



Energy, Mines and
Resources Canada

Énergie, Mines et
Ressources Canada

Earth Physics Branch

Direction de la physique du globe

1 Observatory Crescent
Ottawa Canada
K1A 0Y3

1 Place de l'Observatoire
Ottawa Canada
K1A 0Y3

This document was produced
by scanning the original publication.

Ce document est le produit d'une
numérisation par balayage
de la publication originale.

**Geomagnetic Service
of Canada**

**Service géomagnétique
du Canada**

ANOMALIE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE PRES DE LA MALBAIE (QUEBEC)

AN ELECTRICAL RESISTIVITY ANOMALY NEAR LA MALBAIE, QUEBEC

R.D. Kurtz, E.R. Niblett, M. Chouteau* and/et L.R. Newitt

12 pp. 18 figures (français)

11 pp. 18 illustrations (english)

prix/price \$15.25

Dossier public de la Direction de la physique du globe No. 79-4
Earth Physics Branch Open File Number 79-4
Ottawa, Canada 1979.

REPRODUCTION INTERDITE

NOT FOR REPRODUCTION

*Institut de Recherche en Exploration Minérale
Ecole Polytechnique de Montréal
C.P. 6079, Succursale A
Montréal, Québec

EPB
Open File
79-4



Energy, Mines and
Resources Canada

Énergie, Mines et
Ressources Canada

Earth Physics Branch

Direction de la physique du globe

1 Observatory Crescent
Ottawa Canada
K1A 0Y3

1 Place de l'Observatoire
Ottawa Canada
K1A 0Y3

**Geomagnetic Service
of Canada**

**Service géomagnétique
du Canada**

ANOMALIE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE PRES DE LA MALBAIE (QUEBEC)

AN ELECTRICAL RESISTIVITY ANOMALY NEAR LA MALBAIE, QUEBEC

R.D. Kurtz, E.R. Niblett, M. Chouteau* and/et L.R. Newitt

12 pp. 18 figures (français)

11 pp. 18 illustrations (english)

prix/price \$15.25

Dossier public de la Direction de la physique du globe No. 79-4
Earth Physics Branch Open File Number 79-4
Ottawa, Canada 1979.

REPRODUCTION INTERDITE

NOT FOR REPRODUCTION

*Institut de Recherche en Exploration Minérale
Ecole Polytechnique de Montréal
C.P. 6079, Succursale A
Montréal, Québec

RÉSUMÉ

On a découvert une zone restreinte de très faible résistivité électrique qui s'enfonce peu profondément dans la croûte terrestre, près du village de Ste-Mathilde (Québec). Des observations en grande partie magnétotelluriques et audiomagnétotelluriques ont permis d'évaluer grossièrement la profondeur et l'étendue de l'anomalie. Il faudrait toutefois procéder à des études plus poussées pour délimiter et décrire adéquatement cette anomalie.

Anomalie de résistivité électrique près de La Malbaie (Québec)

INTRODUCTION

Les données magnétotelluriques (MT), recueillies il y a quelque temps près du village de Ste-Mathilde, à environ 6 km au nord-est de La Malbaie, ont révélé que la croûte terrestre y est parcourue par des champs électriques presque nuls et affiche une très faible résistivité. Par conséquent, il a été décidé de procéder à des études plus poussées des caractéristiques électriques de l'anomalie.

Les premières mesures électriques prises sur les lieux en juin 1978, à l'aide des appareils EM31 et EM34 (Geonics Ltd.), ont montré que les 50 premiers mètres ne renfermaient aucun matériau fortement conducteur. Des sondages telluriques, effectués dans une seule direction, à quatre endroits (figure 1), ont indiqué que la zone de champ électrique presque nul est sans doute très restreinte, s'étendant sur à peu près 1 km suivant un axe allant du nord-ouest au sud-est et sur au plus quelques km suivant un axe allant du nord-est au sud-ouest.

Pendant ce temps, MM. J.W. Scott et John Lobach de la Commission géologique du Canada ont pris, dans la région, plusieurs mesures de résistivité en c.c. par la méthode Schlumberger. Ils ont obtenu les résultats les plus intéressants le long de la route qui se dirige vers le nord-ouest depuis la station MT de Ste-Mathilde. Ils ont établi leur profil avec des séparations de 2,1 km entre les électrodes de courant et de 50 m entre les électrodes de potentiel. Les électrodes de courant sont indiquées à la figure 1, et les mesures de résistivité apparente sont pointées à la figure 2. Ce graphique donne aussi la position des électrodes au nord et à l'est de la station MT, et les lignes telluriques des stations temporaires 3 et 4 susmentionnées.

La résistivité apparente à l'extrémité nord-ouest du profil se maintient aux environs de 300-400 Ω m. Au-dessus de l'anomalie, elle chute à 30 Ω m, mais grimpe subitement au sud-est, au-dessus d'un affleurement de la roche de fond. Ces données confirment l'existence d'une zone restreinte de faible résistivité dans le sol de la station de Ste-Mathilde. La méthode Schlumberger ne permet sans doute d'étudier que le sommet de la structure conductrice.

LEVÉS AUDIOMAGNÉTOTELLURIQUES (AMT) EFFECTUÉS À STE-MATHILDE

1. Instrumentation

En octobre 1978, l'Institut de recherche en exploration minérale (I.R.E.M.) de l'École polytechnique de Montréal et la Direction de la physique du Globe (D.P.G.) ont établi une série de profils AMT et effectué des sondages AMT dans la région de l'anomalie de Ste-Mathilde, en vue d'obtenir plus de renseignements sur son étendue, sa profondeur et sa nature physique. L'I.R.E.M. a fourni à forfait les instruments au ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources pour les fins de l'étude.

Les instruments de sondage des tenseurs de l'I.R.E.M. ont été décrits par Pham Van Ngoc (1977). Dans les zones de bruit électrique artificiel minime, ils peuvent mesurer des champs MT dans la gamme de fréquences allant d'environ 0,01 à 200 Hz. Cependant, à Ste-Mathilde, une importante ligne de transport d'électricité passe à quelque 1,5 km de la zone visée. Le bruit qu'elle engendre a empêché d'obtenir des résultats satisfaisants aux fréquences supérieures à 30 Hz. Les composantes telluriques horizontales, E_x et E_y , et les composantes magnétiques horizontales, H_x et H_y , ont été mesurées simultanément afin de permettre l'analyse tensorielle des données. Les enregistrements analogues sur bande ont ensuite été convertis, au laboratoire, en données numériques après un filtrage "antipliage".

L'appareil pour le profilage est léger et facilement transportable; il ne fournit que des valeurs scalaires de la résistivité apparente le long d'un axe parallèle à celui de la paire d'électrodes telluriques. Les champs telluriques et magnétiques ont été mesurés à différentes fréquences: 1, 3, 5, 8, 21, 34, 100, 250, 400, 700, 1 200 et 2 000 Hz. Le système, appelé TELMAG 2, est décrit par Pham Van Ngoc (1977). Vingt mètres séparaient les électrodes à toutes les stations de mesure, lors des levés effectués à Ste-Mathilde. Les rapports signal/bruit étaient trop faibles pour obtenir des données à 1, 3, 5 et 2 000 Hz, mais des mesures scalaires utiles ont été prises aux autres fréquences.

2. Sondages et profils AMT

On a obtenu des sondages AMT aux trois endroits cotés I, II et III à la figure 3. L'emplacement I étant le site de la première station MT qui a été établie par la D.P.G., il ne restait qu'à relier le système AMT de l'I.R.E.M. aux câbles et aux électrodes déjà en place.

Des évaluations par analyse spectrale des impédances ont permis de calculer les résistivités apparentes (ρ_a) le long des grand et petit axes d'anisotropie (Pham Van Ngoc, 1977; Kurtz et Niblett, 1979). Les résistivités apparentes à la station I, correspondant aux deux directions principales du tenseur d'impédance, sont pointées en fonction de la période, à la figure 4. Ces deux ensembles de valeurs de ρ_a couvrent des périodes de 0,03 s à un peu plus de 100 s. Pour les périodes comprises entre 100 et 10 000 s, les valeurs ont été dérivées des mesures effectuées pour les longues périodes par la D.P.G. avec les mêmes électrodes. À cause de la forte atténuation du champ électrique pour de telles périodes, le rapport signal/bruit était faible, et seules les valeurs de ρ_a le long du grand axe du tenseur d'impédance ont pu être calculées avec une précision acceptable. Dans le graphique, les valeurs de ρ_a correspondant aux hautes fréquences ont été dérivées des données AMT scalaires qui ont été

recueillies aux stations de profilage à proximité de la station I. Les marges (traits) d'erreur de ces données couvrent la gamme complète des valeurs de ρ_a aux stations de mesure scalaire près du site de sondage. Les données scalaires de la station de mesure 5 sont très voisines des données de sondage des tenseurs.

La figure 4 comporte également une courbe d'asymétrie (Swift, 1967) dérivée des composantes du tenseur d'impédance. Des valeurs d'asymétrie inférieures à 0,2 indiquent que la répartition des champs MT est associée à une structure du sol unidimensionnelle ou bidimensionnelle. Des valeurs beaucoup plus élevées indiquent que les courbes de ρ_a en fonction de la période doivent être expliquées à partir d'un corps tridimensionnel.

Les figures 5 et 6 donnent les valeurs de résistivité apparente et d'asymétrie telles que mesurées aux stations II et III au moyen du matériel de sondage AMT de l'I.R.E.M.

Les données AMT scalaires proviennent de 22 stations de mesure (voir figure 8). Ces stations forment trois lignes ou profils. Le profil 1 se dirige du nord-est au sud-est le long d'une route secondaire, tandis que les profils 2 et 3 s'étendent du nord-est au sud-ouest parallèlement à la route principale qui traverse Ste-Mathilde. Les valeurs de la résistivité apparente le long de ces profils sont pointées dans les figures 8, 9, 10, 11, 12 et 13. Ces mêmes données sont représentées sous forme de pseudo-sections dans les figures 14, 15 et 16. Dans chaque pseudo-section, l'espacement des isolignes ρ_a est logarithmique ($\Delta \log_{10} \rho_a = 0,33$). Toutes les mesures de ρ_a ont été prises suivant un axe allant du nord-ouest au sud-est.

INTERPRÉTATION

1. Sondages MT

Les sondages des stations I, II et III, notamment les valeurs de l'intervalle prolongée de la station I (figure 4), indiquent clairement la

présence d'une zone de très faible résistivité dans la partie supérieure de la croûte terrestre. Les données des stations I et II ne sont pas fortement anisotropes puisque les résistivités apparentes le long des deux directions principales ne sont pas très différentes les unes des autres. Les données de la station III sont nettement anisotropes. Aux trois stations, l'asymétrie varie en général entre 0,2 et 1, quoique des valeurs plus grandes aient été observées pour de longues périodes aux stations I et II. Aux trois stations, l'asymétrie est la plus faible pour les courtes périodes. Cela signifie que, pour de faibles profondeurs de pénétration du champ magnétotellurique, la structure est presque unidimensionnelle ou bidimensionnelle. Pour des périodes plus longues, la profondeur de pénétration devrait être comparable à la largeur de l'anomalie, et le champ MT devrait donc afficher une structure beaucoup plus tridimensionnelle.

Les modèles unidimensionnels sont de conception simple, et on les utilise souvent pour évaluer la profondeur et la conductivité approximatives des zones telluriques à partir des données sur la résistivité apparente. La figure 4 montre un modèle à couches unidimensionnelles dont les résultats sont en assez bon accord avec les données de la station I. La résistivité de la couche supérieure a été évaluée à partir des mesures de l'EM31, et celle de la seconde couche, à partir des mesures de l'EM34. Les profils AMT (figures 8-13) indiquent que la résistivité varie beaucoup, du moins dans les 500 premiers mètres, ce qui suggère fortement la présence de fractures, de dykes et de changements dans la teneur en humidité. L'épaisseur et la résistivité des couches qui représentent la base de la croûte terrestre et le sommet du manteau terrestre sont tirées des estimations de Kurtz et Garland (1976). Cependant, les sondages de la station I confondent ces deux couches. La seule contrainte réelle est que la résistivité du sol doit décupler plusieurs fois sous l'anomalie.

Dans un modèle unidimensionnel, le sommet de la zone conductrice se situe à une profondeur de 400 à 600 mètres. Son épaisseur qui varie entre 4 et 7 km est incertaine à cause du faible rapport signal/bruit pour les longues périodes. La couche mince de $0,03 \Omega \text{ m}$ est nécessaire pour expliquer la raideur de la pente (-1) de la courbe de résistivité apparente, tandis que la couche épaisse de $1 \Omega \text{ m}$ est nécessaire pour expliquer les données correspondant aux périodes comprises entre 10 et 1 000 s. Des 19 modèles mis à l'essai, celui de la figure 4 est le plus fidèle à la réalité. Le grand axe d'anisotropie à la station I (figure 3) est à peu près parallèle à l'axe du fleuve Saint-Laurent. Sa direction varie entre 65 et 18° est par rapport au nord magnétique, la moyenne se situant à environ 45° .

La station II est située près de la ligne de transport d'électricité, de sorte qu'on n'a pu y obtenir des données MT satisfaisantes à des fréquences supérieures à 14 Hz (0.07 s). L'orientation du grand axe d'anisotropie (figure 3) est incertaine, sauf pour les courtes périodes. La courbe de résistivité apparente (Fig. 5) suivant le grand axe d'anisotropie est presque parallèle à la courbe qui passe par les valeurs ρ_a provenant de la station I. Le modèle à couches correspondant donne un conducteur ($1 \Omega \cdot \text{m}$) d'au moins 2 km d'épaisseur qui commence à une profondeur d'environ 1 km.

À la station III, la courbe ρ_a (Fig. 6) du petit axe d'anisotropie est parallèle aux courbes du grand axe obtenues aux stations I et II, mais elle se trouve décalée vers des valeurs de résistivité inférieures. Si l'on intègre cette courbe dans un modèle à couches, le sommet du conducteur se situe à une profondeur de 270 mètres seulement. Par contre, une interprétation unidimensionnelle semblable de la principale courbe ρ_a situe le sommet du conducteur à environ 350 mètres. Le grand axe d'anisotropie est indiqué à la figure 3.

2. Direction structurale de l'anomalie

La direction structurale d'un corps à deux dimensions ou d'un corps allongé à trois dimensions peut être estimée à partir du basculeur (Vozoff 1972). Cette quantité se définit par la formule

$$T = \{ |A|^2 + |B|^2 \}^{1/2}$$

si A et B peuvent être calculés, à une période ou une fréquence donnée, à partir d'un rapport linéaire observé entre les composantes du champ magnétique, c'est-à-dire

$$H_z = AH_x + BH_y.$$

En général, A et B sont complexes et dépendent de la fréquence. Dans le cas d'une structure strictement à deux dimensions, A et B auront la même phase et la direction du champ magnétique horizontal qui correspond le mieux au champ vertical s'obtient par

$$\theta = \tan^{-1} B/A$$

où B/A est réel. L'azimut perpendiculaire à θ donne la direction de la structure. On trouve à la figure 17 la courbe des amplitudes du basculeur aux stations I, II et III. À la station I, la valeur de T varie de façon notable entre les périodes 0,04 et 1 s, la valeur maximale se situant à environ 0,15 s. À ces périodes, le champ magnétique montre une réaction inductive très forte à l'anomalie locale. La direction du basculeur détermine si le grand ou le petit axe d'anisotropie coïncide avec la direction de la structure. Les directions structurales ainsi calculées pour une période de 0,1 s sont indiquées à la figure 18.

Aux stations I et III, les directions structurales sont perpendiculaires au grand axe d'anisotropie calculé d'après le tenseur d'impédance. Il n'en va pas de même à la station II, où le basculeur indique que la structure présente une direction parallèle au grand axe d'anisotropie.

3. Profils AMT

Les profils tracés dans les figures 8 à 13 n'ont presque pas besoin d'explication. À des fréquences de 100 Hz et plus, la valeur de ρ_a se situe habituellement bien au-dessus de $100 \Omega \cdot m$, sauf aux stations 1, 6 et 11 où les faibles valeurs sont probablement causées par des fractures ou des discontinuités conductrices de quelque nature, qui se trouvent près de la surface. Dans les trois profils, les valeurs de résistivité apparente les plus faibles se rencontrent habituellement à 8 et 21 Hz, et il semble clair qu'à ces fréquences, la profondeur de pénétration du champ MT est suffisante pour détecter le corps conducteur. Le profil 3 (Figures 12, 13 et 16) est particulièrement intéressant, en raison de l'énorme contraste de résistivité entre les stations I et II, près de la voie d'accès, et les stations 12 et 19 à l'extrémité nord-est de la ligne. À ces deux dernières stations, les valeurs très élevées de la résistivité indiquent que les stations se trouvent à l'extérieur de la zone d'anomalies.

Les pseudo-sections montrent une bonne part de verticalité et donnent fortement l'impression d'une hétérogénéité à proximité de la surface. À l'extrémité sud-ouest des profils 2 et 3 (Figures 15 et 16) l'anomalie plonge brusquement vers de plus grandes profondeurs ou disparaît. Le long du profil I (figure 14), qui s'étend dans la direction nord-ouest vers la ligne de transport d'électricité, le sommet de l'anomalie se manifeste probablement à des fréquences de 8 et de 21 Hz, bien qu'il semble plonger vers de plus grandes profondeurs au-delà de la station 6. Les résultats des sondages pratiqués à la station II tendent à corroborer cette conclusion.

CONCLUSIONS

L'anomalie MT située près de Ste-Mathilde se caractérise par une très grande atténuation du champ tellurique à des périodes supérieures à 1 s, sur une aire limitée. Les données obtenues indiquent qu'un corps

assez étendu qui présente une conductivité électrique anormalement élevée doit exister dans la croûte à des profondeurs relativement faibles.

D'après une analyse unidimensionnelle des résistivités apparentes mesurées, le sommet du conducteur se trouve à des profondeurs variant entre 250 et 1 000 m aux stations I, II et III, le long de la voie d'accès qui s'étend en direction de la ligne de transport d'électricité (Figure 3).

Les directions structurales calculées aux trois stations de sondage révèlent l'existence d'une structure à orientation nord-ouest - sud-est qui plonge en direction du nord-ouest. Les stations I et III se trouvent probablement près du flanc nord-est du corps conducteur, étant donné que leurs grands axes d'anisotropie sont perpendiculaires à la direction structurale. Les valeurs mesurées au basculeur sont élevées, ce qui indique qu'aucune des stations ne se trouve directement au-dessus de la partie la plus conductrice de l'anomalie.

Les données de sondage ont été interprétées au moyen d'hypothèses et de modèles à une ou à deux dimensions, et des concepts aussi simplifiés ne sauraient évidemment suffire à une interprétation rigoureuse. Cependant, ils permettent de calculer approximativement les profondeurs auxquelles l'anomalie devrait se trouver; pour obtenir de meilleurs résultats, il faudrait employer des techniques d'analyse plus perfectionnées et coûteuses. Nous croyons qu'il serait utile, à ce stade-ci, de procéder à des levés géophysiques et géologiques plus détaillés au-dessus de la région, afin de mieux comprendre l'étendue et la nature du phénomène qui nous intéresse. Il ressort clairement des courbes de la figure 4, qui illustrent la forte atténuation du champ tellurique et de la résistivité apparente, que l'anomalie s'étend sur quelques kilomètres de profondeur. Les résistivités indiquées dans les modèles à couches pourraient être entachées d'une très grande marge d'erreur (100 % ou plus).

Nous croyons que le simple fait d'obtenir des valeurs aussi basses que $0,03 \Omega \cdot m$ montre bien que des modèles d'analyse simples sont insuffisants et ne sont nullement réalistes au sens physique du terme.

À l'heure actuelle, nous n'avons pas à notre disposition de renseignements géologiques détaillés sur la région affectée par l'anomalie. D'après la carte géologique qu'a publiée le ministère des Richesses naturelles du Québec, la région ne se trouve qu'à environ 1 km à l'est des calcaires et des schistes du Paléozoïque qui recouvrent les roches de Grenville, dans les environs immédiats de La Malbaie. La carte présente les affleurements rocheux situés près de la région à l'étude comme un mélange de paragneiss comportant un peu d'amphibolite. Les morts-terrains sont très minces dans la plupart des endroits, et on a souvent rencontré des affleurements rocheux au cours de l'établissement des profils.

La cause des conductivités électriques anormalement élevées est inconnue. Il se peut qu'un grand volume de roches brisées et fracturées ait été inondé par des solutions aqueuses hautement conductrices; il est également possible qu'une minéralisation graphitique, sulfurée ou ferreuse soit un des facteurs responsables de l'anomalie.

REMERCIEMENTS

Les instruments Geonics EM31 et EM34 furent gracieusement prêtés aux auteurs par le Dr. W.J. Scott de la Commission géologique du Canada. Le Dr. Scott s'est aussi arrangé pour que Mr. John Lobach effectue sur l'anomalie quelques profils de résistivité selon la méthode Schlumberger; et quelques unes de ses données sont montrées dans la figure 2. Nous voudrions remercier le Dr. Michel David, directeur-général de l'Institut de Recherche en Exploration Minérale pour son intérêt dans ce projet et pour avoir mis à notre disposition les équipements de profilage et de sondage AMT.

REFERENCES

- Kurtz, R.D. and G.D. Garland, 1976. Magnetotelluric measurements in eastern Canada, Geophys. J. R. astr. Soc., 45, 321-347.
- Kurtz, R.D. and E.R. Niblett, 1979. Time-dependence of magnetotelluric fields in a tectonically active region in eastern Canada; J. Geomag. Geoelectr. (Sous presse)
- Pham Van Ngoc, 1977. Magnetotelluric reconnaissance survey of the Lillooet Valley, British Columbia, Open file report of the Earth Physics Branch 77-20, 40 p.
- Swift, C.M., 1967. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States: Ph.D Thesis, M.I.T.
- Vozoff, K., 1972. The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins, Geophysics, 37, 98-141.



Energy, Mines and
Resources Canada

Énergie, Mines et
Ressources Canada

Earth Physics Branch

Direction de la physique du globe

1 Observatory Crescent
Ottawa Canada
K1A 0Y3

1 Place de l'Observatoire
Ottawa Canada
K1A 0Y3

**Geomagnetic Service
of Canada**

**Service géomagnétique
du Canada**

ANOMALIE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE PRES DE LA MALBAIE (QUEBEC)

AN ELECTRICAL RESISTIVITY ANOMALY NEAR LA MALBAIE, QUEBEC

R.D. Kurtz, E.R. Niblett, M. Chouteau* and/et L.R. Newitt

12 pp. 18 figures (français)

11 pp. 18 illustrations (english)

prix/price \$15.25

Dossier public de la Direction de la physique du globe No. 79-4

Earth Physics Branch Open File Number 79-4

Ottawa, Canada 1979.

REPRODUCTION INTERDITE

NOT FOR REPRODUCTION

*Institut de Recherche en Exploration Minérale
Ecole Polytechnique de Montréal
C.P. 6079, Succursale A
Montréal, Québec

ABSTRACT

A limited region of very low electrical resistivity at shallow depths in the earth's crust has been found near the village of Ste-Mathilde, Québec. Rough estimates of the depth and areal extent of the anomalous zone have been made, mainly by means of magnetotelluric and audio-magnetotelluric observations. More detailed surveys are required to properly delineate and document this unusual feature.

An Electrical Resistivity Anomaly Near La Malbaie, Quebec

INTRODUCTION

Magnetotelluric (MT) data previously acquired near the village of Ste-Mathilde, about 6 km northeast of La Malbaie, revealed the presence of strongly suppressed electric fields and very low resistivity at depth in the earth's crust. Accordingly it was decided that further studies of the electrical properties of this unusual anomaly should be made.

In June 1978 preliminary electrical surveys at the site with EM31 and EM34 instruments (Geonics Ltd.) provided no evidence for highly conducting material within 50 m of the surface. Telluric soundings made in a single direction at four sites (Fig. 1) implied that the region of electric field suppression is probably quite limited in size, extending perhaps 1 km or so in the northwest-southeast direction and at the most a few km in the northeast-southwest direction.

At the same time several Schlumberger DC resistivity measurements were made in the area by Dr. J.W. Scott and Mr. John Lobach of the Geological Survey of Canada. The most interesting of these was along the road running northwest past the Ste-Mathilde MT station. For this profile the current electrode separation was 2.1 km and the potential electrode separation was 50 m. The current electrodes are indicated in Fig. 1 and the apparent resistivities along the profile are plotted in Fig. 2. This drawing also gives the positions of the north and east electrodes of the MT station and the telluric lines of temporary stations 3 and 4 referred to above.

The apparent resistivity along the northwest end of the profile is relatively constant at 300-400 Ωm . Over the MT anomaly it drops to 30 Ωm , but rises abruptly to the southeast over an outcrop of bedrock. These data confirm the existence of a limited region of low resistivity in the

earth beneath the Ste-Mathilde station. The Schlumberger data are probably detecting only the uppermost part of the conducting structure.

AUDIO MAGNETOTELLURIC (AMT) SURVEYS AT STE-MATHILDE

1. Instrumentation

In October 1978 the Mineral Exploration Research Institute (MERI) of Ecole Polytechnique de Montréal and the Earth Physics Branch (EPB) conducted a series of AMT profiles and soundings over the Ste-Mathilde anomaly in order to obtain more information about its areal extent, its depth and its physical character. The instruments were provided by MERI under contract to the Department of Energy, Mines and Resources.

The MERI tensor sounding equipment has been described by Phan Van Ngoc (1977). In regions where there is minimal man-made electric noise it can measure MT fields in the frequency range from about 0.01 Hz to 200 Hz. However at Ste-Mathilde a major power transmission line lying only about 1.5 km from the survey area created a noisy environment and a satisfactory response could not be obtained at frequencies above 30 Hz. The horizontal telluric components E_x and E_y and the horizontal magnetic components H_x and H_y are measured simultaneously to permit tensor analysis of the data. The analogue tape recordings are later digitized in the laboratory with anti-aliasing filters.

The profiling equipment is light and highly portable and provides only scalar values of apparent resistivity along a direction parallel to the orientation of the telluric electrode pair. Telluric and magnetic fields are measured at a number of discrete frequencies: 1, 3, 5, 8, 21, 34, 100, 250, 400, 700, 1200 and 2000 Hz. The system is called TELMAG 2 and is described by Pham Van Ngoc (1977). In the surveys at Ste-Mathilde an electrode spacing of 20 m was used at all profiling stations. Signal-

to-noise ratios were too low for data acquisition at 1, 3, 5 and 2000 Hz, but useful scalar data were obtained at the remaining frequencies.

2. AMT Sounding and Profiling Data

AMT soundings were obtained at three locations marked I, II and III in Fig. 3. Location I is the site of the original MT station established earlier by EPB. Here the MERI audio MT system was connected to the telluric lines and electrodes already in place.

From the impedance estimates derived by spectral analysis the apparent resistivities (ρ_a) were calculated along the direction of the major and minor axes of anisotropy (Pham Van Ngoc, 1977; Kurtz and Niblett, 1979). For station I the apparent resistivities corresponding to both principal directions of the impedance tensor are plotted against period in Fig. 4. These two sets of ρ_a data extend from 0.03 s to just over 100 s. At periods between 100 and 10,000 s the ρ_a values were derived from the long period EPB recordings made on the same electrodes. Because of the severe attenuation of the electric field at these periods signal-to-noise level was low and only ρ_a values along the major axis of the impedance tensor could be calculated with acceptable precision. At the high frequency end of the graph ρ_a values were derived from the scalar AMT data acquired at profiling stations in the vicinity of station I. The error bars for these data represent the total range of ρ_a values for the scalar stations near the sounding site. Scalar data from profiling station 5 (Fig. 7) closely overlapped the tensor sounding data.

Fig. 4 also shows a plot of the skew (Swift, 1967) derived from the impedance tensor elements. Values of skew less than 0.2 indicate that the distribution of MT fields should be compatible with a 1-dimensional or a 2-dimensional earth structure. Substantially larger values indicate that

a 3-dimensional body would be required for interpretation of the ρ_a vs period plots.

Figs. 5 and 6 show apparent resistivity values and skew acquired at stations II and III with the MERI AMT sounding apparatus.

Scalar AMT data were obtained at a total of 22 profiling stations as shown in Fig. 8. These stations form three lines or profiles, profile 1 extending in a northwest-southeast direction along an access road and profiles 2 and 3 running in a northeast-southwest direction parallel to the main road through Ste-Mathilde. Apparent resistivity values along these profiles are plotted in Figs. 8, 9, 10, 11, 12 and 13. These same data are shown in the form of pseudo-sections in Figs. 14, 15 and 16. In each pseudo-section the ρ_a contour interval is logarithmic ($\Delta \log_{10} \rho_a = 0.33$). All ρ_a values were measured in the northwest-southeast direction.

INTERPRETATION

1. MT Sounding Data

The sounding data from stations I, II and III, particularly the extended range data of station I (Fig. 4), clearly indicate the presence of a region of extremely low resistivity within the earth's upper crust. The data from stations I and II are not strongly anisotropic since apparent resistivities along the two principal directions do not differ greatly. At station III the data are clearly anisotropic. At all three locations the skews are generally between 0.2 and 1.0, though values larger than unity are obtained at long periods at stations I and II. All three stations have the smallest skews at the shortest periods. This indicates that at small penetration depths of the magnetotelluric field the structure is more nearly one- or two-dimensional. At longer periods the penetration depths should become comparable with the lateral extent of the anomaly and the

MT fields therefore sense a more strongly three-dimensional structure.

One-dimensional models are not difficult to calculate and are commonly used to obtain a crude estimate of the depth and conductivity when matched to the apparent resistivity data. A one-dimensional layered model which provides a reasonable fit to the station I data is shown in Fig. 4. The resistivity of the top layer was estimated from the EM31 measurements and that of the second layer from EM34. The AMT profiles (Figs. 8-13) indicate that the resistivity is quite variable at least in the top 500 m, which strongly suggests the presence of fractures, dykes and changes in moisture content. For the layers representing the lower crust and upper mantle the thicknesses and resistivities are based on the estimates of Kurtz and Garland (1976). However the sounding data for station I do not resolve these layers. The only real constraint is that the resistivity must increase by several orders of magnitude beneath the anomaly.

For a one-dimensional interpretation the top of the conductor is well located at 500 ± 100 metres. Its thickness is between 4 to 7 km and is not well determined because of the poor signal-to-noise ratio in the long period data. The thin $0.03 \Omega\text{m}$ layer is necessary to model the steep slope (minus one) of the apparent resistivity curve. The thick $1 \Omega\text{m}$ layer is required to fit the data between 10 s and 1,000 s. The model shown in Fig. 4 gives the best fit of 19 which were tried. At station I the major axis of anisotropy (Fig. 3) is approximately parallel to the St. Lawrence River. Its orientation varies from 65° to 18° east of magnetic north, the average being about 45° .

Station II lies close to the power line and satisfactory MT data were not obtained at frequencies above 14 Hz (0.07 s). The major axis of anisotropy (Fig. 3) is not well defined except at the shortest periods.

The apparent resistivity curve (Fig. 5) along the major axis of anisotropy is nearly parallel to the curve drawn through the ρ_a data from station I. The corresponding layered model gives a conductor (1 Ωm) at least 2 km thick beginning at a depth of about 1 km.

At station III the ρ_a curve (Fig. 6) for the minor axis of anisotropy is parallel to the major axis curves at stations I and II, but is displaced downward toward lower resistivity values. A layered model for this curve puts the top of the conductor at a depth of only 270 m. On the other hand a similar one-dimensional interpretation for the major ρ_a curve puts the top of the conductor at approximately 350 m. The major axis of anisotropy is shown in Fig. 3.

2. Structural Direction of the Anomaly

The structural direction of a two-dimensional body or an elongated three-dimensional body may be estimated from the tipper (Vozoff, 1972). This quantity is defined as

$$T = \{ |A|^2 + |B|^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

if A and B are derivable, at a given period or frequency, from an observed linear relationship between the magnetic field components, i.e.

$$H_z = AH_x + BH_y .$$

In general A and B are frequency dependent and complex. For a strictly two-dimensional structure A and B will have the same phase and the direction of the horizontal magnetic field which best correlates with the vertical field is given by

$$\theta = \tan^{-1} B/A$$

where B/A is real. The azimuth perpendicular to θ gives the strike of the structure. The tipper amplitudes at stations I, II and III are plotted in Fig. 17. For station I, T shows an appreciable change between periods of 0.04 and 1 s with a maximum at about 0.15 s. At these periods, therefore the magnetic field is displaying a strong inductive response to the local anomaly. The tipper direction determines whether the major or minor axis of anisotropy aligns with the strike of the structure. The structural directions derived in this manner for a period of 0.1 s are shown in Fig. 18.

At stations I and III the structural directions lie perpendicular to the major axis of anisotropy derived from the impedance tensor. At station II the situation is not the same. Here the tipper indicates that the structure strikes parallel to the major axis of anisotropy.

3. AMT Profiles

The profile plots of Figs. 8-13 are almost self-explanatory. At frequencies of 100 Hz and higher ρ_a is usually well above 100 Ωm except at stations 1, 6 and 11 where the low values are probably caused by conducting fractures or discontinuities of some kind near the surface. On all three profiles the lowest apparent resistivity values are usually found at 8 and 21 Hz and it seems clear that at these frequencies the MT field is penetrating deep enough to detect the conducting body. Profile 3 (Figs. 12, 13 and 16) is particularly interesting because of the enormous resistivity contrast between stations 1 and 11 near the access road and stations 12 and 19 at the northeast end of the line. The very high resistivities at all frequencies at these latter two stations indicate that they lie outside the anomaly zone.

The pseudo-sections show a good deal of vertical structure and give a strong impression of heterogeneity close to the surface. At the southwestern end of profiles 2 and 3 (Figs. 15 and 16) the anomaly either

dips steeply to greater depths or vanishes. Along profile 1 (Fig. 14) running northwest towards the power line the top of the anomaly is probably showing at frequencies of 8 and 21 Hz, though it appears to dip to greater depths beyond station 6. The sounding results from station II tend to support this conclusion.

CONCLUSIONS

The MT anomaly near Ste-Mathilde is characterized by extremely severe attenuation of the telluric field at periods longer than 1 s over a limited region. The data indicate that a rather large body of unusually high electrical conductivity must exist at fairly shallow depths in the crust. One-dimensional analysis of the measured apparent resistivities suggests the top of the conductor lies at depths varying between about 250 m and 1,000 m at stations I, II and III along the access road running toward the power line (Fig. 3).

The structural directions from the three sounding stations indicate a northwest-southeast trending structure dipping to greater depths toward the northwest. Stations I and III are likely near the northeastern flank of the conducting body, since their major axes of anisotropy lie perpendicular to the structural direction. These stations also have large tipper values indicating that neither is directly over the most conducting part of the anomaly.

The sounding data have been interpreted by means of one-dimensional or two-dimensional assumptions and models and such simplified concepts are obviously inadequate for a rigorous treatment. Nonetheless they do provide crude estimates of the depths where the anomalous feature is expected to lie and much more sophisticated and expensive analytical techniques would be required to improve the results. We believe that it would be more useful at this point to conduct further detailed geophysical

and geological surveys over the region in order to better understand the extent and cause of this interesting feature. It is clear from the strong suppression of the telluric field and the apparent resistivity data plotted in Fig. 4 that the anomaly must be of sufficient size to extend over a few km in depth. The resistivities shown in the layered interpretations could be considerably in error (100% or more). We believe that values as low as $0.03 \Omega\text{m}$ reflect the inadequacies of simple analytical models and are not at all realistic in a physical sense.

At this time we do not have available any detailed geological information on the anomalous region. The geological map published by the Québec Department of Natural Resources shows the area as lying only about 1 km to the east of the Paleozoic limestones and shales which overlie the Grenville rocks in the immediate vicinity of La Malbaie. The rock outcrops near the survey area are mapped as mixed paragneisses with some amphibolite. The overburden is very thin in most places and rock outcrops were encountered frequently during the course of the profiling work.

The cause of the unusually high electrical conductivities is unknown. It may be that a large volume of broken and fractured rock has become inundated with highly conducting aqueous solutions; it is possible that graphitic, sulphide, or ferrous mineralization is a contributing factor.

ACKNOWLEDGEMENTS

The Geonics EM 31 and EM 34 instruments were kindly loaned to the authors by Dr. W.J. Scott of the Geological Survey of Canada. Dr. Scott also arranged to have Mr. John Lobach conduct a few Schlumberger DC resistivity profiles over the anomaly, and some of his data are shown in Fig. 2. We would like to thank Dr. Michel David, Managing Director of the Mineral Exploration Research Institute, for his interest in this project and for making available the AMT profiling and sounding equipment.

REFERENCES

- Kurtz, R.D. and G.D. Garland, 1976. Magnetotelluric measurements in eastern Canada, Geophys. J.R. astr. Soc., 45, 321-347.
- Kurtz, R.D. and E.R. Niblett, 1979. Time-dependence of magnetotelluric fields in a tectonically active region in eastern Canada, J. Geomag. Geoelectr. (in press)
- Pham Van Ngoc, 1977. Magnetotelluric reconnaissance survey of the Lillooet Valley, British Columbia, Open file report of the Earth Physics Branch 77-20, 40 p.
- Swift, C.M., 1967. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States: Ph.D Thesis, M.I.T.
- Vozoff, K., 1972. The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins, Geophysics, 37, 98-141.

Figure 1 Locations of the original EPB MT station at Ste-Mathilde, the Schlumberger current electrodes, and the temporary telluric stations which are numbered 1 to 4. Magnitudes and dates of known earthquakes are shown by large dots.

Emplacements de la station originale MT de la D.P.G. à Ste-Mathilde, des électrodes de courant Schlumberger et des stations telluriques temporaires numérotées de 1 à 4. Les magnitudes et dates des tremblements de terre connus sont indiquées par de gros points.

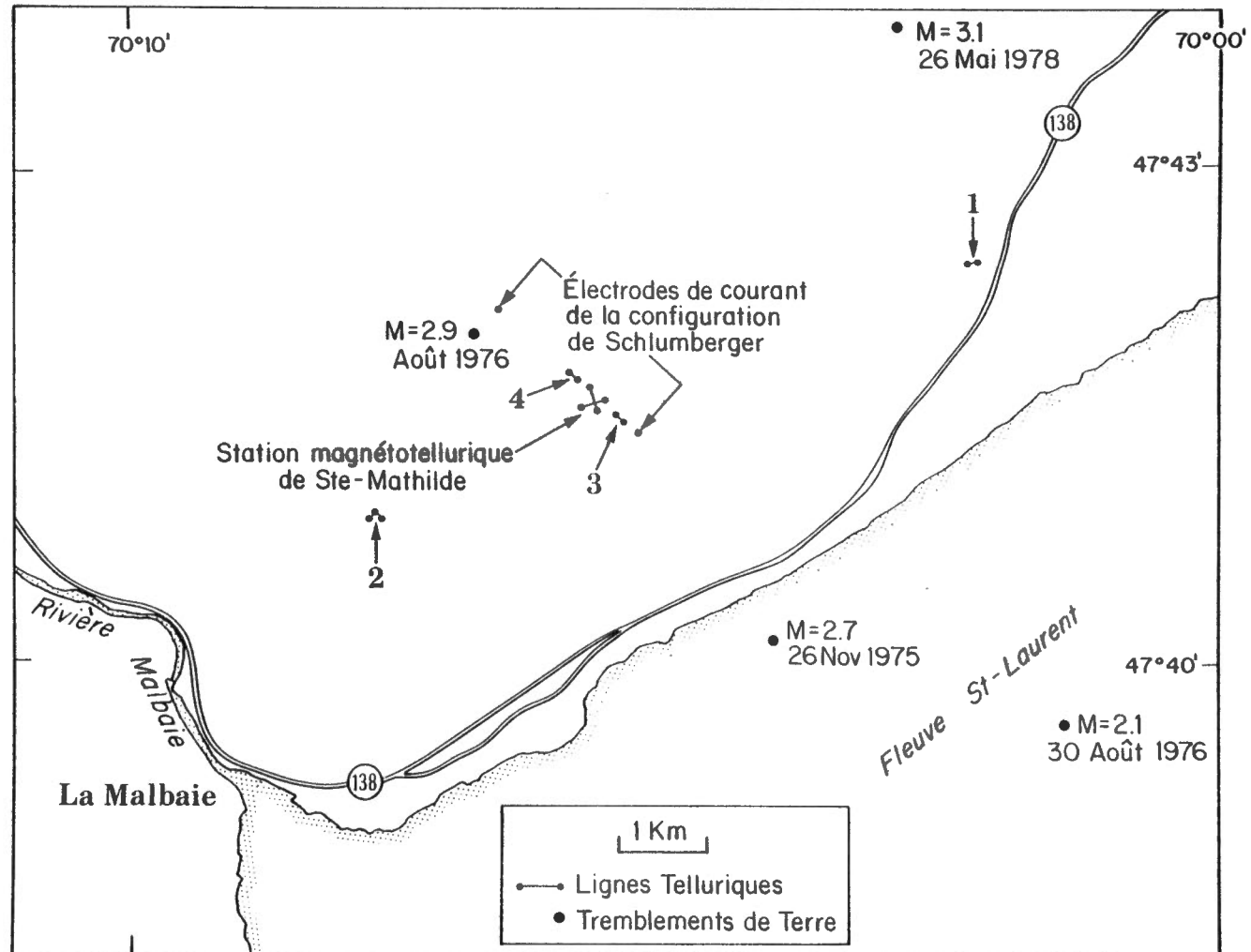
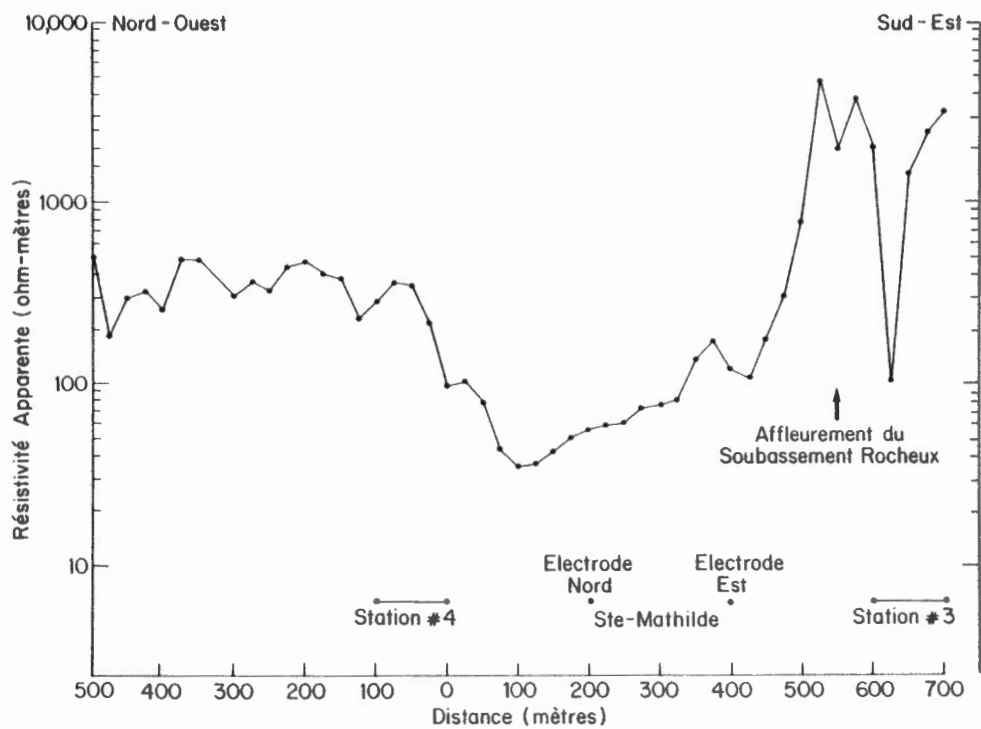


Figure 2 Schlumberger apparent resistivity profile for current electrodes shown in Figure 1.

Profil de résistivité apparente de Schlumberger, pour les électrodes de courant indiquées dans la figure 1.



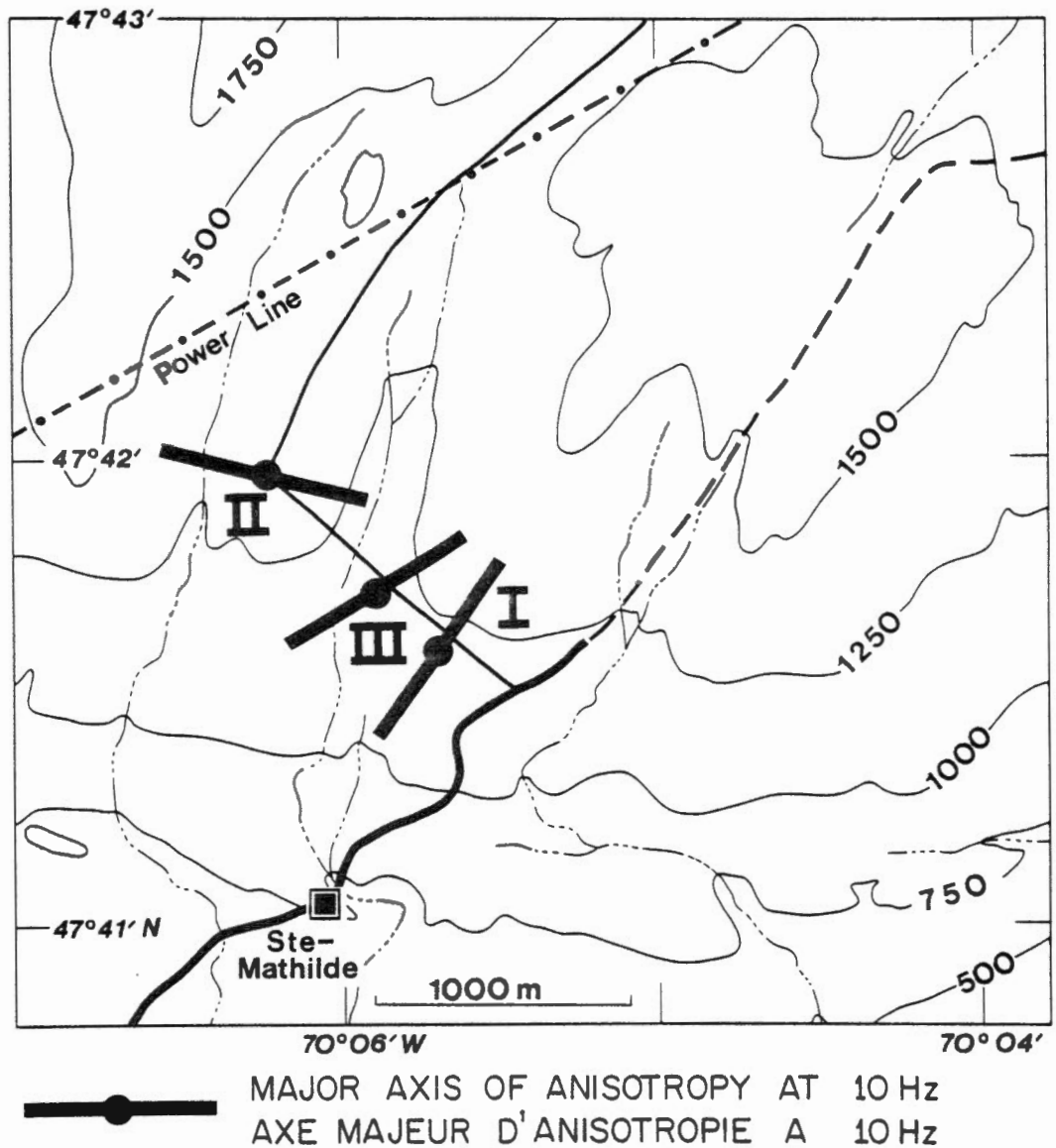


Figure 3 Major axes of anisotropy at 10 Hz for the three AMT sounding stations.

Grands axes d'anisotropie à 10 Hz, pour les trois stations de sondage AMT.

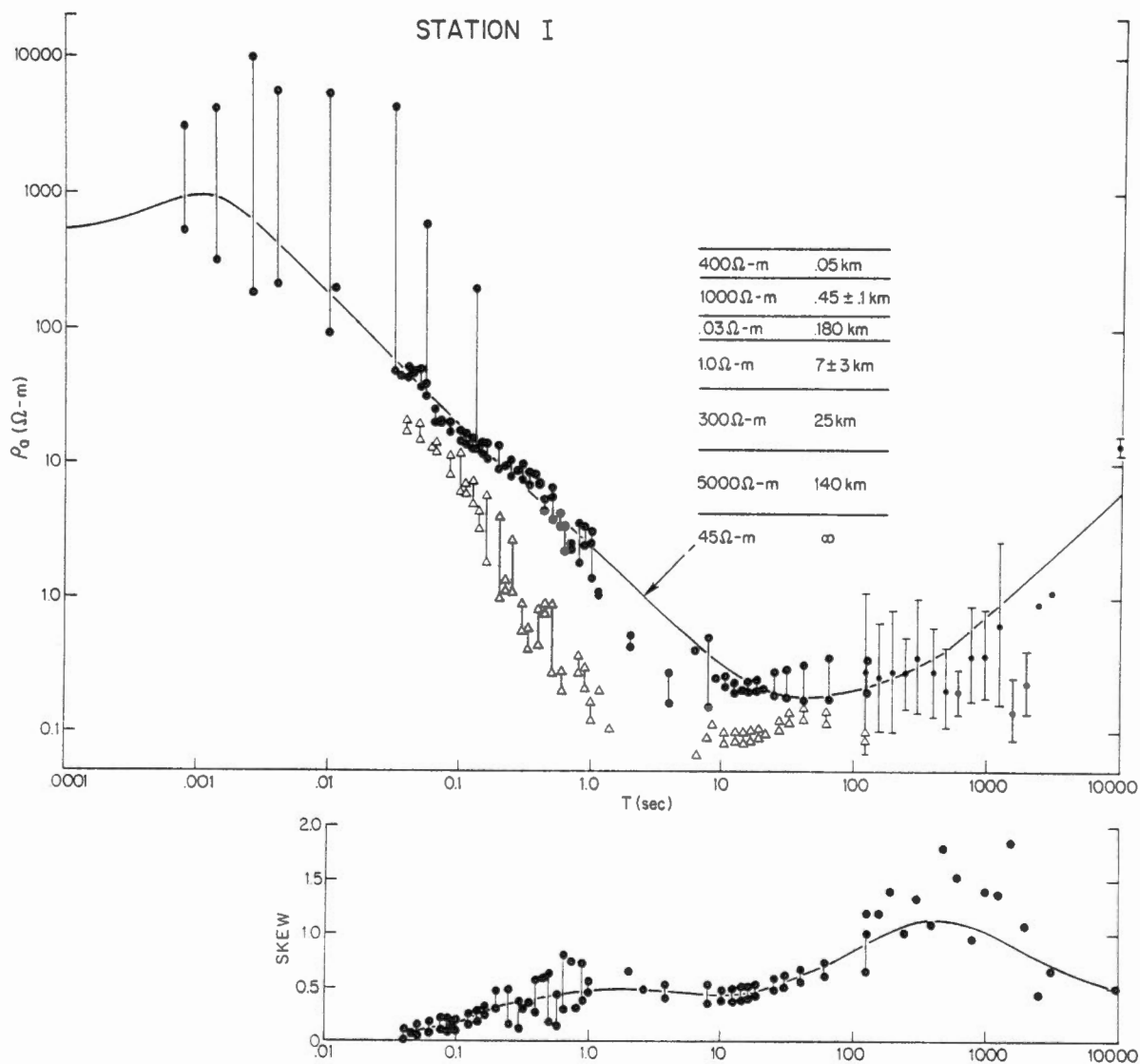
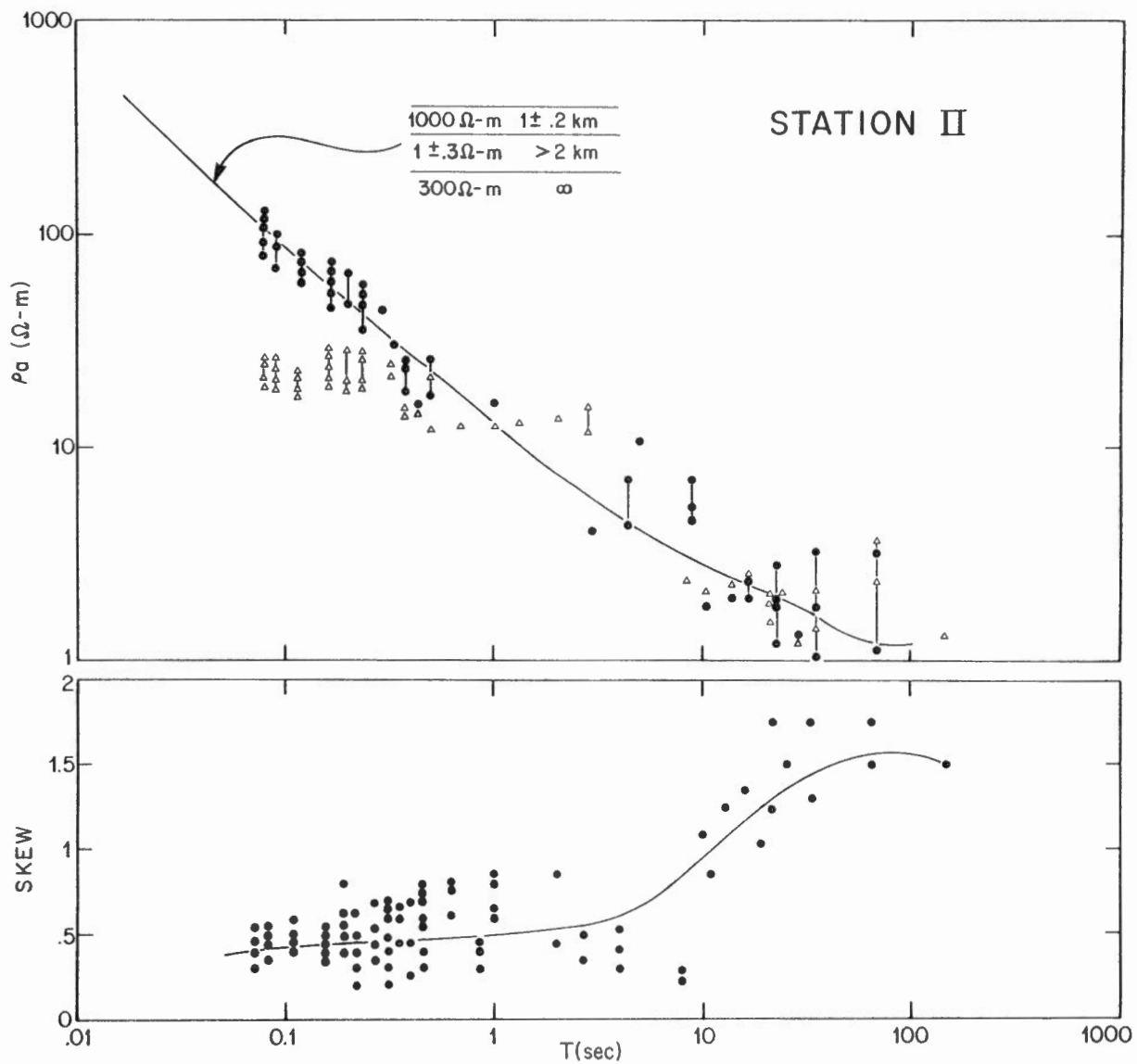


Figure 4 Apparent resistivity curves for station I. Tensor data in the principal axes of anisotropy from .03 s to 10,000 s. Scalar data from .0008 s to .13 s. Error bars from .0008 s to 100 s represent maximum scatter in the resistivity. Bars from 100 s to 10,000 s represent two standard deviations. Solid curve is for the one-dimensional model shown.

Courbes de résistivité apparente à la station I. Données tensorielles dans les principaux axes d'anisotropie pour des périodes de 0,03 s à 10 000 s. Valeurs scalaires de 0,0008 s à 0,13 s. Les marges d'erreurs (traits) entre 0,0008 s et 100 s représentent la dispersion maximale de la résistivité. Les marges allant de 100 s à 10 000 s représentent deux écarts-types. La courbe épaisse s'applique au modèle unidimensionnel indiqué.

Figure 5 Tensor apparent resistivity in principal axes of anisotropy at station II. Solid curve is for the one-dimensional model shown.

Résistivité apparente tensorielle dans les principaux axes d'anisotropie à la station II. La Courbe épaisse s'applique au modèle unidimensionnel indiqué.



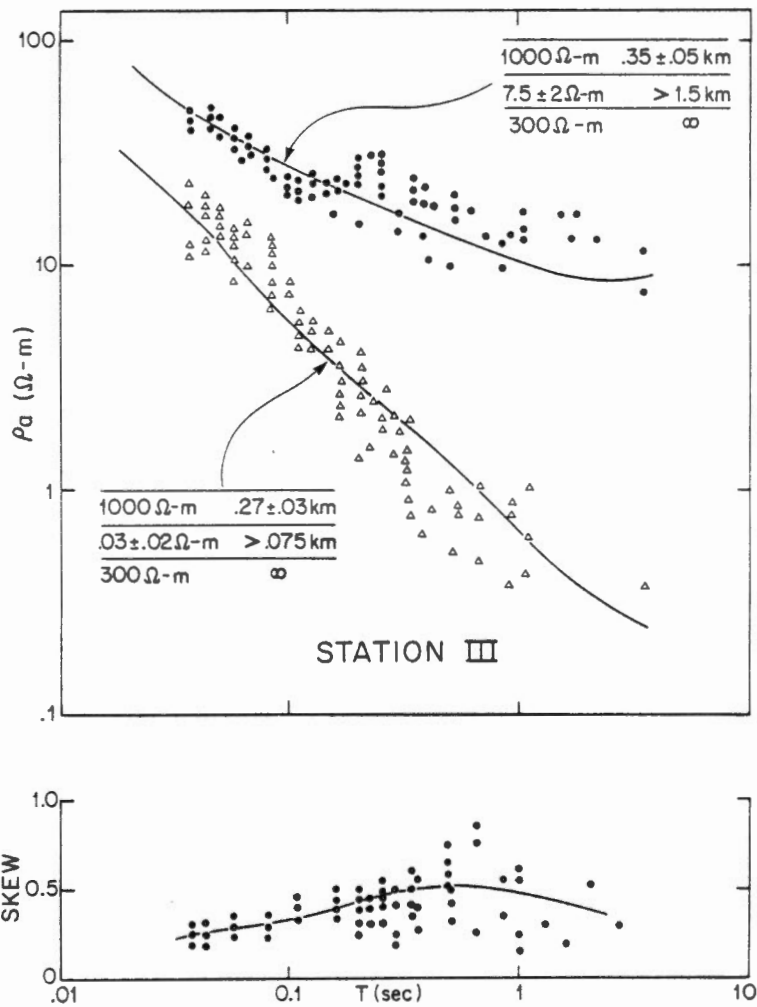


Figure 6

Tensor apparent resistivity in principal axes of anisotropy at station III. Solid curve is for the one-dimensional model shown.

Résistivité apparente tensorielle dans les principaux axes d'anisotropie à la station III. La courbe épaisse s'applique au modèle unidimensionnel indiqué.

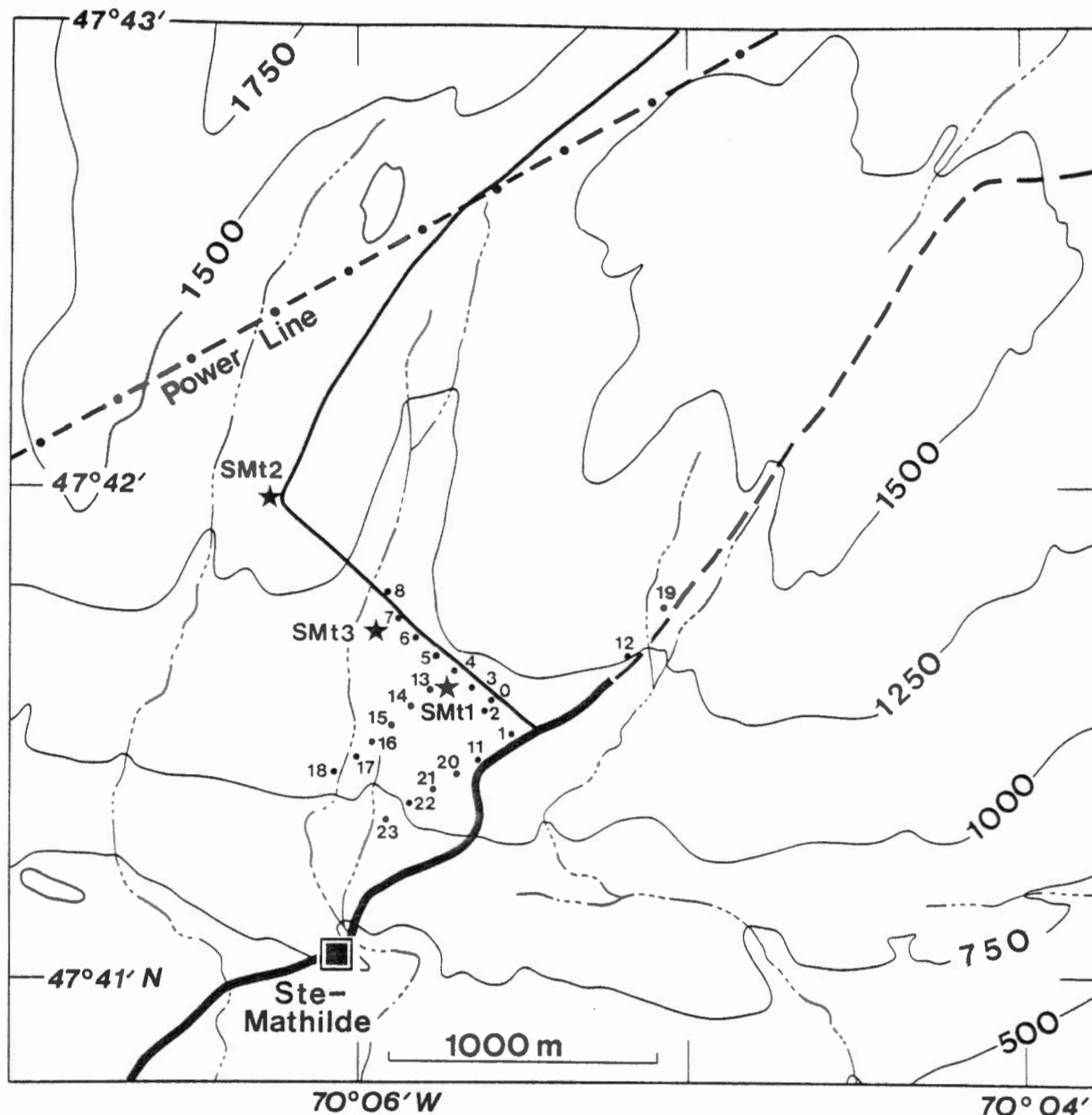


Figure 7 The profiling stations. Profile 1 includes station 1 to 8 along the access road running northwest towards the power line. Profile 2 includes station 4, 13, 14, 15, 16, 17, 18 and Profile 3 includes stations 19, 12, 1, 11, 20, 21, 22, 23. The three sounding stations are indicated by stars. The elevation contours are in feet above mean sea level.

Les stations d'établissement de profils. Le profil I englobe les stations 1 à 8, le long de la voie d'accès qui s'étend vers le nord-ouest, en direction de la ligne d'électricité. Le profil 2 comprend les stations 4, 13, 14, 15, 16, 17, 18 et le profil 3 les stations 19, 22, 1, 11, 20, 21, 22, 23. Les trois stations de sondage sont indiquées par des étoiles. Les courbes d'élévation sont calculées en pieds au-dessus du niveau moyen des mers.

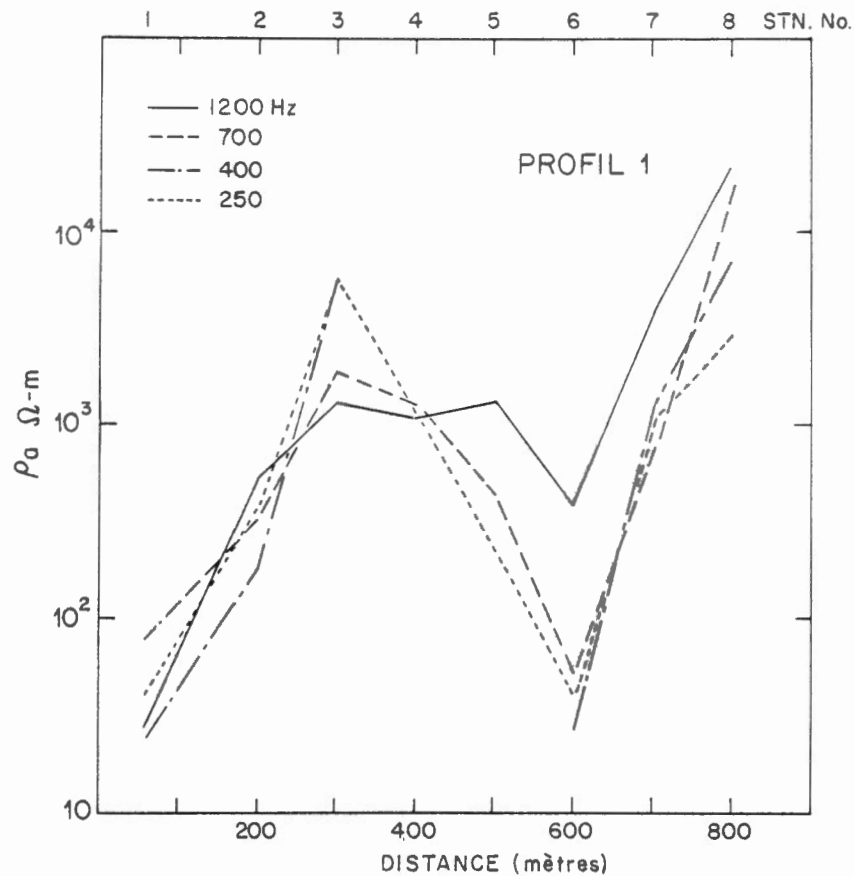


Figure 8 High frequency AMT data on Profile 1.

Valeurs AMT correspondant à des hautes fréquences, dans le profil 1.

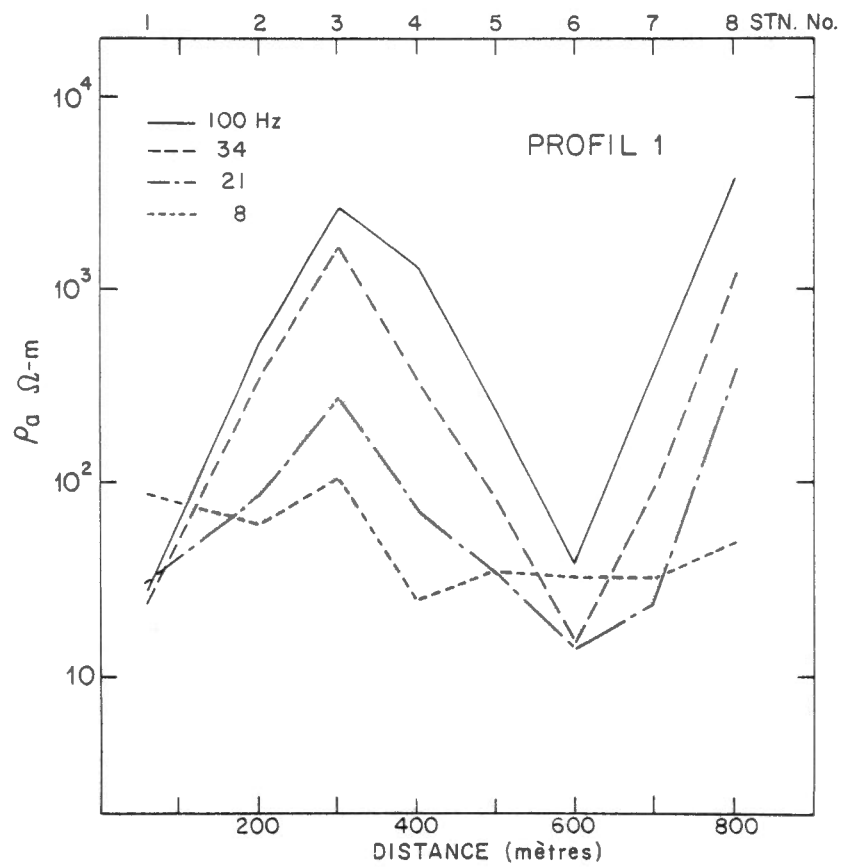


Figure 9 Low frequency AMT data on Profile 1.

Valeurs AMT correspondant à des basses fréquences, dans le profil 1.

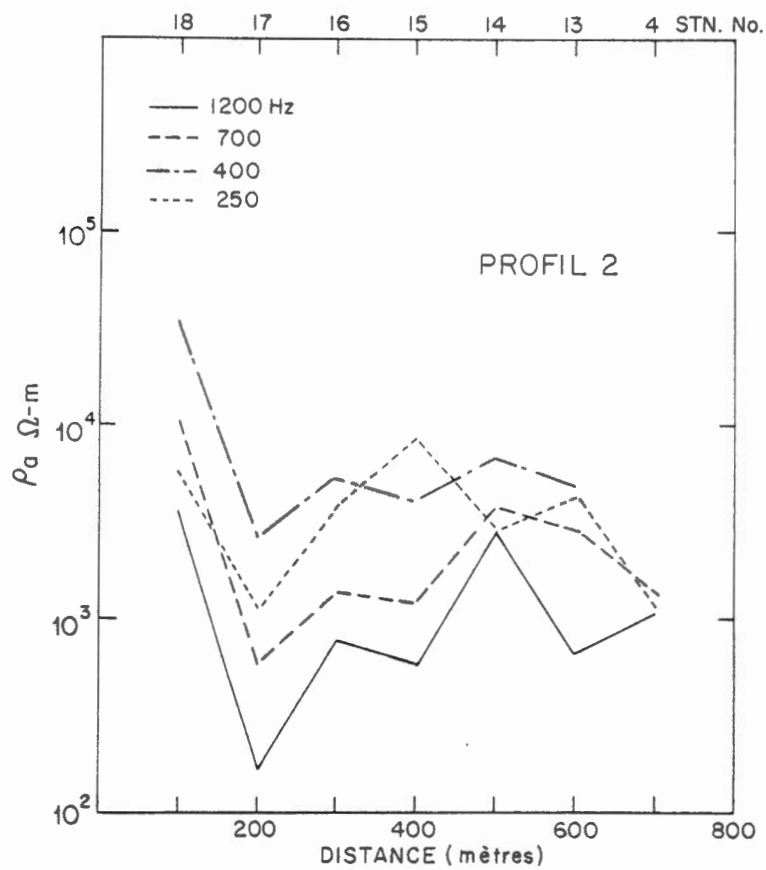


Figure 10 High frequency AMT data on Profile 2.

Valeurs AMT correspondant à des hautes fréquences, dans le profil 2.

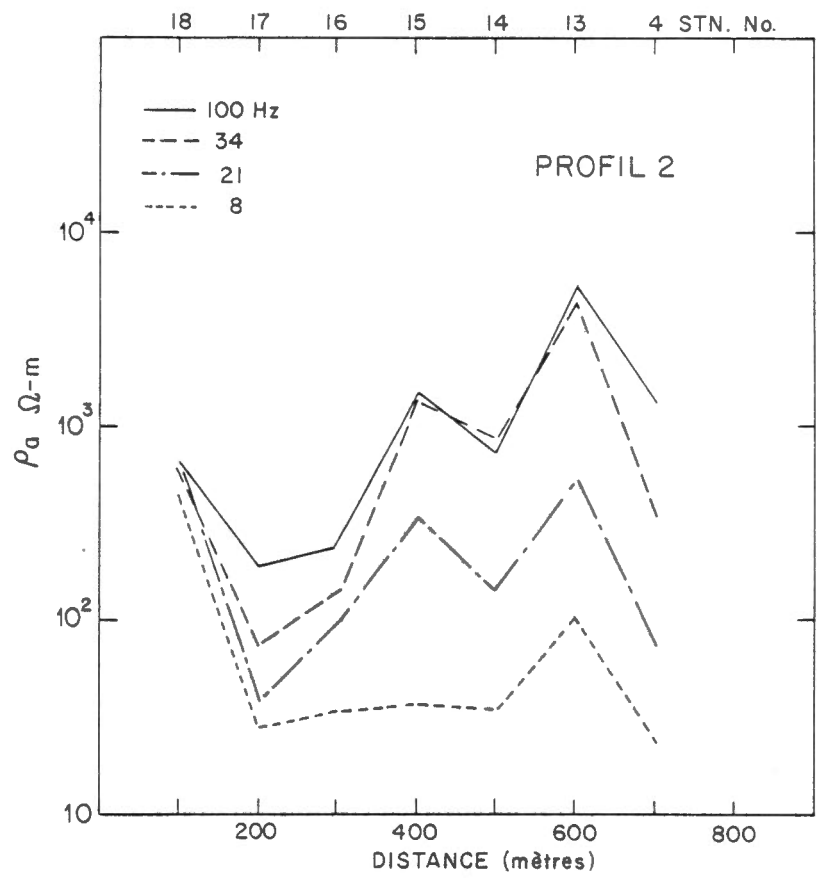


Figure 11 Low frequency AMT data on Profile 2.

Valeurs AMT correspondant à des basses fréquences, dans le profil 2.

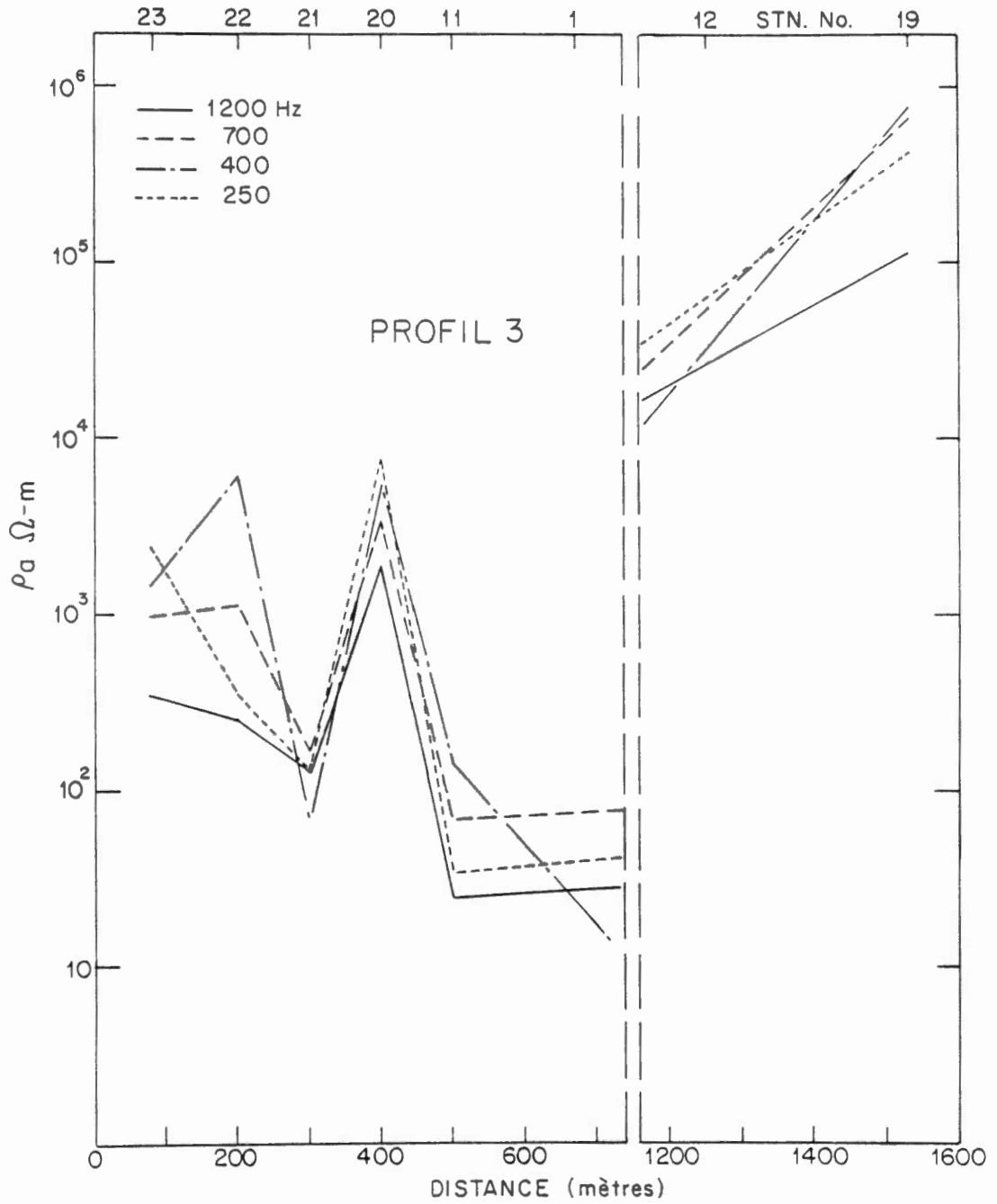


Figure 12 High frequency AMT data on Profile 3.

Valeurs AMT correspondant à des hautes fréquences, dans le profil 3.

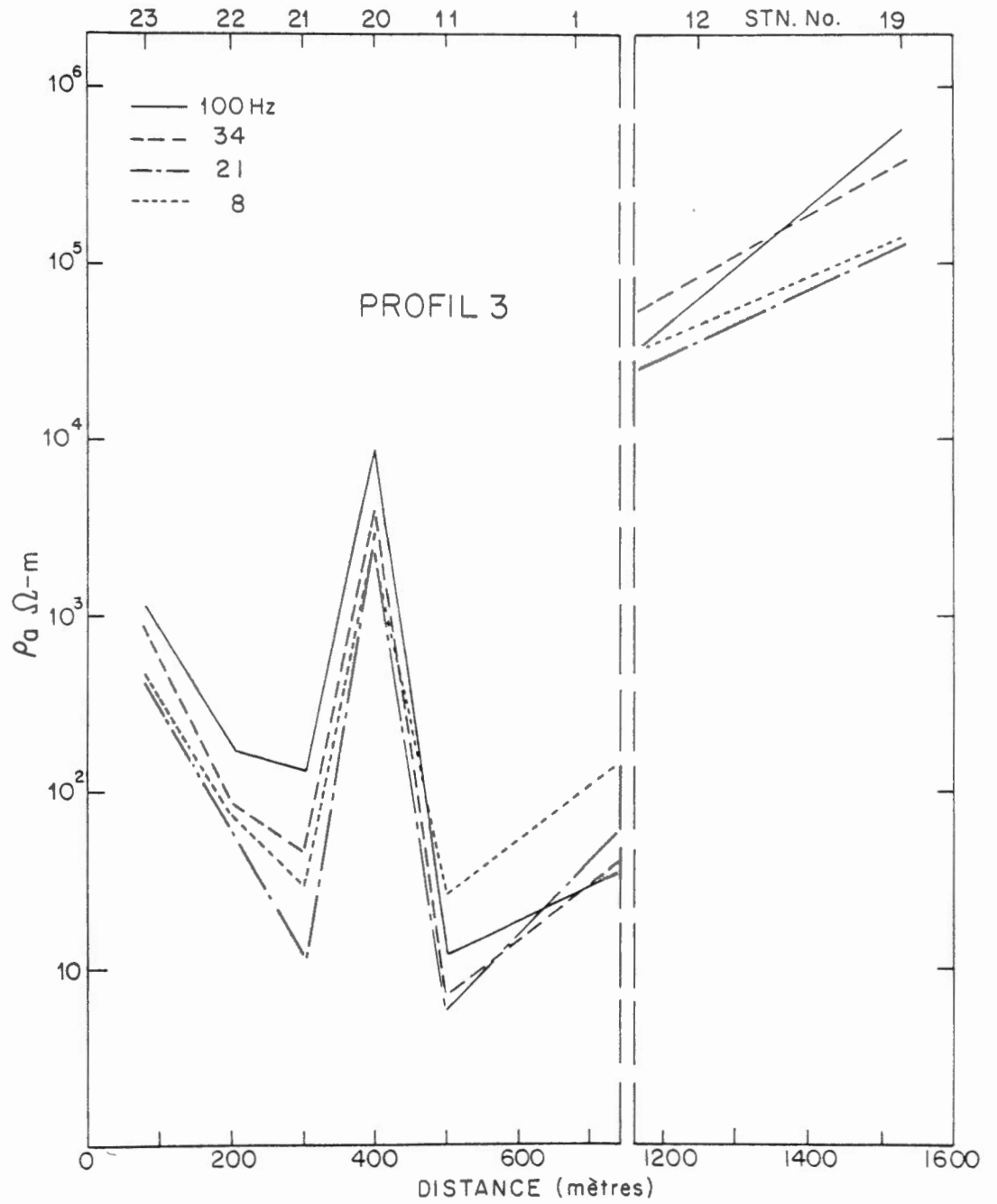
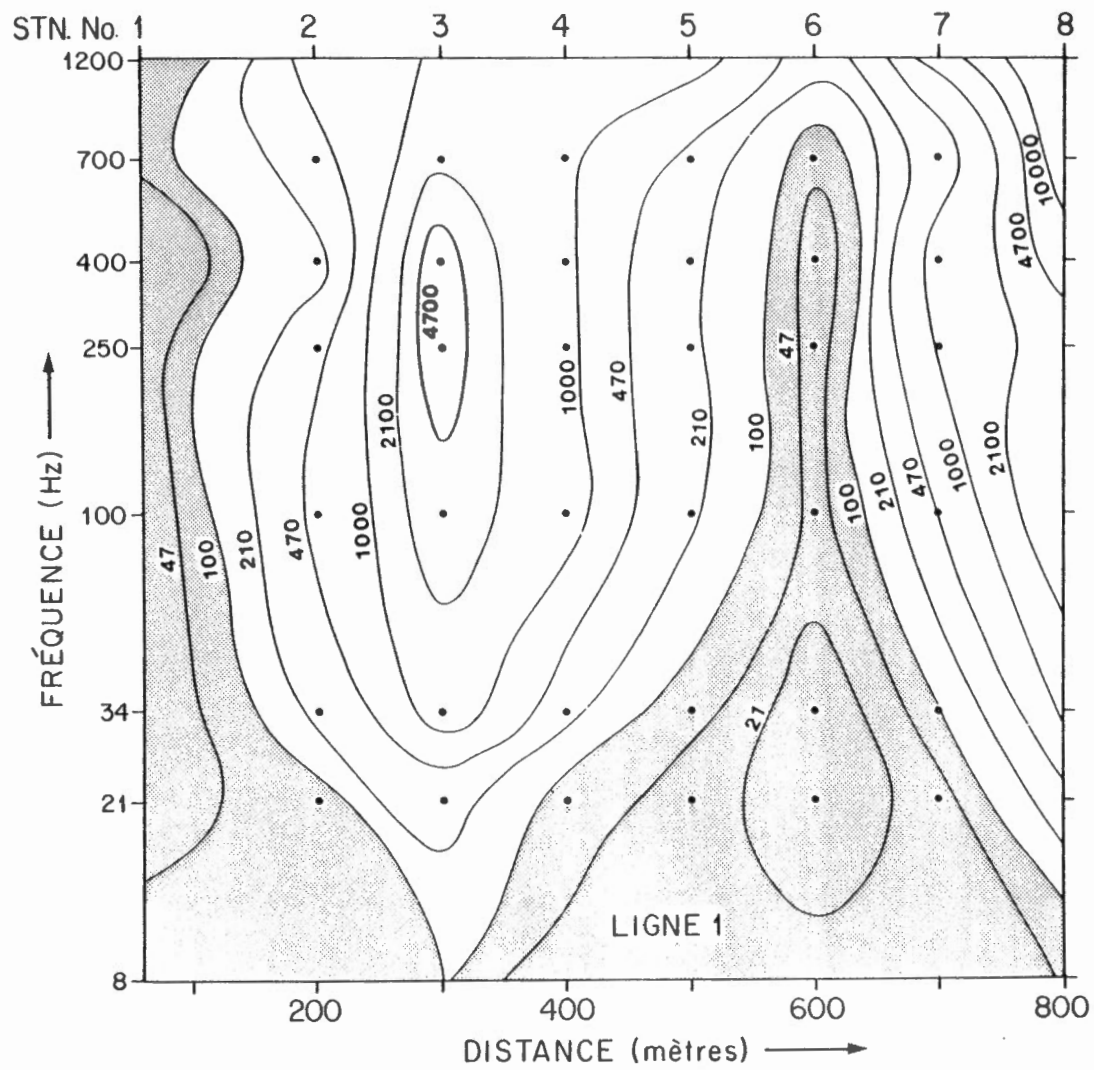


Figure 13 Low frequency AMT data on Profile 3.

Valeurs AMT correspondant à des basses fréquences, dans le profil 3.

Figure 14 Profile 1 pseudo-section.

Pseudo-section du profil 1.



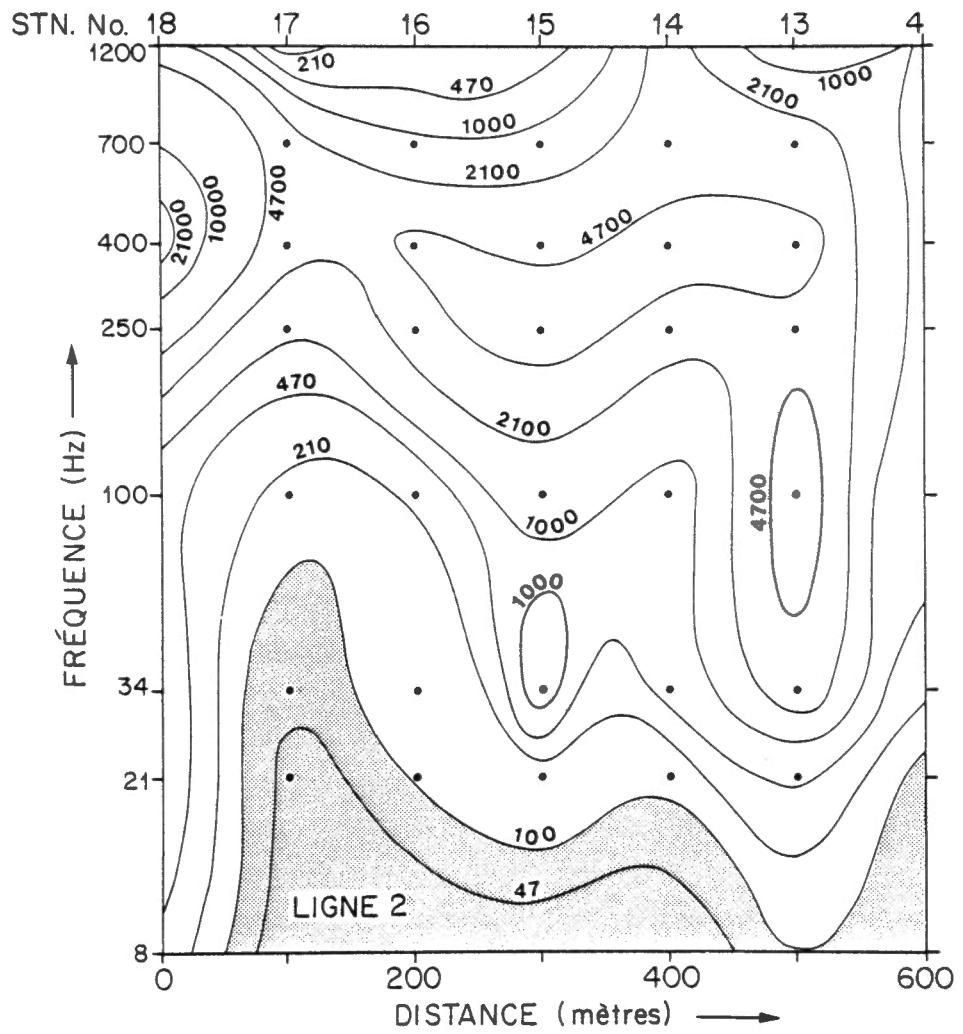


Figure 15 Profile 2 pseudo-section.

Pseudo-section du profil 2.

Figure 16 Profile 3 pseudo-section.

Pseudo-section du profil 3.

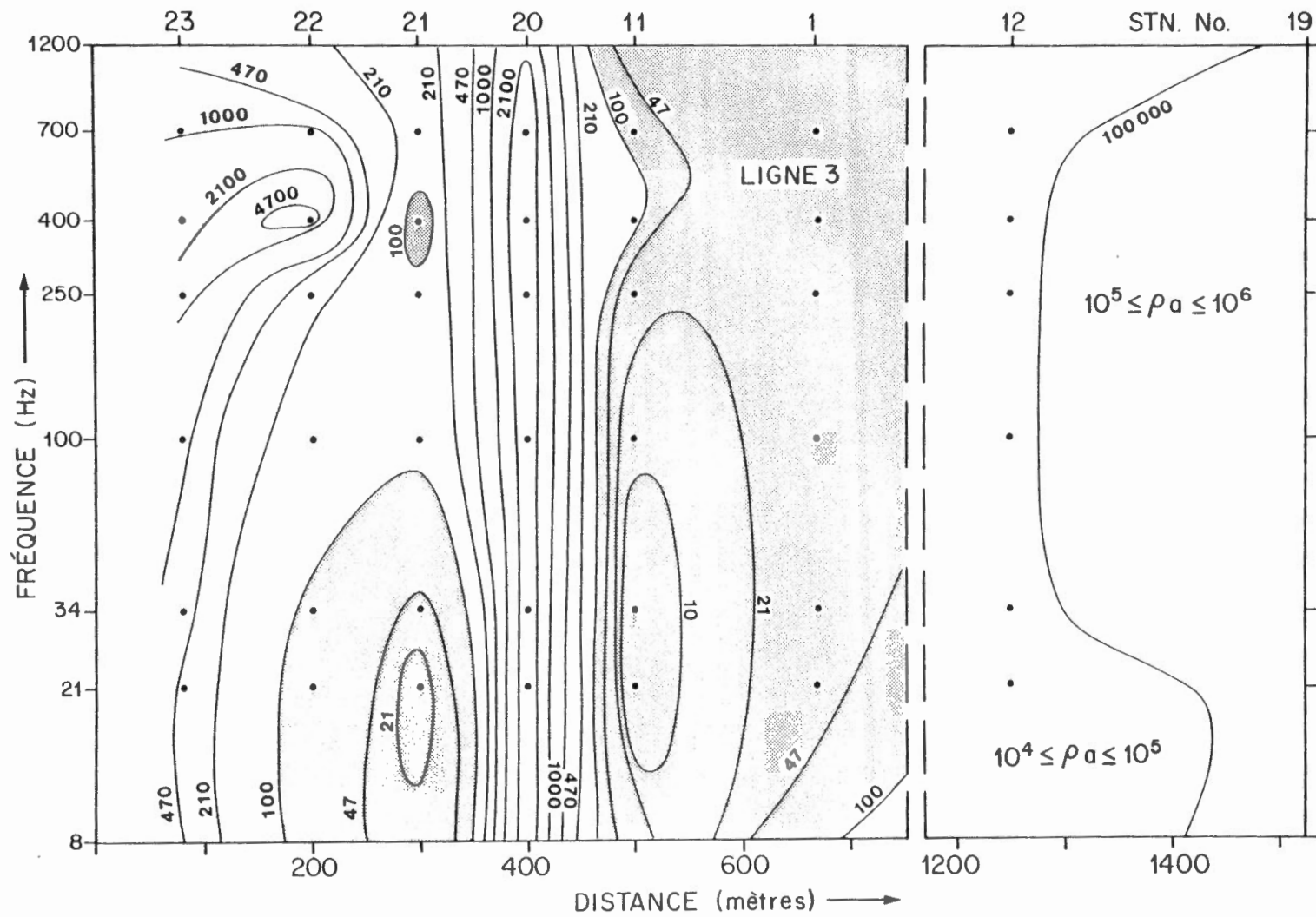
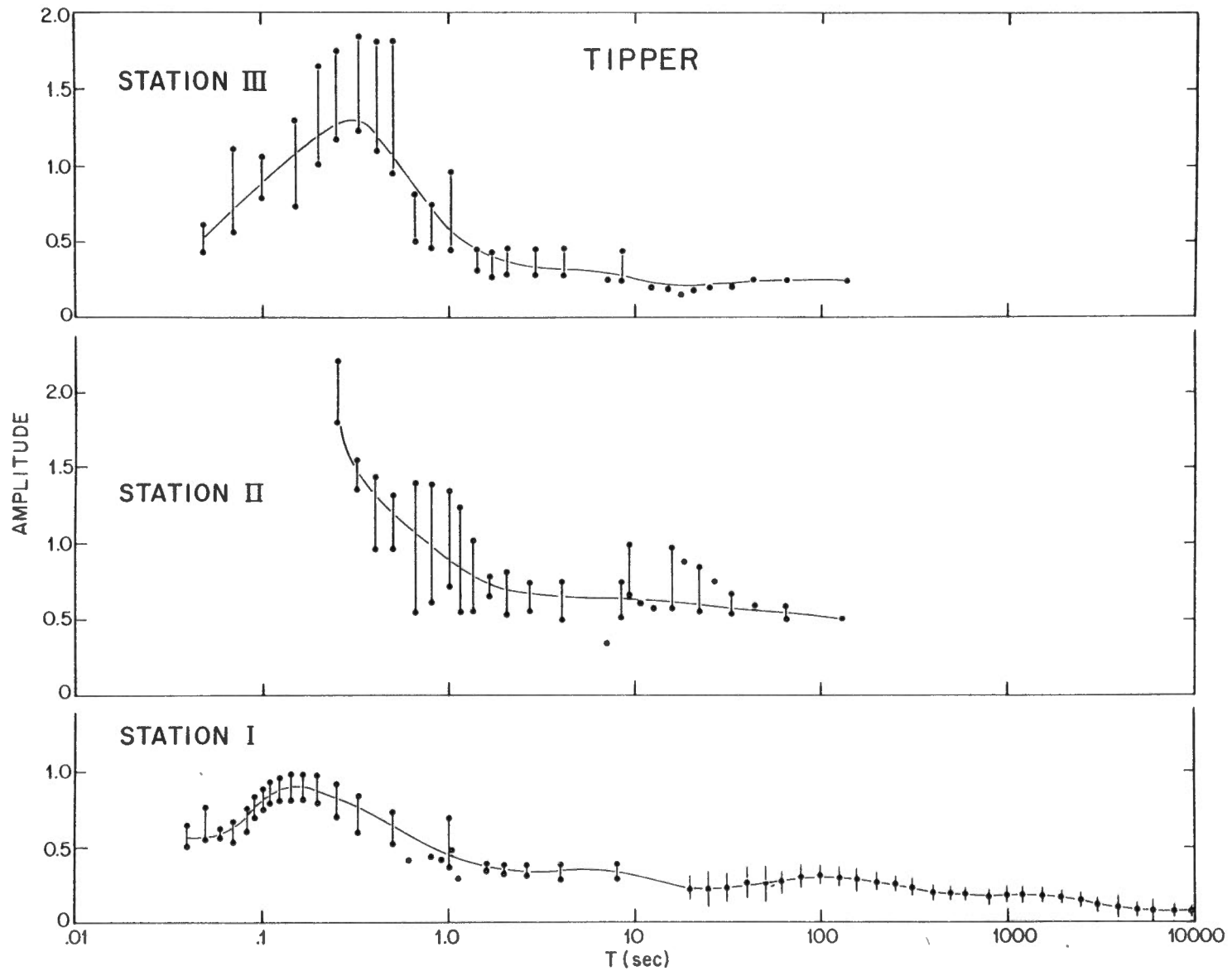


Figure 17 Tipper amplitude as a function of period at the three AMT sounding stations.

Amplitude du basculeur en fonction de la période, aux trois stations de sondage AMT.



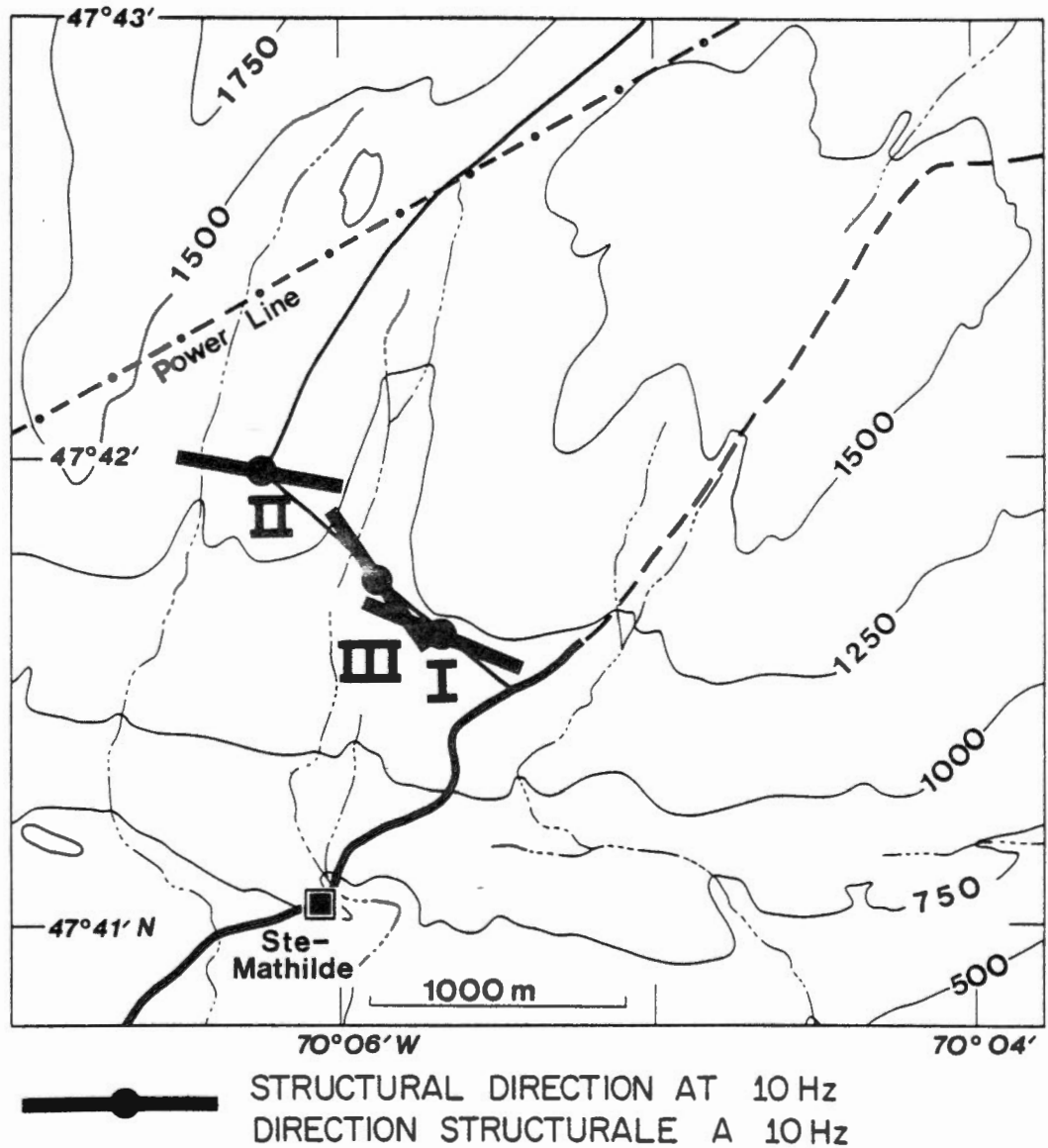


Figure 18 Structural direction at 10 Hz for the three AMT sounding stations as determined from the principal axes of anisotropy and the tipper direction.

Direction structurale calculée à 10 Hz, aux trois stations de sondage AMT, d'après les principaux axes d'anisotropie et la direction du basculeur.