

Géophysique interne
Modélisation magnétotellurique de la structure géologique
profonde de l'unité granulitique de l'In Ouzzal
(Hoggar occidental)

Abderrezak Bouzid ^{a,c}, Nouredine Akacem ^b, Mohamed Hamoudi ^{c,*},
Khadidja Ouzegane ^d, Abdeslam Abtout ^a, Jean-Robert Kienast ^e

^a Département de géophysique, CRAAG, BP 63 Bouzareah, Alger, Algérie

^b Observatoire de Tamanrasset, CRAAG, BP 32, Tamanrasset, Algérie

^c Département de géophysique, FSTGAT, USTHB, BP 32, Al Alia, Dar el Beida, Alger, Algérie

^d Département de géologie, FSTGAT, USTHB, BP 32 Al Alia, Dar el Beida, Alger, Algérie

^e UMR 7097, laboratoire de géosciences marines, CNRS-PGP, université Paris-7, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

Reçu le 6 août 2007 ; accepté après révision le 24 juillet 2008

Disponible sur Internet le 21 octobre 2008

Présenté par Jean-Louis Le Mouél

Résumé

L'unité granulitique de l'In Ouzzal (IOGU), ou Terrane de l'In Ouzzal (IOT), est un bloc archéen faisant partie de la mosaïque des terranes du Hoggar. Mobilisée à l'Éburnéen, elle est caractérisée par un métamorphisme de très haute température, appliqué à des séries qui pourraient représenter d'anciennes structures en dômes et bassins. Le but de cette étude, basée sur une campagne de 12 sondages magnétotelluriques (MT) était, d'une part, de caractériser en profondeur les limites extérieures de l'IOGU et, d'autre part, d'examiner la possibilité de reconstituer d'anciennes structures en dômes et bassins, même transformées par le métamorphisme et les déformations ultérieures. L'analyse et la modélisation des données MT montrent que les bordures de l'IOGU plongent en profondeur au moins jusqu'à la base de la croûte et peuvent bien représenter des zones de suture ; à l'intérieur du terrane lui-même, la méthode choisie ne s'est pas révélée suffisamment discriminante pour séparer dômes et bassins trop étirés. Le trait remarquable de la transversale étudiée est un grand accident s'enracinant assez profondément et qui pourrait être interprété comme une faille majeure, séparant l'IOGU en deux compartiments différents. *Pour citer cet article : A. Bouzid et al., C. R. Geoscience 340 (2008).*
© 2008 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Magnetotelluric modeling of the deep geologic structure of In Ouzzal Granulitic Unit (western Hoggar). The In Ouzzal Granulitic Unit (IOGU) or In Ouzzal Terrane (IOT) is an Archaean block belonging to the Hoggar terrane mosaic. It has been reworked during the Eburnean and is characterized by ultrahigh temperature metamorphism of the structures, which are likely to be old dome and basin structures. The aim of this study, based on a survey of 12 magnetotelluric (MT) soundings, was to characterize the IOGU deep lateral boundaries and to see if it is possible to reconstruct some of these old dome and basin structures after their transformation by metamorphism and deformation. MT data analysis and modeling show that IOGU boundaries extend downwards, at least down to the crust's basement, and may represent suture zones. Inside the terrane, the MT observations do not allow

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : hamoudi@ipgp.jussieu.fr (M. Hamoudi).

separation between dome and basin structures, because these features are severely stretched. However, the main MT transverse response feature is a deeply rooted great accident, which may be interpreted as a major fault that separates IOGU into two compartments. **To cite this article:** A. Bouzid et al., C. R. Geoscience 340 (2008).

© 2008 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Unité granulitique de l'In Ouzzal ; IOGU ; Archéen ; Structure en dômes et bassins ; Ceinture de roches vertes ; Magnétotellurique ; MT ; Algérie

Keywords: In Ouzzal Granulitic Unit; IOGU; Archaean; Dome and Basin structure; Greenstone Belt; Magnetotellurics; MT; Algeria

Abridged English version

Introduction

The In Ouzzal Granulitic Unit (IOGU), also called In Ouzzal Terrane (IOT), is an Archaean north-south elongated block; it is continued across the Algerian-Malian boundary by the Iforas Granulitic Unit [3,15,23]. The IOGU block was reworked during the Eburnean Orogeny (2 Gyr) [5]. It is composed of two units:

- a lower crustal unit, made up essentially of enderbitic orthogneisses and charnokites,
- a supracrustal unit, formed of quartzites, banded iron formations, marbles, Al-Mg granulites and Al-Fe granulites associated with mafic and ultramafic lenses [23].

The lithology of these units is reminiscent of the classical opposition between domes and basins of Paleoproterozoic terrains. In this case, the IOGU would have been completely transformed by a metamorphism of very high temperatures and deformation. Its boundaries with surrounding Panafrican terrane branches are defined by two vertical wrench faults [23] labeled East and West Ouzzalian Shear Zones. A major geologic problem is to know how deep rooted these faults are, and whether they can be old sutures or not.

The IOGU remains geophysically poorly known. However, it is characterized by a positive gravimetric anomaly of 20 mgal amplitude of north-south to NE-SW trends and low heat flow values [4,17,18]. A measure of 24 mW/m² was obtained in shallow holes at Tirek located at about 100 km south of the study area [18].

The pressure and temperature conditions (7 to 10 kbar and 800 to 1000 °C) in the Ouzzal series were thought to imply that rocks of the IOGU surface are of lower crust origin, the upper crust being completely eroded [23]. This allows a direct access to the deep crust. This Archaean block should have a particular

electric signature because of its geologic history and structure. Indeed, electric resistivity of a geologic formation is affected by its age, nature and thermodynamic conditions [8,16,25]. Magnetotellurics (MT) can then help answering two questions:

- does the IOGU dome and basin structure, even completely transformed, have a detectable electric signature?
- does this Archaean deep structure exhibit zoning?

For this purpose, a first MT survey was carried out. Analysis of collected data and modeling results are presented hereafter.

MT data

The MT survey was carried out in March 2005. Nine broadband and three high frequency (AMT) soundings were realized. The soundings were distributed along a 100-km length east-west profile centered approximately on the south part of Tekhamalt area and crossing the IOGU south to parallel 23°N (Fig. 1b). The MT data cover the period range from 0.0001 to 3000 s for the broadband and from 0.0001 to 1 s for AMT sites.

MT data analysis

Intrinsic coherency analysis of MT data shows no evidence of significant static shift effect, thus no correction was applied [12]. Apparent resistivity and phase of the impedance tensor determinant are presented in Fig. 2.

Dimensionality analysis

The dimensionality analysis of the MT data was carried out following two approaches:

- shape analysis of the impedance tensor while measuring axes are rotated counterclockwise from 0 to 90° [6];
- application of Bahr's method [1].

The results show that beneath the IOGU the earth may be considered as two-dimensional (2-D) for short periods (<1 s). The structure becomes more complex, three-dimensional (3-D), for the long periods (>1 s). This is illustrated by Bahr's skew (Fig. 3).

Induction vectors

For short periods, Parkinson induction vectors point towards good conductors [24]; calculated directions are in agreement with the NE-SW geologic trends. The two shear zones are clearly highlighted (Fig. 4a). On the contrary, for longer periods, all induction vectors systematically indicate South direction (at about 5 s, Fig. 4b), then East direction (≥ 500 s, Fig. 4c).

Strike direction determination

In the 2-D case, it is necessary to define a strike direction in order to avoid mixing between electric (TE) and magnetic (TM) polarizations. On the basis of the MT tensor analysis, it appears that this direction is mainly NE-SW. Moreover, tipper (vectors of induction) data show a direction close to 50°N in good agreement with the direction given by the geology. We fix the strike direction to 45°N . Then, MT tensors of all soundings are rotated along that direction, the TE mode being associated to the XY component (i.e. the telluric component is along 45°N direction).

Modeling

Short period (<1 s) MT modeling

TM mode resistivity and phase were used to build a 2-D model using a non-linear conjugate gradient algorithm [21]. The obtained results shed light on the crust 20 km upper layer (Fig. 5). The model clearly highlights the two shear zones (A and E anomalies, Fig. 5) delimiting the IOGU. These latter are characterized by high resistivity values (up to $50000 \Omega\cdot\text{m}$) (B and D anomalies, Fig. 5). The central part of the profile shows, in contrast, a more conductive crust ($\sim 500 \Omega\cdot\text{m}$; C anomaly, Fig. 5).

Long period ($T > 1$ s) MT modeling

The MT sounding set distribution does not allow a 3-D modeling. Therefore, only a 1-D approach is possible to give a rough estimate of the deep structure features [10]. Hence, the impedance tensor determinant was inverted using the Marquardt 1-D algorithm [22]. A model with a minimum number of layers whose response fits the observed data is then derived. The results show that IOGU is composed of a resistive layer ($\sim 50,000 \Omega\cdot\text{m}$) of 20 to 23 km thickness,

corresponding to the upper part of the lower crust (see above) underlain by a conductive lower crust (500 to $1000 \Omega\cdot\text{m}$). This crust overlies a more conductive (100 to $200 \Omega\cdot\text{m}$) upper mantle. The results obtained at ioz020, ioz030 and ioz075 stations suggest an electric Moho at 49 to 58 km depth.

Discussions and conclusion

MT Data, obtained along an east-west profile across IOGU, reveal an underlying deep 3-D structure. Its characteristics were roughly estimated by 1-D modeling. On the contrary, the shallow structure corresponding to the first 20 km of the crust is mainly 2-D. The data analysis gives the strike direction to 45°N , matching the trend of nearby structures.

Three electrical layers were identified: a resistive layer assimilated to the upper part of the deep crust, then a conductive layer corresponding to the deep part of the lower crust; the whole overlaying a more conductive layer which can be identified as the upper mantle (Figs. 5 and 6). Indeed, the upper part of the lower crust is 20 to 23 km thick and abnormally resistive (up to $50,000 \Omega\cdot\text{m}$). These values are mainly those of an old upper crust, whereas the values usually attributed to the lower crust range from some ohm meters to hundreds of ohm meters) [11,13,14,25]. These strong resistivities result from crustal cooling associated to the IOGU cratonization following the Eburnean event. The crustal cooling is also due to the upwelling induced by the upper crust erosion during the Panafrican. These resistive geologic formations correspond to compact and more homogenous Charnockitic Dome structure tendency (B and D anomalies, Fig. 5).

The central part of the IOGU shows a conductive structure (some hundreds of ohm meters), probably associated with less compact and more inhomogeneous rocks with Basin tendency (C anomaly, Fig. 5). The MT sounding distribution does not allow to resolve separately these very stretched and dilacerated structures near the surface. Nevertheless, even if these structures are too small to be resolved by MT, they induce an electric macroanisotropy that produces a 180° MT phase change [9,19,26]. This phase splitting bears a signature easily observed in the data. It is however not possible to conclude from the data if this conductive structure is either deep-rooted or limited to the first 20 km depth.

The shear zones are clearly seen within a thickness of 20 km, as they cause a significant fall of resistivity (A and E anomalies, Fig. 5). Deeper, the lower crust complexity hides the electric signature of these shear

zones. It is impossible to know if those continue downward. This lower crust is characterized by relatively high, although normal, resistivity (500 to 1000 $\Omega \cdot m$). These two layers represent a crust of 49 to 58 km thickness. They are underlain by more conductive upper mantle with typical resistivity values (100 to 200 $\Omega \cdot m$).

1. Introduction

L'unité granulitique de l'In Ouzzal (IOGU), ou Terrane d'In Ouzzal (IOT), est un bloc allongé dans la direction nord-sud, long de plus de 400 km et large de 80 km dans sa partie nord. Il s'amincit vers le sud jusqu'à disparaître complètement à la frontière algéro-malienne, où il est relayé par l'unité granulitique des Iforas [3,15,23]. Il représente un bloc archéen remobilisé durant un métamorphisme de très haute température, lié à l'orogène éburnéenne (2 Ga) [5]. Il est composé de deux unités :

- une unité infracrustale formée essentiellement d'enderbites et de charnockites ;
- une unité supracrustale composée de quartzites, souvent à magnétite, de marbres et de granulites Al-Mg associées à des lentilles basiques et ultrabasiques [23].

La lithologie de ces deux unités rappelle l'opposition classique entre dômes et bassins des terrains paléopro-térozoïques mais, dans le cas de l'IOGU, complètement transformés par le métamorphisme de très haute température et la déformation.

Les bordures de l'In Ouzzal, avec les branches des terranes panafricains qui l'entourent, sont définies par deux failles subverticales. Un décrochement dextre à l'est, est appelé « *East Ouzalian Shear Zone* », tandis qu'à l'ouest, il s'agit d'un décrochement plutôt senestre [23], que nous dénommerons « *West Ouzalian Shear Zone* ». Un problème majeur est de savoir jusqu'à quelle profondeur s'enracinent ces failles et s'il peut s'agir de traces d'anciennes sutures.

D'un point de vue géophysique, l'IOGU reste assez mal connue. Elle est caractérisée par une anomalie gravimétrique positive, d'une amplitude de 30 mgal, montrant des directions d'allongement nord-sud à NE-SW [4,17]. En flux de chaleur, une valeur de 24 mW/m² a été obtenue dans des trous de forage peu profonds situés à Tirek, à une centaine de kilomètres au sud de la zone d'étude [18].

Les données minéralogiques montrent clairement que, vu les conditions élevées de pression et de

température (7 à 10 kbar et 800 à 1000 °C) auxquelles ont été soumises les séries de l'In Ouzzal, les formations qui affleurent en surface sur ce bloc appartiennent à des parties profondes de la croûte, la croûte supérieure étant complètement érodée [23]. Cela met l'IOGU en situation privilégiée puisqu'il permet un accès direct à la croûte inférieure.

L'histoire géologique ainsi que la structure de ce bloc archéen devraient le doter d'une signature électrique particulière. En effet, la résistivité électrique est affectée par l'âge, la nature et la température des formations géologiques [8,16,25]. La magnéto-tellurique (MT), sensible aux changements de la résistivité électrique dans la croûte et le manteau supérieur [2,13], devrait, en principe, répondre à deux questions :

- la structure en dômes et bassins, même complètement transformée, de l'IOGU a-t-elle une signature électrique détectable ?
- la structure profonde de ce bloc archéen présente-t-elle une zonation ?

À cet effet, une première campagne MT a été réalisée en 2005 sur l'IOGU au sud de la région de Tekhamalt. Les résultats de l'analyse et de la modélisation des données de cette campagne sont présentés ci-après.

2. Les données MT

Réalisée en mars 2005, la campagne de mesure est basée sur neuf sondages large bande et trois sondages haute fréquence (AMT). Ces sondages sont disposés selon un profil est-ouest de 100 km de long, centré approximativement sur la partie sud de Tekhamalt et recoupant l'IOGU d'est en ouest au sud du parallèle 23°N (Fig. 1). Les données couvrent la gamme de périodes allant de 0,0001 à 3000 secondes pour les sites à large bande et de 0,0001 à une seconde pour les sites AMT.

3. Analyse des données MT

Durant la campagne de terrain, il n'y a pas eu de mesures complémentaires permettant de procéder à d'éventuelles corrections de *static shift* [12]. Cependant, une analyse basée sur la cohérence intrinsèque des données ne semble pas montrer d'effet très significatif de ce décalage statique sur la plupart des sondages. L'absence de corrections de courants statiques (*static shift*) aux données MT est donc acceptable. Les résistivités apparentes et les phases du

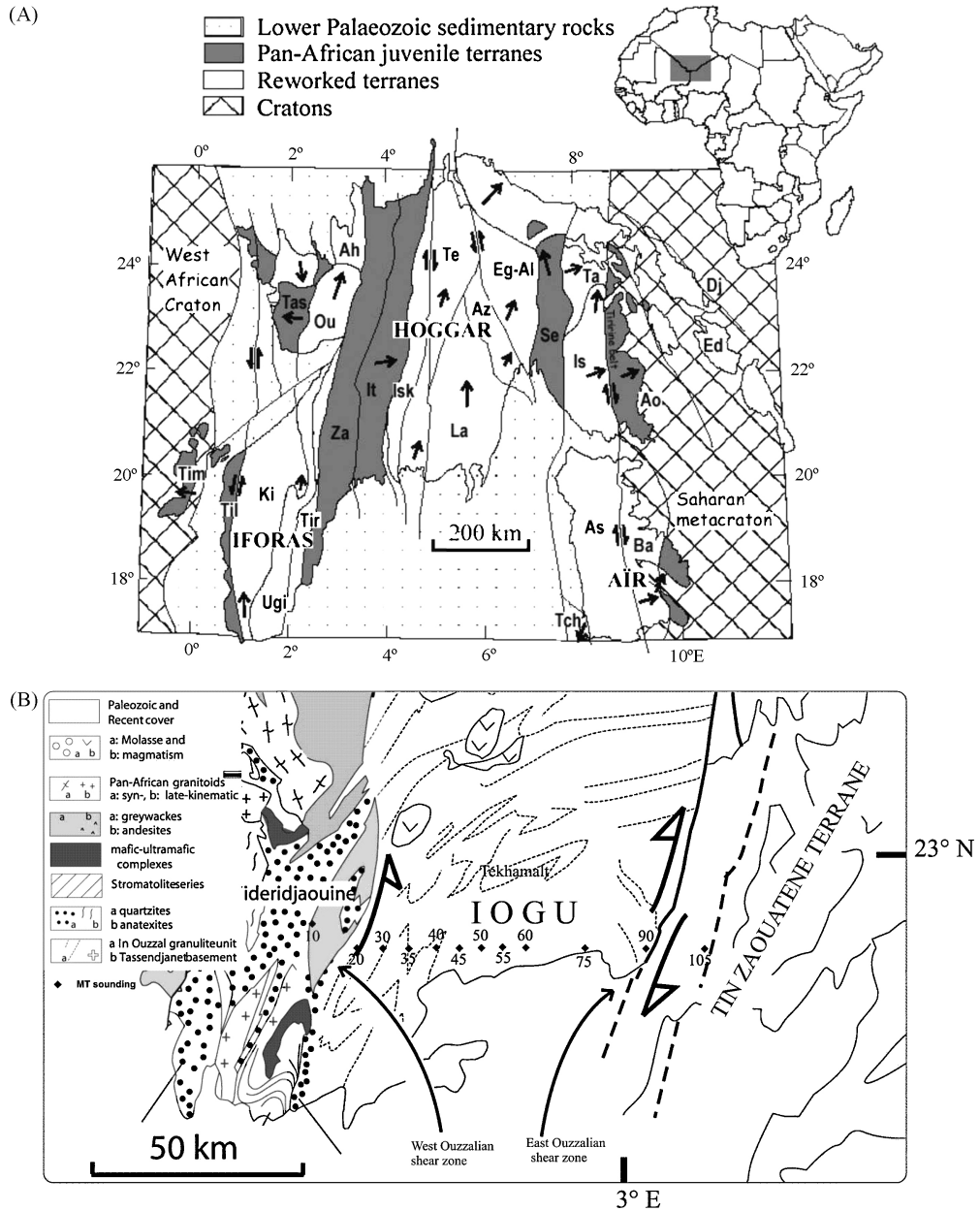


Fig. 1. (A) Carte de la mosaïque des terranes constituant le Hoggar (d’après Liégeois et al. [20], tirée de Black et al. [3]). (B) Carte géologique simplifiée de l’IOGU sur laquelle sont situés les sondages magnéto telluriques (adapté de Caby et Monié [5]).

Fig. 1. (A) Map of the Hoggar mosaic terranes (from Liégeois et al. [20], taken from Black et al. [3]). (B) Simplified geologic map of IOGU with the magnetotelluric soundings (adapted from Caby and Monié [5]).

déterminant du tenseur d’impédance sont présentées sur la Fig. 2.

3.1. Détermination de la dimensionnalité

En vue de déterminer la dimensionnalité de la structure crustale de l’IOGU, une analyse des éléments

du tenseur d’impédance a été effectuée selon deux approches :

- l’étude de la forme du tenseur d’impédance en faisant tourner les axes de mesures dans le sens antihoraire de 0 à 90° [6] ;
- l’étude formelle basée sur la méthode de Bahr [1,7].

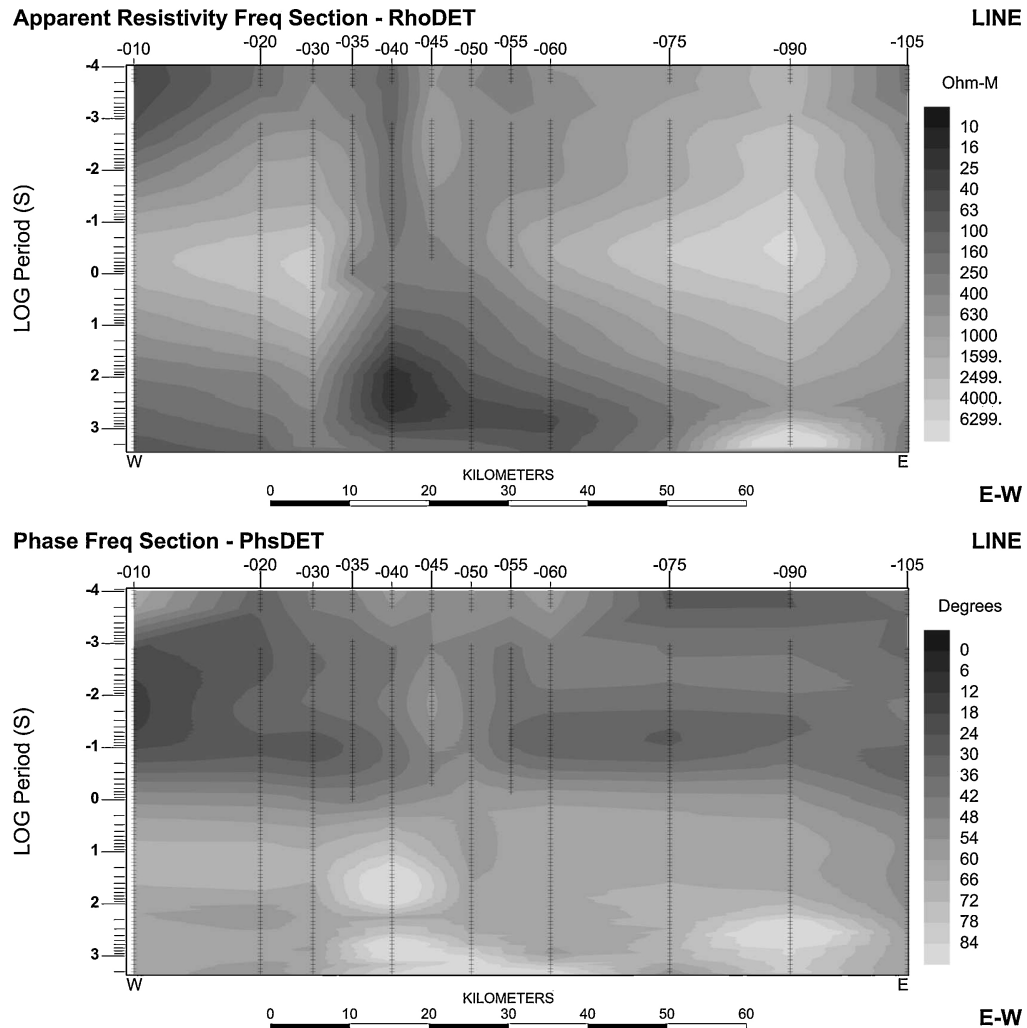


Fig. 2. Pseudo-sections de la résistivité apparente (en haut) et de la phase (en bas) du déterminant du tenseur d'impédance. Les données observées sont représentées par des croix. Les données de mauvaise qualité correspondant à la bande morte de l'AMT (0,0002–0,001 secondes) ont été supprimées.

Fig. 2. Apparent resistivity (top) and phase (bottom) pseudo-sections of the impedance tensor determinant. Data are represented by crosses. Bad quality data corresponding to the AMT dead band (0.0002–0.001 s) are removed.

Les résultats des deux types d'analyses montrent que, sous l'IOGU, la croûte possède une structure bidimensionnelle (2-D) aux courtes périodes ($T < 1$ seconde). Elle devient beaucoup plus complexe, tridimensionnelle (3-D), pour les moyennes et les longues périodes ($T > 1$ seconde). Ce comportement est bien illustré par le *Skew* de Bahr, définissant l'écart par rapport à une structure 2-D, dont les valeurs sont faibles pour les courtes périodes, correspondant à une croûte unidimensionnelle (1-D) ou 2-D, mais élevées (Fig. 3) aux longues périodes, traduisant l'existence d'une structure 3-D [1].

3.2. Vecteurs d'induction

La fonction de transfert magnétique reliant les composantes horizontales du champ magnétique à la composante verticale est représentative de la densité de courants circulant dans les corps 2-D ou 3-D de la croûte. Elle a été calculée pour l'ensemble des sondages. Sa composante réelle inversée, ou vecteur d'induction de Parkinson [24], pointe vers les bons conducteurs et donne pour l'IOGU des directions qui changent avec la période du signal MT. En effet, pour les courtes périodes, les vecteurs d'induction

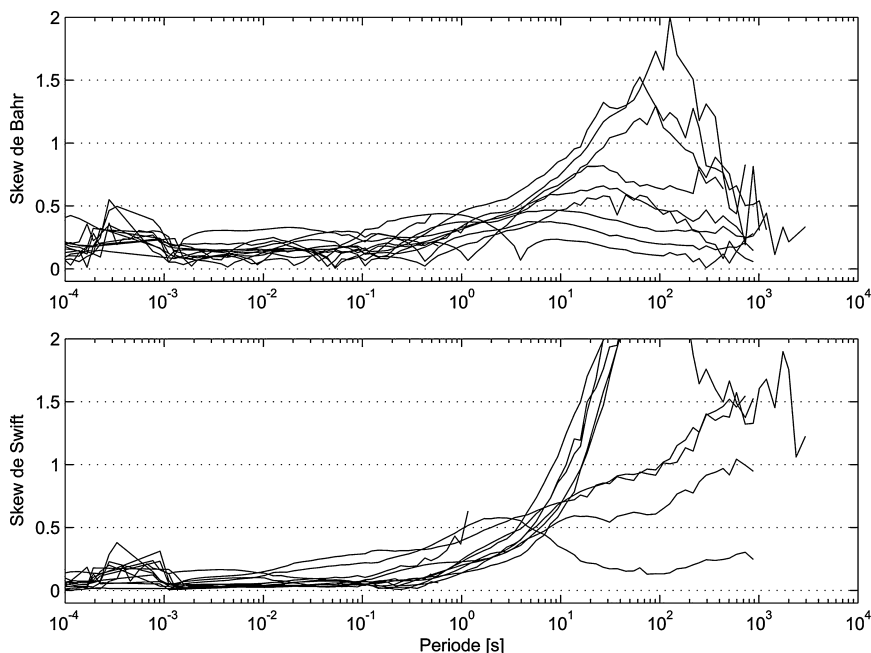


Fig. 3. *Skew de Bahr* (haut) et *Skew de Swift* (bas). Aux longues périodes, les deux *Skews* sont forts (supérieur à 0,3 pour celui de Bahr) traduisant une lithosphère complexe (3-D). En revanche, aux courtes périodes, les valeurs faibles indiquent une croûte supérieure 1-D ou 2-D.

Fig. 3. Bahr's skew (top) and Swift's skew (bottom). At long periods, the two skews become large (greater than 0.3 for Bahr's one) showing a complex (3-D) lithosphere. On the contrary, at short periods, small values display a 1-D to 2-D upper crust.

s'orientent vers les structures géologiques les plus importantes de l'IOGU. Les zones de cisaillement délimitant l'IOGU sont clairement mises en évidence par les vecteurs d'induction des sondages ioz10 et ioz20 pour la *shear zone* ouest-ouzzalienne (WOSZ) et ioz90 et ioz105 pour la *shear zone* est-ouzzalienne (EOSZ) (Fig. 4a). Par ailleurs, les vecteurs d'induction des autres sondages s'orientent vers le centre du profil. Dans l'ensemble et pour les courtes périodes, les vecteurs d'induction sont compatibles avec l'existence d'une direction géologique NE-SW. Aux plus longues périodes, les vecteurs d'induction de l'ensemble des sondages s'orientent remarquablement vers le sud d'abord (vers les cinq secondes, Fig. 4b), puis vers l'est (500 secondes et plus, Fig. 4c), indiquant un changement en profondeur des directions géologiques et traduisant une éventuelle trace de mouvement, au Panafricain. Cela est en accord avec les résultats obtenus à partir de l'analyse de la dimensionnalité du tenseur d'impédance.

3.3. Détermination de la direction structurale

La structure géologique étant 2-D pour les courtes périodes, il est utile de déterminer la direction

structurale, afin d'éviter un mélange entre les deux polarisations électrique (TE) et magnétique (TM). L'analyse du tenseur d'impédance montre une fluctuation de cette dernière autour de la direction NE-SW. Par ailleurs, le *tipper* (vecteurs d'inductions), calculé à partir des seules composantes magnétiques, donne une direction d'environ 50°N. Dans l'ensemble, les directions obtenues restent compatibles avec la géologie de surface qui montre des allongements NE-SW au niveau de Tekhamalt. Ainsi, la direction structurale adoptée pour les courtes périodes et pour tous les sondages est de 45°N. Les tenseurs d'impédance de l'ensemble des sondages ont été recalculés pour des axes de mesures tournés vers cette direction ; ainsi, le mode TE a été associé à la composante XY (le champ tellurique orienté le long de la direction 45°N) et le mode TM à la composante YX.

4. Modélisation

La modélisation numérique des données MT est effectuée en deux parties. Les données de courte période sont modélisées dans l'approximation 2-D. Cette approximation n'est plus valide pour les données de longues périodes, car elles correspondent à une terre 3-D

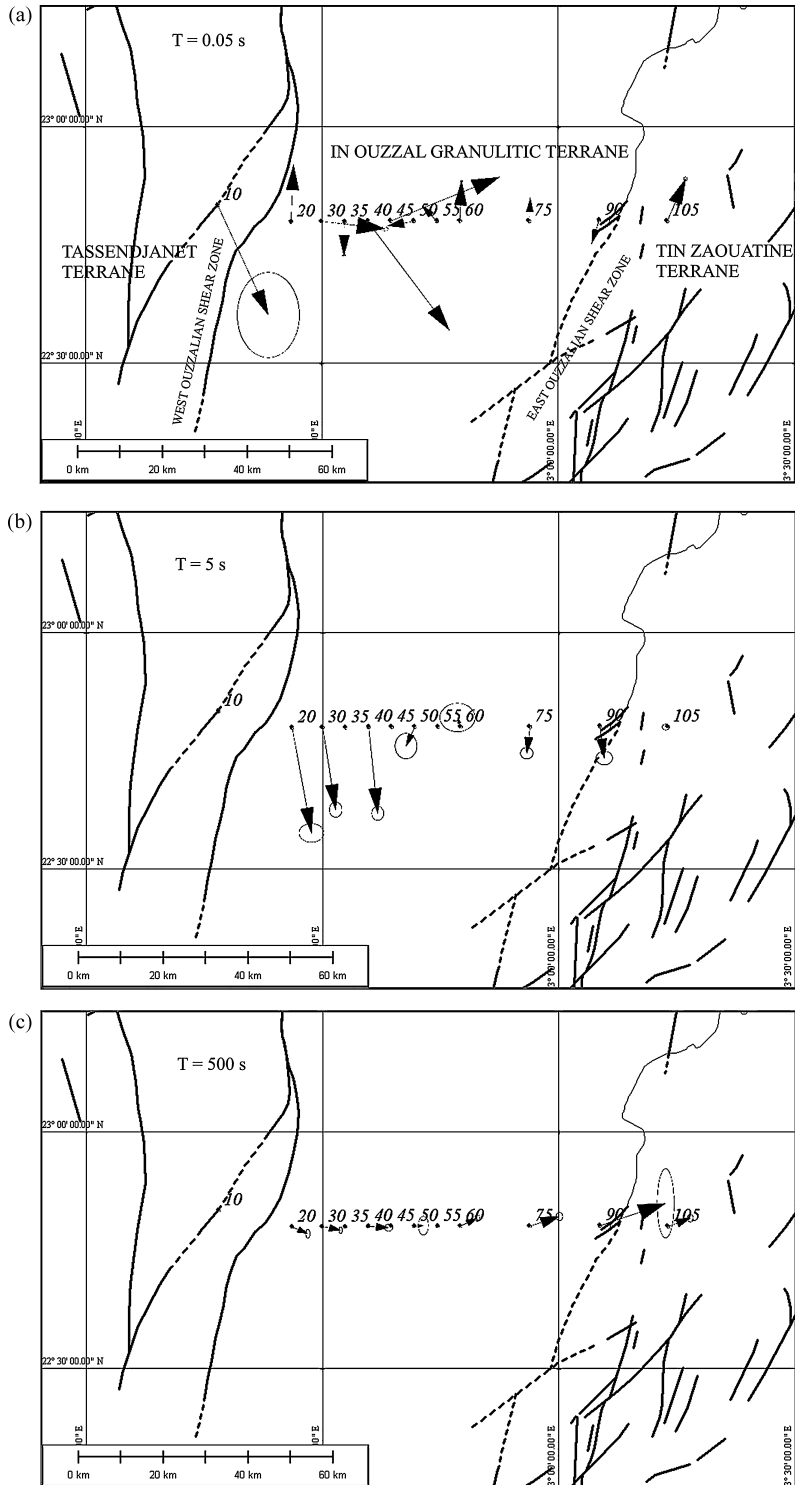


Fig. 4. Carte de la composante réelle inversée du vecteur d'induction de Parkinson [24], tracée pour les périodes de : (a) 0,05 secondes, (b) cinq secondes et (c) 500 secondes. Ces vecteurs d'induction s'orientent vers les corps électriquement conducteurs.

Fig. 4. Reversed real component of Parkinson induction vectors [24] map plotted for periods of (a) 0.05 s, (b) 5 s and (c) 500 s. These induction vectors point towards good electrical conductors.

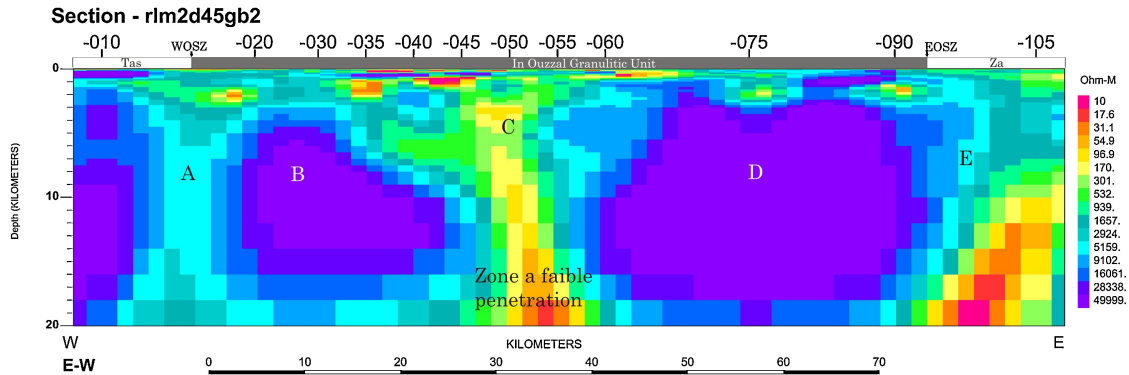


Fig. 5. Modèle 2-D obtenu par inversion sans a priori géologique des données de courte période par l'algorithme du gradient conjugué non linéaire de Mackie et al. [21]. Le modèle met clairement en évidence les deux shear zones à l'ouest (WOSZ) et à l'est (EOSZ) de l'IOGU correspondant, respectivement, aux anomalies A et E ; deux structures électriquement résistantes (B et D) entourent une structure conductrice (C).

Fig. 5. 2-D model obtained without geological constraint by inversion of short period data using the non-linear conjugate gradient algorithm of Mackie et al. [21]. The model highlights the two *shear zones* in west (WOSZ) and east (EOSZ) of IOGU corresponding to A and E anomalies, and two resistive structures (B and D) surrounding a conductive structure (C).

complexe. Nous les modélisons donc par une terre stratifiée (1-D).

4.1. Modélisation MT courtes périodes ($T < 1$ seconde)

Un modèle 2-D a été calculé par inversion des résistivités et phases de la composante TM (composante électrique dans la direction 135°N) pour les périodes courtes de tous les sondages, à l'aide de l'algorithme du gradient conjugué non linéaire [21]. La solution obtenue (Fig. 5) met en évidence la structure de la croûte sous l'IOGU sur une épaisseur d'une vingtaine de kilomètres (Fig. 5). En effet, le modèle 2-D montre clairement les deux *shear zones* limitant l'IOGU à l'est et à l'ouest (anomalies A et E, Fig. 5). Par ailleurs, l'IOGU est caractérisée par des valeurs élevées de la résistivité électrique en accord avec les formations charnockitiques massives (anomalies B et D, Fig. 5). Cependant, la partie centrale présente une croûte beaucoup plus conductrice qu'on aurait pu penser être associée aux formations supracrustales moins massives et plus hétérogènes (anomalie C, Fig. 5) ; mais la façon dont cette structure s'enfonce en profondeur, son enracinement qui va en s'évasant, contredit cette hypothèse ; cette structure correspond plus vraisemblablement à un grand accident, sans doute une faille, séparant deux compartiments différents de l'IOGU. Cette hypothèse doit être validée par une prochaine étude de terrain jointe à la télédétection, avec l'appui de la MT à une échelle plus globale, pour vérifier la direction et l'extension de cette structure dans l'IOGU et peut-être même au-delà de ce terrane.

4.2. Modélisation MT longues périodes ($T > 1$ seconde)

Aux longues périodes, les observations MT montrent clairement l'existence d'une structure profonde 3-D sous l'IOGU. Devant la difficulté de construire un modèle 3-D, vu la distribution en profil (linéaire) des sondages, on se limitera, ici, à effectuer une modélisation 1-D qui permet, toutefois, d'estimer les caractéristiques sommaires de cette structure [10]. À cet effet, le déterminant du tenseur d'impédance des sondages de longue période a été inversé sans a priori géologique, à l'aide de l'algorithme 1-D de Marquardt [22]. Pour chaque sondage, la solution obtenue est constituée d'un nombre minimum de couches dont la réponse s'ajuste aux données observées. Les modèles obtenus (Fig. 6) révèlent une couche très résistante (ayant une épaisseur de 20 à 23 km), couche qu'on a étudiée plus en détail ci-dessus. Celle-ci repose sur une croûte inférieure plus conductrice (500 à 1000 $\Omega\cdot\text{m}$), mais néanmoins légèrement plus résistante que celle observée en moyenne sous les cratons [8,13], elle-même reposant sur une couche encore plus conductrice (100 à 200 $\Omega\cdot\text{m}$), assimilable au manteau supérieur. L'existence d'une croûte inférieure relativement résistante permet de mieux résoudre la résistivité du manteau, ainsi que l'épaisseur de la croûte [13,14]. Les solutions obtenues pour les sondages ioz020, ioz30 et ioz75 suggèrent un Moho électrique situé à une profondeur de 49 à 58 km. Cette profondeur actuelle ne préjuge en rien de la profondeur du Moho à l'Éburnéen, c'est-à-dire à 2 Ga, époque à laquelle tout l'IOGU a été affecté par un métamorphisme de très haute température (au minimum

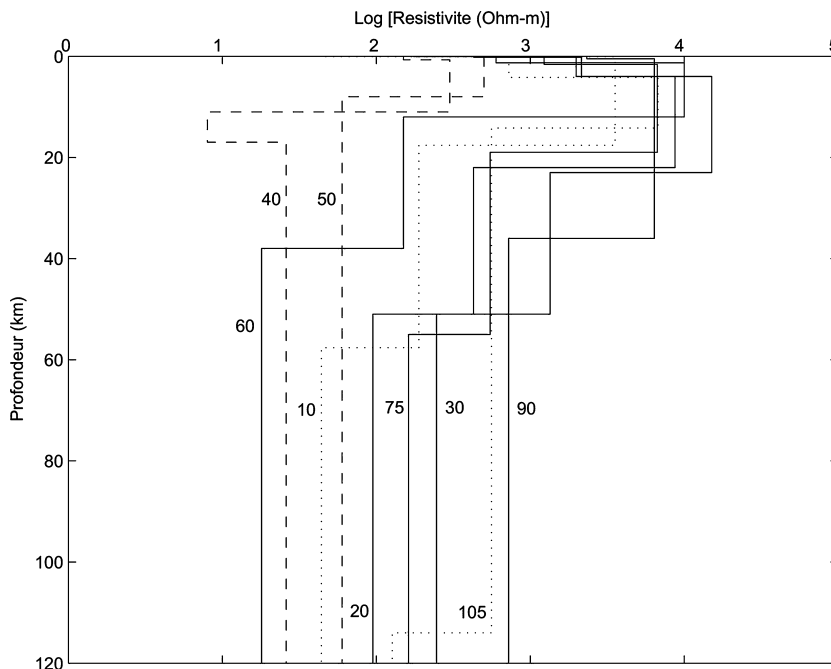


Fig. 6. Modèle 1-D correspondant à la croûte et au manteau supérieur obtenu par inversion du déterminant du tenseur d'impédance des sondages MT de longue période. En pointillés, les sondages ioz010 et ioz105 situés en dehors de l'IOGU, sur les branches de la chaîne panafricaine ; en traits discontinus, les sondages ioz040 et ioz050 situés sur une croûte supérieure très conductrice et, de ce fait, ne permettent pas de contraindre la structure profonde de l'IOGU ; en traits pleins, les sondages ayant une pénétration profonde.

Fig. 6. 1-D model of the crust and upper mantle obtained by inversion of the impedance tensor determinant. Dotted line, ioz010 and ioz105 located outside IOGU on the Pan-African belt; dashed line, ioz040 and ioz050 located on a very conductive crust that cannot constrain the IOGU deep structure; solid line, soundings with deep penetration.

1000 °C) impliquant des flux thermiques très élevés [23], provoqués soit par des intrusions profondes, à la limite croûte inférieure–manteau [23], soit par un redoublement de croûte.

5. Discussions et conclusion

L'objectif de cette première campagne MT était de mieux préciser la structure géoélectrique de l'IOGU. Les données MT révèlent une structure profonde 3-D dont les caractéristiques sommaires ont pu être estimées par une modélisation 1-D. En revanche, la structure superficielle correspondant aux premiers 20 km de la croûte est essentiellement 2-D. Pour cette dernière partie, les données du tenseur d'impédance, ainsi que celles du *tipper*, permettent de fixer la direction structurale à 45°N. Cette direction est en accord avec celle de l'allongement des structures géologiques observées en surface, résultant de la compression des éventuelles structures en dômes et bassins [23].

La modélisation des données MT a permis d'identifier trois couches dans la partie restante de l'IOGU : une première couche résistante qu'on peut assimiler à la partie superficielle de la croûte profonde, actuellement

exposée en surface, la croûte supérieure étant complètement érodée [23] ; une deuxième couche conductrice correspondant à la partie profonde de la croûte inférieure ; le tout repose sur une couche encore plus conductrice, électriquement identifiable au manteau (Fig. 5 et 6). En effet, la partie superficielle de la croûte inférieure a une épaisseur de 20 à 23 km, mais une résistivité électrique anormalement élevée (pouvant atteindre 50 000 $\Omega \cdot m$) dont les valeurs sont cependant parfaitement comparables à celles d'une croûte supérieure très ancienne, et ce, contrairement aux valeurs normales admises pour cette partie de la croûte profonde (quelques ohm mètres à quelques centaines d'ohm mètres), lorsque elle occupe sa position originelle sous la croûte supérieure [8,11,13,16,25]. Ces fortes valeurs de la résistivité peuvent s'expliquer par le changement des conditions thermodynamiques et, notamment, par le refroidissement résultant de la cratonisation de l'IOGU après l'événement éburnéen, il y a 2 Ga, et le soulèvement de la croûte par suite de l'érosion complète de la croûte supérieure à partir du Panafricain. En effet, la diminution de la température d'une roche produit une élévation notable de sa résistivité [16].

Ces formations résistantes correspondent probablement à une tendance en structures en dômes de roches charnockitiques compactes et contenant peu d'hétérogénéités (anomalies B et D, Fig. 5).

Cependant, la partie centrale de l'IIOGU située à proximité de Tekhamalt présente une structure conductrice (quelques centaines d'ohm mètres), qui pourrait être associée à des formations moins massives et plus hétérogènes à tendance plutôt bassin (anomalie C, Fig. 5). La distribution des sondages (distance entre sondages de l'ordre de 5 à 15 km) ne permet pas de mettre en évidence individuellement, près de la surface, ces structures qui sont en fait très étirées et dilacérées. Bien que ces structures soient de trop faibles dimensions pour être résolues par la MT, elles induisent néanmoins une macro-anisotropie qui peut provoquer un renversement de la phase du tenseur de 180° [9,19,26], observable sur les données.

Cependant, l'enracinement de cette structure dans les couches plus profondes permet d'envisager une autre hypothèse. Il pourrait s'agir, plutôt, d'un grand accident, faille sans doute, dont le tracé et la profondeur doivent faire, maintenant, l'objet d'études plus poussées, aussi bien sur le terrain, qu'en télédétection et en géophysique.

Par ailleurs, les zones accidentées limitant l'IIOGU à l'est et à l'ouest avec la chaîne panafricaine, sont clairement mises en évidence sur une épaisseur d'une vingtaine de kilomètres, car elles sont associées à une chute appréciable de la résistivité électrique (anomalies A et E, Fig. 5). Plus en profondeur, la complexité de la structure de la croûte inférieure dissimule la signature électrique de ces *shear zones* et il n'est pas possible d'affirmer si elles se poursuivent vers le bas.

Plus en profondeur, la croûte inférieure est caractérisée par une résistivité relativement peu élevée, mais néanmoins normale (500 à 1000 $\Omega \cdot m$). Ces deux couches, représentant une croûte zonée d'une épaisseur de 50 à 60 km réduite à sa partie inférieure, reposent sur un manteau supérieur dont la résistivité est typique (100 à 200 $\Omega \cdot m$) (Fig. 6).

Enfin, il est à noter qu'aux longues périodes, les vecteurs d'induction soulèvent des questions auxquelles on n'a pas pu répondre dans cette étude. En effet, ceux-ci révèlent l'existence de conducteurs à quelques dizaines de kilomètres au sud, puis à l'est du profil (Fig. 4b et c), ce qui incite à orienter les recherches futures dans ces directions.

Remerciements

Ce travail a été effectué dans le cadre du projet de coopération algéro-français TASSILI 05 MDU 653. La

mission de terrain a été accomplie avec le support de l'Office national du parc de l'Ahaggar (OPNA, Tamanrasset, Algérie). Nous remercions les experts anonymes pour leur lecture critique qui a permis une substantielle amélioration de ce manuscrit.

Références

- [1] K. Bahr, Geological noise in magnetotelluric data: a classification of distortion types, *Phys. Earth Planet. Inter.* 66 (1991) 24–38.
- [2] M.N. Berdichevsky, V.I. Dmitriev, Basic principles of interpretation of magnetotelluric curves, in: *Geoelectric and Geothermal studies*, A.A. Akadimimi Kiado (Ed.), 1976, pp. 165–221.
- [3] R. Black, L. Latouche, J.P. Liégeois, R. Caby, J.M. Bertrand, Pan-African displaced terranes in the Tuareg shield (central Sahara), *Geology* 22 (1994) 641–644.
- [4] R. Caby, A review of the In Ouzzal granulitic terrane, Tuareg shield, Algeria: its significance within the Pan-African Trans-Saharan Belt, *J. Metamorph. Geol.* 14 (1996) 659–666.
- [5] R. Caby, J. Monié, Neoproterozoic subductions and differential exhumation of western Hoggar (Southwest Algeria): new structural, petrological and geochronological evidence, *J. Afr. Earth Sci.* 37 (2003) 269–293.
- [6] R. Chakridi, M. Chouteau, M. Mareschal, A simple technique for analyzing and partly removing galvanic distortion from magnetotelluric impedance tensor: application to Abitibi and Kapuskasing data (Canada), *Geophys. J. Int.* 108 (1992) 917–929.
- [7] R.W. Groom, R.C. Bailey, Decomposition of magnetotelluric impedance tensor in the presence of local three-dimensional galvanic distortion, *J. Geophys. Res.* 94 (1989) 1913–1925.
- [8] V. Haak, R. Hutton, Electrical resistivity in continental lower crust, in: *The nature of the lower Continental Crust*, J.B. Dawson et al., (Eds.), Geological Society of London Special. Publication 24, 1986, pp. 35–49.
- [9] W. Heise, T.G. Caldwell, H.M. Bibby, C. Brown, Anisotropy and phase splits in magnetotellurics, *Phys. Earth Planet. Inter.* 158 (2006) 107–121.
- [10] M.R. Ingham, The use of invariant impedances in magnetotelluric interpretation, *Geophys. J.* 92 (1988) 165–169.
- [11] A.G. Jones, On a type classification of the lower crustal layers under Precambrian regions, *J. Geophys.* 49 (1981) 226–233.
- [12] A.G. Jones, Static shift of magnetotelluric data in sedimentary basin environment, *Geophysics* 53 (1988) 967–978.
- [13] A.G. Jones, Electrical conductivity of the continental lower crust, in: D.M. Fountain, R.J. Arculus, R.W. Kay (Eds.), *Continental lower crust*, Elsevier, Amsterdam, 1992, pp. 81–143, Chapter 3.
- [14] A.G. Jones, I.J. Ferguson, The electric Moho, *Nature* 409 (2001) 331–333.
- [15] J.R. Kienast, S. Fourcade, M. Guiraud, B.J. Hensen, K. Ouze-gane (Eds.), Special issue on the In Ouzzal Granulite Unit, Hoggar, Algeria, *J. Metamorph. Geol.* 14 (1996) 659–808.
- [16] M. Lastovickova, Laboratory measurements of electrical properties of rocks and minerals, *Geophys. Surv.* 6 (1983) 201–213.
- [17] A. Lesquer, A. Bourmatte, J.M. Dautria, Deep structure of the Hoggar domal uplift (Central Sahara, South Algeria) from gravity, thermal and petrological data, *Tectonophysics* 152 (1988) 71–87.

- [18] A. Lesquer, A. Bourmatte, S. Ly, J.M. Dautria, First heat flow determination from central Sahara: relationship with the Pan-African belt and Hoggar domal uplift, *J. Afr. Earth Sci.* 9 (1) (1989) 41–48.
- [19] P. Lezaeta, V. Haak, Beyond magnetotelluric decomposition: Induction, current channelling, and magnetotelluric phases over 90°, *J. Geophys. Res.* 108 (B6) (2003), EPM 4-1.
- [20] J.P. Liégeois, L. Latouche, M. Boughrara, J. Navez, M. Guiraud, The LATEA metacraton (Central Hoggar, Tuareg shield, Algeria): behaviour of an old passive margin during the Pan-African orogeny, *J. Afr. Earth Sci.* 37 (2003) 161–190.
- [21] R. Mackie, S. Rieven, W. Rodi, Users manual and software documentation for two-dimensional inversion of magnetotelluric data, MIT, Software implemented in GEOTOOLS, 1997, 13 1.
- [22] D.W. Marquardt, An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters, *J. SIAM Appl. Math* 11 (1963) 431–441.
- [23] K. Ouzegane, J.R. Kienast, A. Bendaoud, A. Drareni, A review of Archaean and Paleoproterozoic evolution of the In Ouzzal granulitic terrane (Western Hoggar, Algeria), *J. Afr. Earth Sci.* 37 (2003) 207–227.
- [24] W.D. Parkinson, The influence of continents and oceans on geomagnetic variations, *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 6 (1962) (1962) 441–449.
- [25] G. Schwartz, Electrical conductivity of the earth's crust and upper mantle, *Surv. Geophys.* 11 (1990) 133–161.
- [26] Ph.E. Wannamaker, Anisotropy versus heterogeneity in continental solid earth electromagnetic studies: fundamental response characteristics and implications for physicochemical state, *Surv. Geophys.* 26 (2005) 733–765.