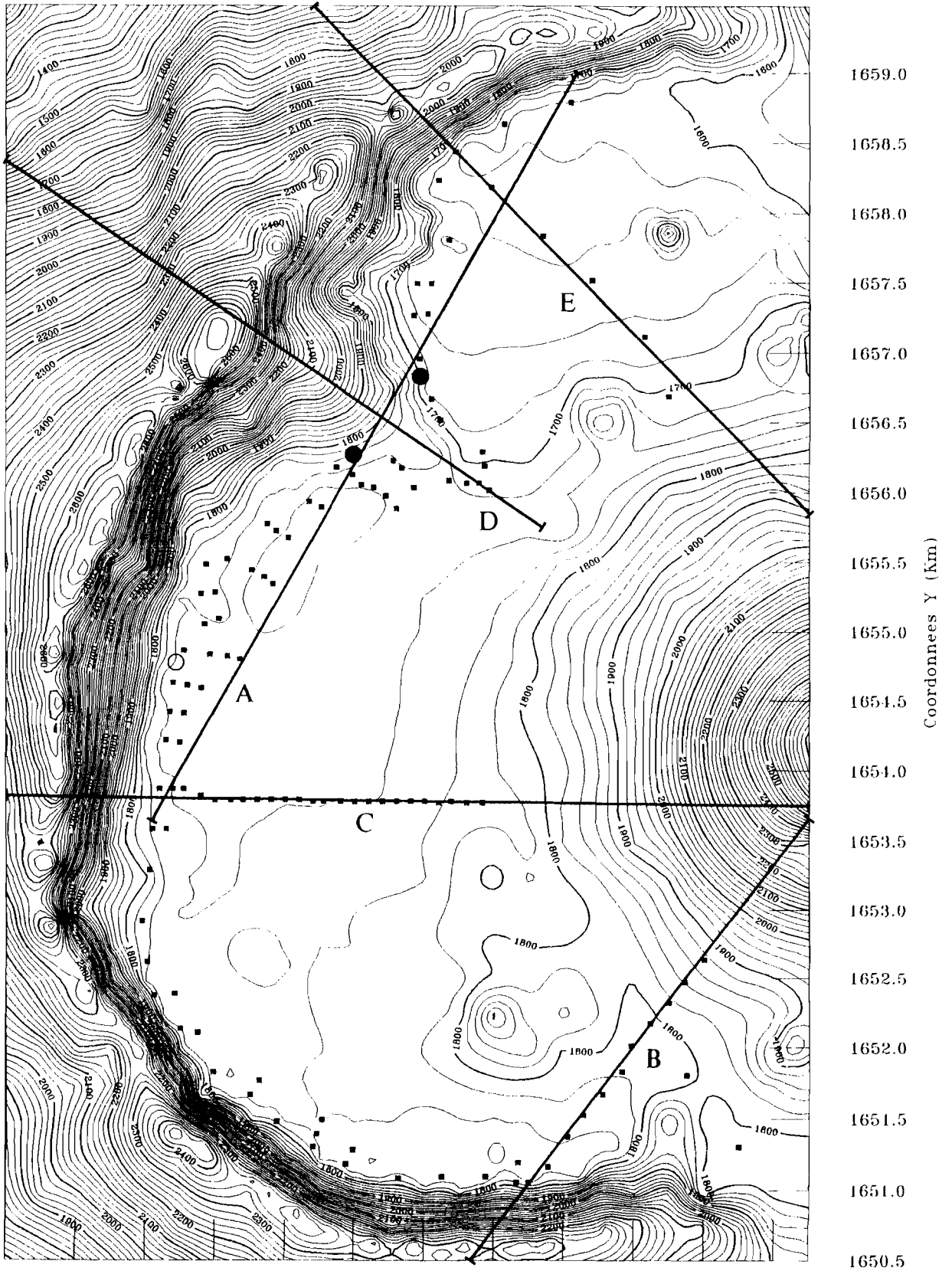
Sur la coupe B, on note un léger approfondissement du substratum lorsqu'on s'approche du relief créé par le Pico au NE.

Les 4 sondages électriques à courant continu réalisés par la CGG en 1972 dans le centre de la caldeira montrent tous un horizon résistant d'environ 300 mètres d'épaisseur surmontant un substratum de 60 - 100 Ohm.m. Si ces résultats sont comparables, on peut s'interroger cependant sur la valeur de la résistivité du substratum obtenue par sondage électrique, nettement plus forte que celle calculée par la méthode TDEM ($< 20 \text{ Ohm.m}$): nous avons tenté de modéliser les courbes TDEM en conservant des valeurs de 60 - 100 Ohm.m pour le substratum, sans qu'il soit possible d'ajuster la courbe expérimentale.

Figure 6: CARTE DE LOCALISATION DES COUPES GEOELECTRIQUES.

TOPOGRAPHIE DE LA PARTIE SOMMITALE.

Nord



779.0 779.5 780.0 780.5 781.0 781.5 782.0 782.5 783.0 783.5 784.0 784.5
Coordonnées X (Km) ORSTOM Géophysique

Figure 7: COUPES GEOELECTRIQUES.

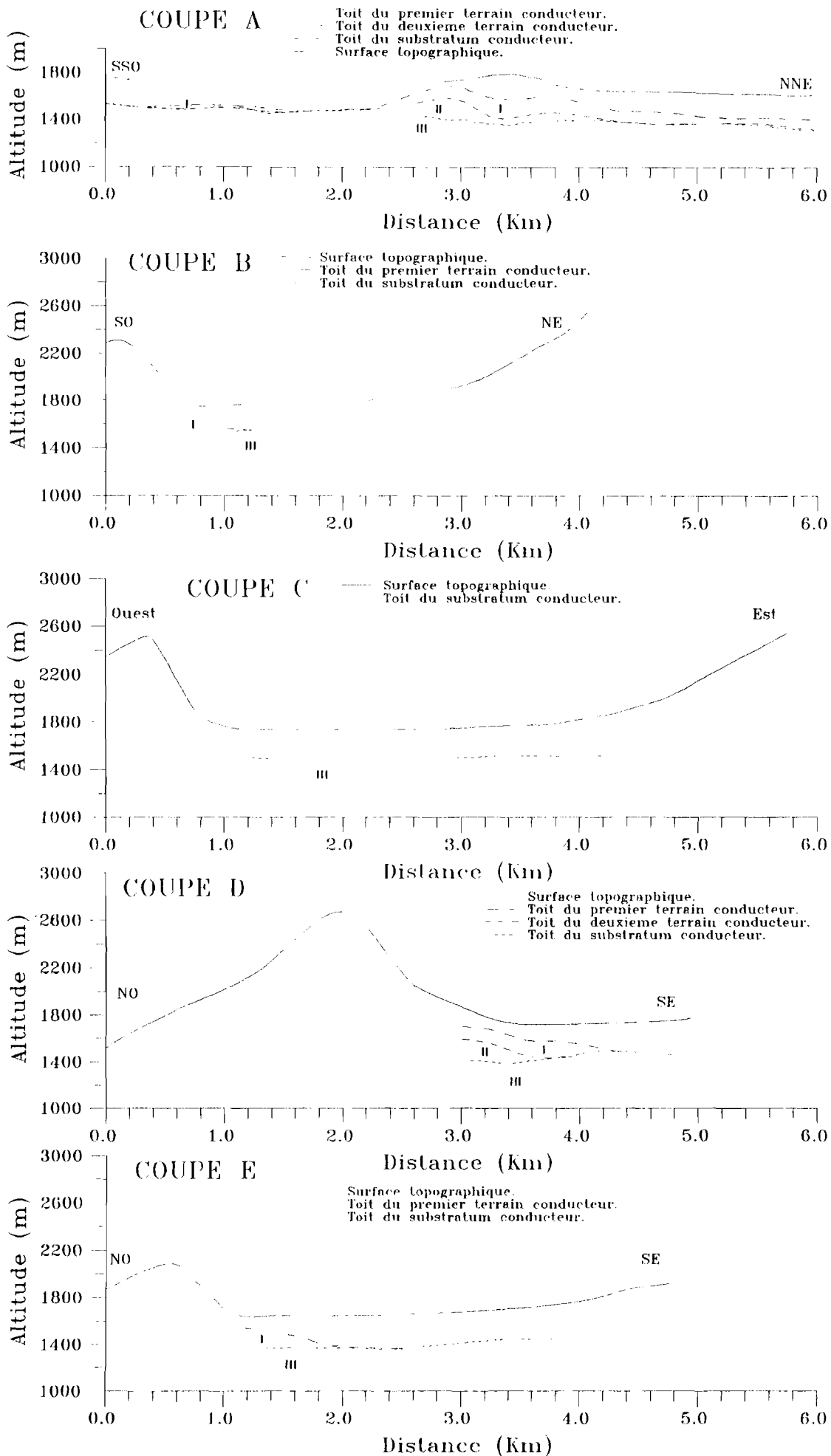
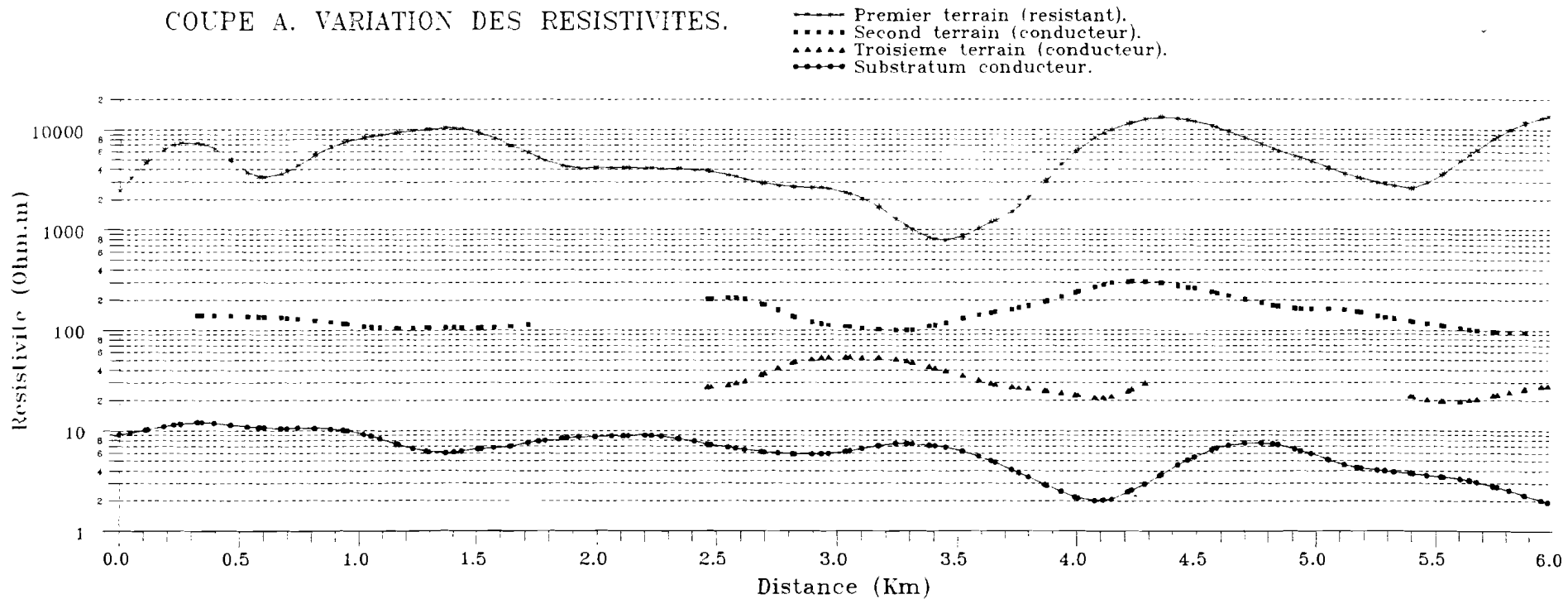
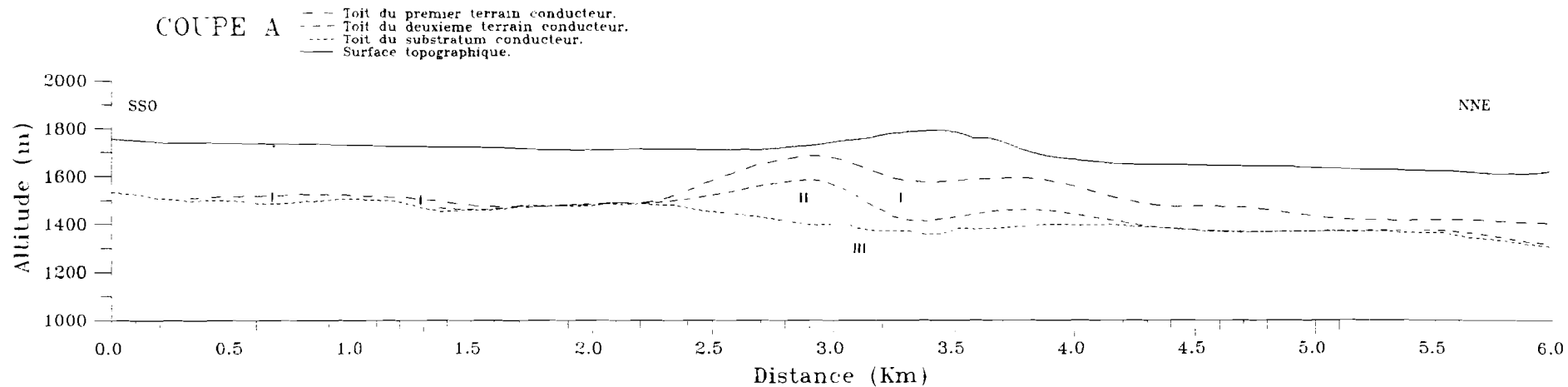


Figure 8: COUPE A. Variations de la géométrie des aquifères de types I, II ou III.

Variations des résistivités correspondantes.

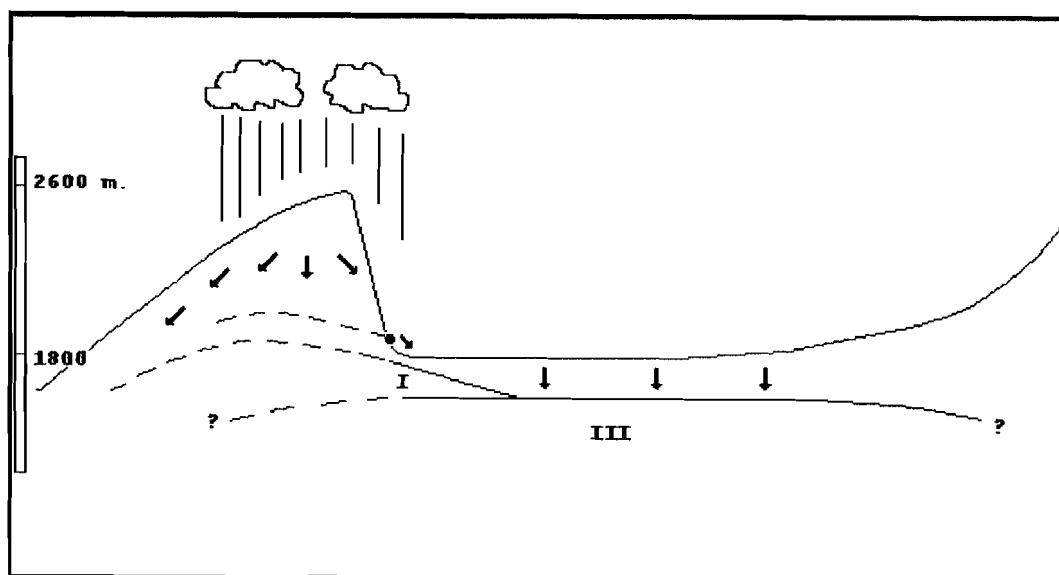


8. MODELES HYDROGEOLOGIQUES ET CONCLUSION.

8.1 MODELES HYDROGEOLOGIQUES.

Les résultats présentés dans ce rapport permettent de proposer des géométries d'aquifères relativement simples.

Perpendiculairement à la paroi, le toit de l'aquifère de type I rejoint rapidement le toit du type III, qui peut être considéré comme le niveau hydrostatique de base pour la zone sommitale.



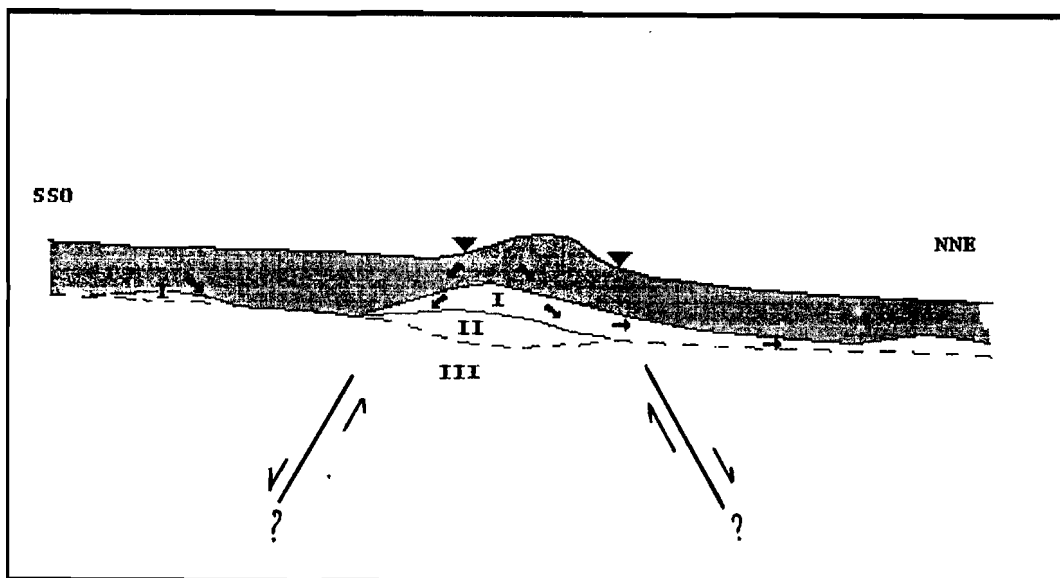
Une recharge de la nappe de type I doit favoriser l'émergence de sources telle que celle de Boca Fonte. A l'époque des mesures (avril, fin de saison sèche), le débit de la source était d'environ 4 litres par heure, alors qu'il était beaucoup plus fort auparavant (saison pluvieuse et années précédentes). Il faut à notre avis écarter l'hypothèse unique de dyke qui guideraient les écoulements pour expliquer l'émergence de source. Ces dykes sont en effet très rarement horizontaux et pourraient difficilement former des "planchers imperméables". Par contre, ils peuvent cloisonner verticalement des compartiments différents et gêner l'écoulement horizontal de l'eau dans la roche. A notre avis, la variation du niveau piézométrique de l'aquifère de type I suffit à expliquer les émergences qui peuvent être favorisées par des zones de faille. C'est grâce à la formidable entaille naturelle provoquée par la faille de la caldeira que la nappe se rabat vers le niveau hydrostatique de base III.

Nous avons montré que l'aquifère I se cantonne sur les bords de la caldeira et il est intéressant de noter que la végétation semble parfois témoigner en surface de la présence d'eau en profondeur, bien que les terrains probablement saturés soient situés à plus de 60 mètres de profondeur. Cependant, il n'y a pas forcément de relation de cause à effet.

Si des forages doivent être entrepris dans d'autres zones que celles préconisées au paragraphe suivant, on cherchera impérativement à se placer à moins de 100 mètres de la paroi, par exemple dans la zone de Boca Fonte entre les coordonnées

$X = 780.5$ et $1654.5 < Y < 1655.0$, (représentée par un cercle ajouré sur la carte de la figure 6).

Parallèlement à la paroi, comme le montre la coupe A schématisée ci-dessous, le toit du niveau hydrostatique de base suit la pente topographique. Cela indiquera un écoulement général des eaux souterraines vers le NE, favorisé par la rupture de pente existante entre les deux parties de la caldeira. La partie nord serait l'exutoire naturel du bassin versant.



Le promontoire situé entre les villages de Portela et de Bangaeira est la zone préférentielle de stockage des aquifères de type I et II. Plusieurs hypothèses peuvent être émises en ce qui concerne ce promontoire et le rôle qu'il semble jouer comme piège aquifère:

Il peut s'agir d'une structure d'effondrement selon une ou deux failles normales, plausible dans ce contexte. Les cartes géologiques de Fogo font apparaître une faille radiale à cet endroit. Les zones de failles peuvent, si elles sont altérées et argilisées, contenir l'écoulement horizontal de l'eau souterraine et favoriser son stockage (et donc sa minéralisation progressive).

Ce promontoire peut aussi être le résultat d'un épisode de glissement de terrain, structure généralement propice au stockage des eaux souterraines grâce aux matériaux broyés et laminés formant la base du glissement.

Quoiqu'il en soit, ces hypothèses ne sont pas exhaustives et une étude géologique de détail permettrait d'en savoir plus.

8.2. ESTIMATION DU VOLUME DES TERRAINS AQUIFERES.

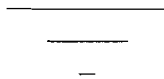
Le volume des terrains aquifères de type I est estimé entre 260 et 500 millions de mètres cubes sur l'ensemble du site étudié, en fonction des hypothèses de calcul effectué d'après les cartes d'épaisseur (non présentées dans ce rapport). Il ne s'agit pas du volume d'eau

disponible. Des tests de pompage devraient être réalisés, car les résultats géophysiques TDEM ne permettent pas d'estimer la mobilité de l'eau dans la roche. Des mesures de type hydrogéologique telles les densités apparentes, les porosités et les perméabilités devraient permettre d'estimer de façon plus précise les réserves en eau souterraine réellement mobilisables.

8.3. PROPOSITIONS DE FORAGE.

Ces analyses nous conduisent à proposer deux sites de forages accessibles: à Portela, aux coordonnées $X=781.5$, $Y=1656.25$, au sud-ouest du promontoire, et à Bangaeira, $X=782$, $Y=1656.75$, au nord-est du promontoire (cercles noircis sur la carte de la figure 6).

Ces forages devraient rencontrer des aquifères partiellement ou totalement saturés d'eau relativement pure, à des profondeurs de 70 à 120 mètres. Il est vivement souhaitable que le creusement soit conduit jusqu'à plus de 250 mètres de profondeur, de manière à traverser les terrains aquifères successifs et d'analyser la nature du substratum conducteur. Ces forages d'étude peuvent être une des clefs pour la compréhension du système hydrogéologique de la partie sommitale de l'île Fogo et des implications possibles sur les aquifères perchés des versants extérieurs à la caldeira.

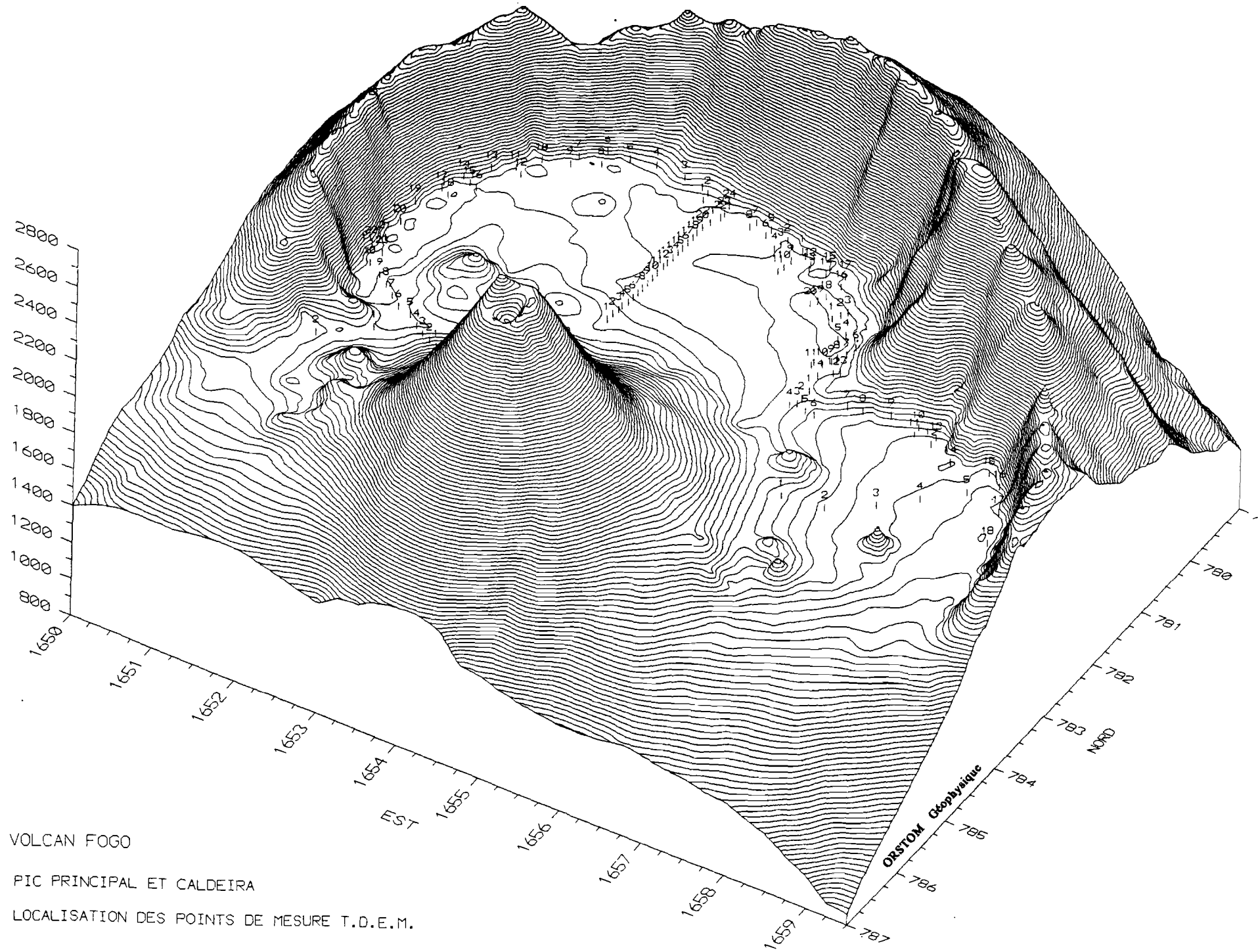


ANNEXES

**Annexe I: Vue en 3 dimensions de la topographie
de la partie sommitale de l'île FOGO.**

Annexe II: Coordonnées des points TDEM

Annexe III: Description succincte de la méthode TDEM



VOLCAN FOGO

PIC PRINCIPAL ET CALDEIRA

LOCALISATION DES POINTS DE MESURE T.O.E.M.

ORSTOM Géophysique

POINTS.XLS

zone	n°	X	Y	Z
		Km	Km	m
CAL A	1	782.412	1653.79	1770
CAL A	2	782.3	1653.79	1765
CAL A	3	782.188	1653.8	1760
CAL A	4	782.1	1653.79	1753
CAL A	5	782	1653.8	1750
CAL A	6	781.9	1653.8	1748
CAL A	7	781.8	1653.8	1743
CAL A	8	781.7	1653.8	1739
CAL A	9	781.6	1653.8	1740
CAL A	10	781.5	1653.8	1740
CAL A	11	781.4	1653.8	1742
CAL A	12	781.275	1653.8	1743
CAL A	13	781.2	1653.8	1738
CAL A	14	781.1	1653.81	1736
CAL A	15	781	1653.81	1736
CAL A	16	780.9	1653.81	1739
CAL A	17	780.8	1653.81	1739
CAL A	18	780.7	1653.81	1739
CAL A	19	780.612	1653.81	1739
CAL A	20	780.5	1653.81	1738
CAL A	21	780.4	1653.84	1738
CAL A	22	780.275	1653.89	1739
CAL A	23	780.2	1653.89	1739
CAL A	24	780.1	1653.89	1750
CAL B	1	784	1652.65	1878
CAL B	2	783.862	1652.49	1845
CAL B	3	783.75	1652.34	1823
CAL B	4	783.612	1652.19	1891
CAL B	5	783.475	1652.03	1787
CAL B	6	783.412	1651.85	1780
CAL B	7	783.275	1651.69	1771
CAL B	8	783.138	1651.54	1778
CAL B	9	783.025	1651.39	1775
CAL B	10	782.888	1651.18	1770
CAL B	11	782.75	1651.07	1776
BOC	1	780.275	1654.88	1734
BOC	2	780.2	1654.65	1734
BOC	3	780.3	1654.63	1728
BOC	4	780.4	1654.61	1731
BOC	5	780.175	1654.44	1735
BOC	6	780.275	1654.43	1735
BOC	7	780.15	1654.24	1738
BOC	8	780.25	1654.22	1737
BOC	9	780.463	1654.85	1726
BOC	10	780.588	1654.84	1728
BOC	11	780.675	1654.82	1726
BOC	12	780.425	1655.07	1723
BOC	13	780.525	1655.11	1719
BOC	14	780.5	1655.3	1745
BOC	15	780.4	1655.29	1760
BOC	16	780.588	1655.54	1740

POINTS.XLS

BOC	17	780.438	1655.5	1730
BOC	18	780.763	1655.46	1724
BOC	19	780.85	1655.41	1710
BOC	20	780.912	1655.36	1709
CASA	1	780.15	1653.6	1748
CASA	2	780.05	1653.6	1760
CASA	3	780.028	1653.31	1805
CASA	4	779.975	1652.94	1768
CASA	5	780.013	1652.64	1755
CASA	6	780.063	1652.4	1755
CASA	7	780.25	1652.16	1758
CASA	8	780.213	1652.41	1749
CASA	9	780.375	1652.13	1769
CASA	10	780.487	1651.85	1761
CASA	11	780.75	1651.69	1757
CASA	12	780.813	1651.79	1758
CASA	13	780.938	1651.5	1759
CASA	14	781.2	1651.32	1757
CASA	15	781.225	1651.41	1757
CASA	16	781.263	1651.51	1758
CASA	17	781.438	1651.2	1751
CASA	18	781.487	1651.3	1755
CASA	19	781.813	1651.1	1750
CASA	20	782.125	1651.11	1751
CASA	21	782.438	1651.11	1770
CASA	22	782.662	1651.07	1775
CASA	23	782.675	1651.21	1769
CHA	1	781.025	1655.69	1720
CHA	2	780.938	1655.74	1721
CHA	3	780.875	1655.79	1722
CHA	4	781.175	1655.95	1723
CHA	5	781.263	1655.91	1720
CHA	6	781.375	1656.19	1751
CHA	7	781.487	1656.14	1732
CHA	8	781.55	1656.07	1720
CHA	9	781.638	1656.05	1720
CHA	10	781.725	1655.99	1721
CHA	11	781.8	1655.9	1725
CHA	12	781.838	1656.19	1729
CHA	13	781.775	1656.24	1733
CHA	14	781.925	1656.05	1724
BAN	1	782.175	1656.1	1719
BAN	2	782.3	1656.08	1719
BAN	3	782.388	1656.08	1715
BAN	4	782.463	1656.03	1718
BAN	5	782.425	1656.2	1700
BAN	6	782.412	1656.3	1685
BAN	7	782.112	1656.53	1677
BAN	8	782.05	1656.68	1677
BAN	9	781.963	1656.97	1680
BAN	10	781.925	1657.28	1660
BAN	11	782.025	1657.29	1650
BAN	12	782.05	1657.51	1648

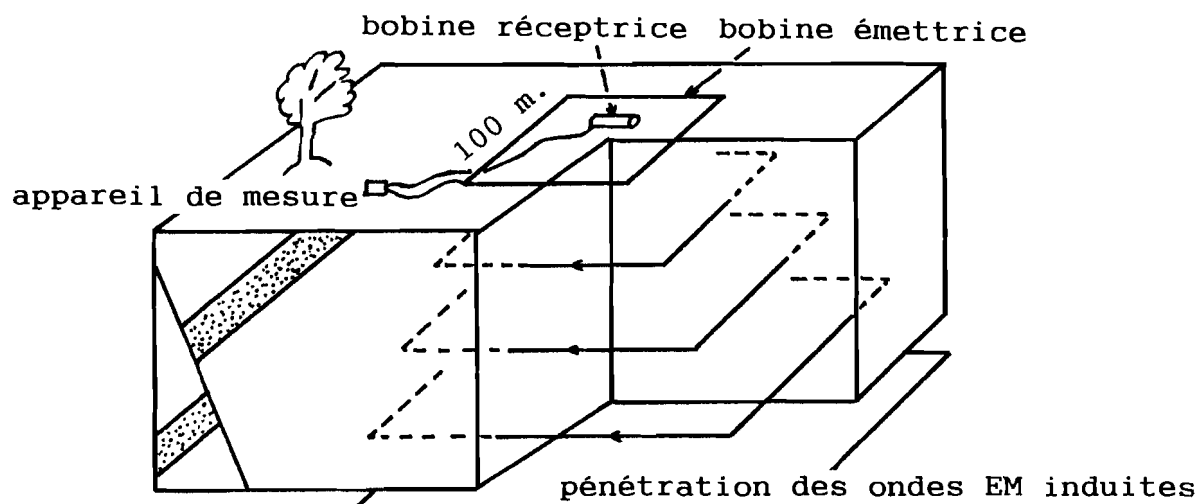
POINTS.XLS

BAN	13	781.95	1657.51	1649
BAN	14	782.175	1657.82	1635
BAN	15	782.1	1658.25	1630
BAN	16	782.225	1658.45	1630
BAN	17	782.575	1658.65	1627
BAN	18	783.05	1658.8	1619
CAL C	1	783.75	1656.7	1705
CAL C	2	783.575	1657.13	1667
CAL C	3	783.2	1657.53	1640
CAL C	4	782.85	1657.85	1637
CAL C	5	782.475	1658.2	1628
ACHA	1	783.875	1651.82	1798
ACHA	2	784.25	1651.32	1792
ACHA	3	785.225	1650.15	1700

TDEM (Time Domain Electro-Magnetism)

Principe: Cette méthode utilise le phénomène de diffusion d'un champ EM transitoire pour déterminer la résistivité électrique des terrains en fonction de la profondeur. Ce champ EM transitoire est créé par la coupure brusque d'un courant circulant dans une bobine émettrice disposée au sol. La réponse transitoire est mesurée par une bobine réceptrice durant la coupure. La profondeur d'investigation croît avec le temps au cours duquel le champ secondaire est mesuré, après la coupure du champ primaire.

Dispositif de mesure: La taille des bobines peut varier de 5 mètres de côté à plus de 100 mètres. Une fois installé, ce dispositif permet de réaliser des sondages en une dizaine de minutes. Des profils peuvent aussi être réalisés.



Profondeur d'investigation: dépend des géométries employées, des résistivités rencontrées et des gammes de fréquences.

Modèle PROTEM 47 : 3-150 mètres.
disponible à l'ORSTOM

Modèles 37 et 57 : 15- 500m et plus
options complémentaires
possibilités de location.

Applications classiques:

- * quantification des volumes de terrains avec une précision variable.
- * repérage du toit des biseaux salés
- * contamination des nappes phréatiques
- * aquifères de socle
- * cartographie des zones à faible résistivité

Avantages de la méthode:

- * absence de contact avec le sol
- * rapidité de mise en oeuvre sur terrain dégagé
- * pouvoir de résolution latéral et vertical excellent
- * interprétation quantitative mieux contrainte qu'en sondage électrique
- * complémentarité excellente avec les méthodes électriques et AMT.
- * détection des anomalies de faible résistivité dans un terrain conducteur.

Limites de la méthode:

- * faible résolution des terrains résistants
- * difficulté de mise en oeuvre en zone très boisée
- * résolution dans les tous premiers mètres assez limitée.

L'appareil PROTEM 47 de l'ORSTOM pourra être utilisé dans la gamme de profondeurs 3-100 mètres. Pour des études plus profondes, il sera nécessaire de disposer d'émetteurs plus puissants.

Exemples de résultats: La fiabilité de la méthode TDEM pour détecter les intrusions salées dans les aquifères côtiers en Israël est montré sur la figure suivante en relation avec les résultats de forages (Goldman et al, 1991).

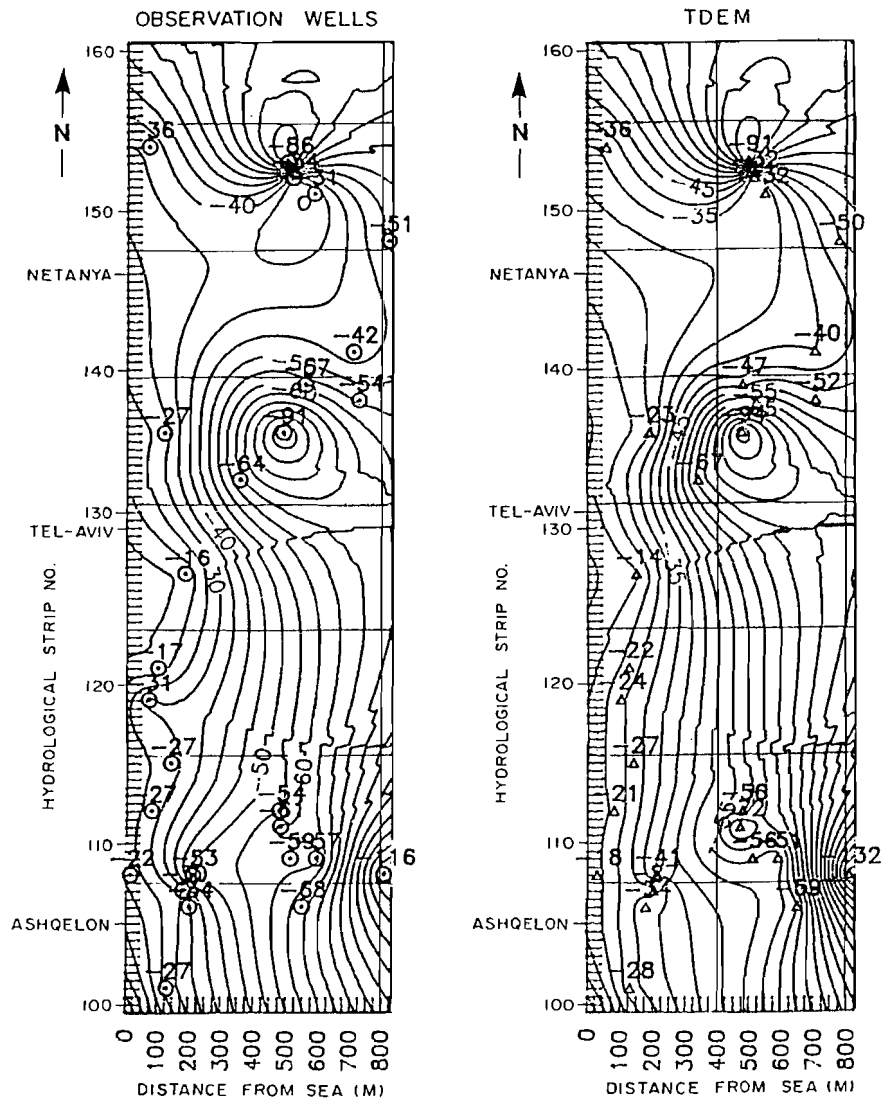


Fig. 9. Contour map of seawater depth (BSL).