

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الجيلالي بونعامة خميس مليانة

Université Djilali Bounaâma de Khemis Miliana

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département des Sciences de la Matière



## *Mémoire de fin d'étude*

*En vue de l'obtention d'un diplôme de Master en Physique « filière »*

*Spécialité: Physique du Globe« option »*

### *Thème :*

***Etude de la macro-anisotropie cristalline  
par simulation magnétotellurique***

**Devant le jury composé de :**

- Mr ABTOUT Abdesalam Présidente
- Mr Bouzid Abderrezak Encadreur
- Mr ABTOUT Abdesalam Examineur

**Présenté par :**

Melle Benchabane Hanane

Melle Khouli Abir

***Année universitaire : 2016 / 2017***

# Dédicace :

Je dédie ce modeste mémoire qui est le résultat de mon travail acharné durant mes études universitaires.

À ma chère mère qui est ma bougie dans l'obscurité pour son soutien, son amour et ses conseils. A mon cher père qui me donne le courage pour réussir, réaliser mes rêves et d'être toujours à la hauteur.

À ma chère sœur ' Fatima' qui ne cesse pas de me conseiller et guider vers le bon.

À mes chères frères ' Abd el Halim, Abd Allah et Abd el Ghani' qui apportent un plus à mon travail.

À toute ma famille pour leur soutien tout le long de mon parcours universitaire.

À mon fiancé 'Hamid' pour sa présence à mes côtés.

À mes chères amies 'Zahra, Fatima, Abir, khadra, Amina, Meriam, somia, samia, Fatiha, Djamila.

**Benchabane Hanane**

# Dédicace!

Mon travail c'est grain de mes efforts durant le parcours universitaire.

Je le dédie à ma chère mère qui est un sens d'inspiration pour sa tendresse, son amour et ses prières, à mon chère père qui 'est toujours, à mes côtés pour ses conseils et son amour.

À mes chères sœurs 'Noura, Fouzia, Salima et Kheira' qui me guident pour réaliser mon mémoire.

À mes chères frères 'Mohamed et Sid Ahmed' qui sont toujours près de moi.

À mes chères nièces Meriem, Aya et Rime. À mes chers neveux 'Djawed, Abd Allah et Zoubir.

À mon fiancé 'Mohamed' pour son soutien moral.

A mes chères amies Khadra, Hanane, Meriem, Sara, Amina, Fatima, Samia, Houria, Djamila et Fatiha

**Khouli Abir**

# REMERCIEMENTS

Nous nous devons de remercier Allah le tout puissant pour toute la volonte et le courage qu'Il nous a donnees.

Nous voudrions presenter nos remerciements a notre encadreur « Bouzid Abderrezak » et temoigner notre gratitude pour sa patience et son soutien qui nous a ete precieux afin de mener notre travail a bon port.

Nous tenons egalement a remercier l'equipe de CRAAG pour son accueil et son aide.

Nous voudrions remercier nos enseignants de Khemis Miliana de leur travail acharne durant cinq ans.

Et enfin nous remercions toutes les personnes qui nous aident de pres ou de loin ou meme avec un mot

## ملخص:

النمذجة الأكثر شيوعاً للبيانات المغناطيسية بواسطة النماذج الموحدة الخواص ثنائية الأبعاد أو ثلاثية الأبعاد في بعض الأحيان غير كافية. في الواقع هيكل الجغرافية الكهربائية من القشرة و الوشاح العلوي في بعض الأحيان متباين الخواص. في هذه الحالة النمذجة من خلال نماذج موحدة الخواص كاذبة في التفسير. العمل المقترح في إطار أطروحة الماجستير هو دراسة الردود المغناطيسية على الهياكل متباينة الخواص أحادية البعد أو ثنائية البعد (من حيث المقاومة الواضحة، مرحلة و اشعة التحريض).

يتم تنفيذ المحاكاة باستخدام خوارزمية من العناصر المحدودة (مانامكي و آخرون 1987). هذا العمل يساعد في نهاية المطاف إلى تحديد البيانات المغناطيسية في وجود هياكل القشرة الأرضية متباينة الخواص وتقييم الخطأ الذي أدى به نهج موحد الخواص.

**الكلمات المفتاحية:** المغناطيسية، القشرة، الغلاف الصخري، متباين الخواص، المحاكات العددية

## Résumé :

La modélisation plus courante des données magnétotelluriques par des modèles isotropes 2d ou même 3d est parfois insuffisante. En effet, la structure géoélectrique de la croûte et du manteau supérieur sont parfois anisotropes. Dans ce cas, leur modélisation par des modèles isotropes fausse l'interprétation. Le travail proposé dans le cadre de ce mémoire de master consiste à étudier les réponses magnétotelluriques (en terme de résistivité apparente, phase et tipper) de structures anisotropes de dimension 1d ou 2d. La simulation sera réalisée à l'aide de l'algorithme des éléments finis de Mannamaker et al. (1987). Ce travail permet in fine d'identifier dans les données magnétotelluriques la présence de structures crustales anisotropes et d'évaluer l'erreur d'interprétation faite par une approche isotrope.

**Mots clés :** Magnétotellurique, croûte, lithosphère, anisotropie, simulation numérique.

## Abstract:

The modeling of magnetotelluric are more commun by the model 2d or even 3d. Isotropic model is sometimes insufficient. Indeed, the geoelectric structure of the crust and the upper mantle, are anisotropic. In this cose, their modling by isotropic models distorts the interpretation the work proposed in this memory using to study the magnetotelluric responses (in the terme of apparent resistivity, phase and tipper) the anisotropic structures of dimension 1d or 2d. Lasimulation is relised using the element algorithme of Mannamaker and al (1987).This work can identify in the magnetotelluric data the presence of anisotropic crustals structures and to evaluate the error/ mistoke of interpretation mode by an isotropic approach.

**Keywords:** magnetotelluric, crust, lithosphère, anisotropic, numerical simulation.

# Table de matière

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre 1 : la magnétotellurique</b> .....	3
1.1 La méthode magnétotellurique.....	3
Application de la MT .....	3
1.3 Classification de méthodes électromagnétiques .....	3
1.3.1 Les paramètres mesurés .....	3
1.3.2 Les sources d'excitation .....	3
1.3.3 La bande fréquentielle utilisée.....	3
1.3.4 La distance émetteur –récepteur .....	4
1.3.5 Le domaine des mesures .....	4
1.4 Sources en magnétotellurique .....	4
1.5 La magnétosphère .....	4
1.6 Ionosphère.....	4
1.6.1 Les régions ionosphériques .....	4
1.7 Résistivité électrique des roches .....	5
1.8 La résistivité apparente : .....	5
1.9 Conductivité électrique des roches .....	5
1.10 Conductivité électrique de la croûte et du manteau supérieur .....	6
1.10.1 Conductivité croûte/manteau supérieur.....	6
1.10.2 Bassins sédimentaires .....	6
1.10.3 Croûte continentale.....	6
1.10.4 Manteau continental .....	6
1.11 Equation de Maxwell .....	6
1.12 Dimensionnalité : .....	7
<b>Chapitre 2 : Anisotropie électrique dans la croûte</b> .....	9
<b>Introduction</b> .....	9
2.1 Définition de l'isotrope : .....	9
2.2 Définition de l'anisotropie : .....	9
2.3 Propriétés anisotropie :.....	10
2.4 La formes du tenseur d'impédance MT.....	10

2.5 Tenseur d'impédance bidimensionnel .....	10
2.6 Le tenseur d'impédance tridimensionnel .....	11
2.7 Tenseur d'impédance anisotrope unidimensionnel .....	11
2.8 La différence entre l'anisotropie unidimensionnelle et la structure bidimensionnelle....	11
<b>Chapitre3 : algorithme modélisation 2d par éléments finis .....</b>	<b>13</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>13</b>
3.1 Les zones conductive crustales .....	13
3.2 Le contact vertical entre milieu l'isotrope et anisotrope.....	16
<b>Chapitre 4 : Les résultats.....</b>	<b>17</b>
4.1 Résultats liés au tenseur d'impédance .....	17
4.2 Résultats liés aux fonctions de transfert magnétique .....	17
4.3 Analyse de la modélisation d'une structure anisotropie .....	17
4.4 Comparaison entre modèle anisotrope et isotrope .....	32
4.4.1 Comparaison entre ICC et ACC-I .....	33
4.4.2 Comparaison entre ICC et ACC-II .....	34
4.4.3 Modèle avec milieu 1 anisotrope et milieu 2 isotrope .....	35
<b>Conclusion finale .....</b>	<b>38</b>
<b>Annexe .....</b>	<b>39</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>47</b>

## Liste des figures

Figure .1-1: L'ionosphère

- (a) Topologie des différentes couches ionosphériques et son évolution au cours de la journée.
- (b) Profil vertical typique de la concentration électronique.

Figure 2.1 : Quelques exemples de microstructures de composites.

Figure 2.2 : les modèles de l'effet de l'anisotropie.

Figure 3.1 : présente 3 modèle a, b et c qui se différent dans la première couche.

Figure. 3.2 : Modèles bidimensionnels du conducteur en croûte (modèle ICC, modèle ACC-I).

Figure 3.3 : Modèles bidimensionnels du conducteur en croûte (modèle ICC, modèle ACC-II).

Figure 3.4 : Le modèle consiste en un défaut (milieu 1 anisotrope et milieu 2 isotrope).

Figure 4.1 : Représente la résistivité apparente, la phase et les vecteur d'induction de modèle 1(a, b et c) pour 20 sites.

Figure 4.2 : Représente la résistivité apparente, la phase et les vecteurs d'induction de model ICC (isotropic crustal conductor) pour 11 sites.

Figure 4.3 : Représente la résistivité apparente, la phase et les vecteurs d'induction de modèle ACC-I (anisotropic crustal conductor) pour 11 sites.

Figure 4.4 : Représente la résistivité apparente, la phase et les vecteurs d'induction de modèle ACC-II (anisotropic crustal conductor) pour 11 sites.

Figure 4.5 : Représente la résistivité apparente, la phase et les vecteurs d'induction de modèle de milieu1 anisotrope et milieu 2 isotrope.

## Liste des symboles et Abréviations

MT : magnétotellurique

EM : électromagnétisme

HF : Haute fréquence

RMT : Radio- magnétotellurique

AMT : Audio-magnétotellurique

Z : le composant d'impédance

$\rho$  : La résistivité apparente

$\sigma$  : La conductivité électrique

$\delta$  : Skin depth

$E$  : Champ électrique

$H$  : Champ magnétique

$\theta$  : Le Strike géoélectrique

$\Phi$  : La phase

VLF: Very Low Frequency





## Introduction générale:

Au cours des dernières années, on a assisté à une croissance des rapports d'études magnétotelluriques (MT) où la structure électrique de la croûte et du manteau est interprétée en termes d'anisotropie. On va vérifier si la divergence entre les deux directions orthogonales sur le tenseur d'impédance c'est à dire la fractionnement des composantes xy et yx est due à l'anisotropie ou aux hétérogénéités 2D ou 3D n'est pas facile. L'absence d'un champ magnétique vertical peut révéler l'anisotropie (Kurtz et al. 1993; Kellett et al. 1992). Bahr et al. (2000) lorsque l'anisotropie est confinée à un modèle 1-D. On a proposé deux tests qui basent sur l'uniformité spatiale des données pour différencier les couches anisotropes des modèles isotropes 2-D. Si nous supposons des modèles plus généraux, il est encore difficile d'identifier l'anisotropie par exemple des structures anisotropes 2-D avec une direction arbitraire d'anisotropie. Même si l'anisotropie a été identifiée à partir des données ou autres informations complémentaires (géologie, puits, etc.). Il est difficile de trouver le modèle anisotrope, car il n'y a pas d'algorithmes d'inversion MT pour les données anisotropes. Dans certains cas, l'anisotropie des rapports électromagnétiques est élevée que les données de laboratoire, La macro-anisotropie à savoir on a une grande échelle d'anisotropie telle qu'une séquence de Strike conducteurs et résistance, la résolution de cette divergence entre les mesures d'anisotropie et les données de champ MT. Un exemple s'est produit dans le trou de forage KTB, où un coefficient d'anisotropie intrinsèque  $(\rho_{\max} / \rho_{\min})^{1/2}$  de seulement 1,34-2,84 a été mesuré (Rauen & Lastovickova 1995), tandis que les données magnétotelluriques nécessitaient un coefficient d'anisotropie d'un ordre de grandeur plus élevé (Eisel & Haak 1999). Dans cette région à la frontière occidentale du massif de Bohême, Dans la zone Erbsdorf-Vohenstrauß, il y a des preuves de l'environnement tectonique et des données sismiques pour le modèle macro-anisotrope, qui a été interprété comme du graphite et des zones de cisaillement remplies de fluide (Eisel & Haak 1999) il existe de nombreux exemples de rapports d'anisotropie élevés qui ont été interprétés comme macro-anisotropie, par exemple Cull (1985) et Kellett et al.(1992). Cependant, on a également signalé des rapports d'anisotropie élevés interprétés comme une anisotropie intrinsèque, par exemple Rasmussen(1988). Le concept de réseaux embarqués, Bahr (1997) propose une explication de l'écart entre une forte anisotropie à grande échelle et une petite anisotropie à l'échelle de laboratoire au moyen d'un fluide ou des systèmes de microfissures remplis de graphite qui se traduisent par une résistivité en masse dépendant de la direction. En l'absence de preuve d'anisotropie, et étant donné que des erreurs sont présentés dans les données. Les règles habituelles utilisées pour la dimensionnalité peuvent donner erronément une structure 2-D isotrope. Avec une direction de Strike qui dépend à la fois du réel 2-D isotrope (le Strike structurelle sans anisotropie) et la direction de l'anisotropie (Strike d'anisotropie).

Le travail présente dans le cadre de ce mémoire comprend quatre chapitres lesquels :

- Le premier chapitre contient des généralités sur la méthode de la magnétotellurique.
- le deuxième chapitre, nous travaillons sur les notions de base (hypothèses) en décrivant l'anisotropie électrique dans la croûte.
- Le troisième chapitre est consacré à l'algorithme de la modélisation 2d par éléments finis
- Le quatrième chapitre contient les analyses des résultats celles-ci :
  - la modélisation d'une structure anisotropie
  - Comparaison avec modèle isotropie

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale sur l'ensemble de ces résultats et les perspectives pour continuer ces développements dans le futur.

# Chapitre 1 :la magnétotellurique

## 1.1 La méthode magnétotellurique :

La méthode magnétotellurique (MT) est une technique géophysique qui fournit des informations sur la distribution des conductivités électriques des roches souterraines. La méthode magnétotellurique se base sur la physique de l'électromagnétisme développée au 19ème siècle :

- 19<sup>ème</sup> siècle: Gauss, Ampère, Faraday, ...
- Maxwell (~1865): unification des phénomènes électrique et magnétique

La fondation de la méthode (modèle 1d) a eu lieu durant les années 50 par le russe Tikhonov (1950) et le français Cagniard (1953).

Puis, la MT s'est développée ...

- Années 1960: premiers développements de l'instrumentation, introduction de la notion de tenseur d'impédance MT ou MT tensorielle (Cantwell, 1960): cas 2d
- Années 1970: inversion 1d, modélisation directe 2d, processing
- Années 1980: modélisation 2d et 3d, processing robust
- Années 1990: MT marine, ...
- Années 2000: MT 3-D, Radio-MT (RMT): HF

## 1.2 Application de la MT

- ❖ Études de la croûte et manteau supérieur (MT broadband et Long Period, profondeur jusqu'à ~300-400 km).
- ❖ Prédiction des séismes: recherche de précurseurs et de signaux ESS (étude des séries temporelles dans les bandes VLF/ELF/ULF).
- ❖ Exploration pétrolière et gazière (au sol et en off-shore).
- ❖ Géothermie.
- ❖ Exploration des diamants (pipe de kimberlites).
- ❖ Exploration minière.
- ❖ Recherche de l'eau.
- ❖ Environnement et Génie civil (RMT).

## 1.3 Classification de méthodes électromagnétiques :

Les méthodes de prospection électromagnétique sont amplement nombreuses et variées. Elles peuvent être classées selon

### 1.3.1 Les paramètres mesurés :

Mesure du champ magnétique résultant, composantes en phase ou en quadrature etc...

### 1.3.2 Les sources d'excitation :

Les sources artificielles ou contrôlées telles que stations radio, boucles de courant etc...

### La bande fréquentielle utilisée

- Les méthodes dites basses fréquences (régies par les équations de diffusion du Champ EM) permettent d'appréhender la conductivité des terrains.
- Les méthodes dites hautes fréquences (régies par les équations de propagation du Champ EM) permettent d'appréhender la permittivité (ex : Georadar).

### 1.3.4 La distance émettrice –récepteur

**1.3.4.1 Méthodes en champ lointain:** Ce sont des méthodes où la distance émetteur-récepteur est suffisamment plus grande que la longueur d'onde des ondes électromagnétiques dans le sol. Cela implique que les ondes EM primaires sont planes (front d'ondes parallèles entre eux). Les méthodes VLF, RMT, Audio MT font partie de cette catégorie de méthodes.

**1.3.4.2 Méthodes en champ proche:** Elles se caractérisent par une distance émettrice-récepteur habituellement de faible longueur d'onde de la source et par un champ primaire changeant très vite. (Ex : méthode Slingram).

### 1.3.5 Le domaine des mesures

On distingue les méthodes fréquentielles et les méthodes temporelles

**1.3.5.1 Les méthodes fréquentielles:** Les mesures se font en domaine fréquentiel et à une fréquence donnée.

**1.3.5.2 Les méthodes temporelles :** Elles consistent à utiliser en émission une impulsion du type Heaviside, step ou autre et à faire les mesures dans le domaine temporel.

## 1.4 Sources en magnétotellurique

En magnétotellurique, il y a deux sources :

- **Basses fréquences ( $f < 1\text{Hz}$ ) :** la magnétotellurique et l'ionosphère
- **Hautes fréquences ( $f > 1\text{Hz}$ ) :** activité électrique de l'atmosphère

## 1.5 La magnétosphère

- Source située dans la magnétosphère et l'ionosphère.
- L'ionosphère est constituée essentiellement de gaz d'oxygène (O<sub>2</sub>) et d'azote (N<sub>2</sub>) dont les densités diminuent avec l'altitude
- Ces gaz sont ionisés par les radiations UV du soleil.
- $Z < 100\text{ km}$ : la pression force les ions à se recombiner.
- $Z > 250\text{ km}$ : la pression devient trop faible → la densité des particules chargées diminue.

## 1.6 Ionosphère

L'ionosphère est la région de l'espace où la densité des particules ionisées est la plus élevée. Elle occupe une enveloppe sphérique qui s'étend de 60 km à environ 1000 km au-dessus de la surface de la Terre. Au-dessous de l'ionosphère, l'ionisation est négligeable. Au-dessus de l'ionosphère, c'est la magnétosphère où la densité des particules ionisées et neutres est très faible.

C'est à Appleton qui a obtenu le prix de Nobel en 1947 que l'on doit aujourd'hui la classification de l'ionosphère en différentes strates : les couches *D, E et F*, voir la figure 1.1.

### 1.6.1 Les régions ionosphériques

L'ionosphère est traditionnellement séparée en plusieurs couches ou strates selon l'altitude. La nomenclature de ces couches ou régions est due à Appleton (1947). Elle montre les deux couches principales *E et F* la nuit (côté gauche) qui se scinde en 4 couches *D, E, F1 et F2* sous l'action du rayonnement solaire (côté droit).

- La région D

Cette région est la partie la plus basse de l'ionosphère. Elle s'étend environ de 60 km à 90 km d'altitude, pression 2 Pa, température 197 K (-76°C).

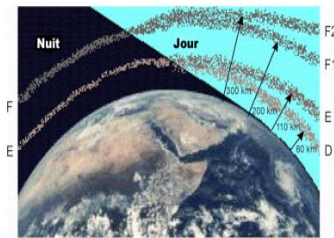
➤ La région E

La région E (ou la région Kennelly-Heaviside) se situe entre 90 km et 150 km, juste au-dessus de la région D, pression 0,01 Pa, température 223 K (-50°C), densité électronique  $10^{11}$  électrons par mètre cube. La couche E se développe peu de temps après le lever du soleil et disparaît quelques heures après le coucher.

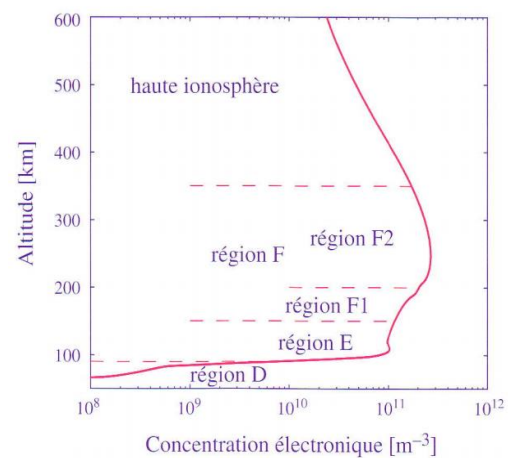
➤ La région F

Elle s'étend de 150 km à 600 km d'altitude. Dans cette région la densité des particules ionisées est la plus importante. Durant la journée, la région F se divise en deux régions, appelées F1 et F2, dont l'interface est située autour de 200 km.

- *Couche F* : altitude de 120 à 800 km, pression  $1 \times 10^{-4}$  Pa, température 1 000 °C ; la couche F se décompose pendant la journée en deux sous-couches F1 et F2.



(a)



(b)

Figure .1-1: L'ionosphère. (a) Topologie des différentes couches ionosphériques et son évolution au cours de la journée. (b) Profil vertical typique de la concentration électronique (Appelton 1947).

## 1.7 Résistivité électrique des roches

La résistivité électrique  $\rho$  des roches et des sédiments est une propriété intrinsèque, elle est définie comme étant la mesure de la difficulté qu'a un courant électrique à passer au travers d'un conducteur.

Par comparaison avec les autres paramètres physiques (densité, vitesses des ondes sismiques etc...), à l'exception du paramètre viscosité, la résistivité électrique est pratiquement le paramètre qui varie sur plusieurs ordres de grandeurs d'où l'avantage d'utiliser sa distribution pour définir les structures du sous-sol. Ses variations s'étendent entre  $10^{-5} \text{ ohm.m}$  pour des minéraux métalliques à  $10^7 \text{ ohm.m}$  pour le gabbro et de  $10$  à  $10^3 \text{ ohm.m}$  pour les dépôts sédimentaires non consolidés (à température ambiante).

**1.8 La résistivité apparente :** est le rapport entre le potentiel que l'on obtient sur le terrain avec un dispositif donné et une intensité de courant donnée et celui que l'on obtiendrait avec le même dispositif et le même courant si l'on était sur un sous-sol homogène et isotrope de résistivité  $1 \text{ ohm.m}$

## 1.9 Conductivité électrique des roches

L'inverse de la résistivité est la conductivité électrique  $\sigma$  ( $\sigma = \frac{1}{\rho}$ ) mesurée Siemens/m. La conductivité décrit l'aptitude d'une substance à conduire un courant électrique, c'est-à-dire à laisser passer les charges électriques se déplacer librement sous l'effet d'un champ électrique  $E [v/m]$ . Sous l'action de ce dernier, le déplacement des charges électriques libres sur des distances macroscopiques d'un conducteur est défini par la conductivité  $\delta [s/m]$  (inverse à la résistivité  $\rho$ ).

Ce déplacement des charges libres se définit par la densité de courant électrique  $\vec{j}_C$ .

## 1.10 Conductivité électrique de la croûte et du manteau supérieur

### 1.10.1 Conductivité croûte/manteau supérieur

- Partie superficielle: accessible par plusieurs méthodes géophysiques (de résistivité) + forage (diagraphie)
- Partie profonde: exclusivement MT + rares forages expérimentaux (par ex. allemand KTB) + mesures en laboratoire (sur les xénolites).

### 1.10.2 Bassins sédimentaires

Dans les bassins sédimentaires:

- La conductivité électrique est contrôlée par la porosité (vide crée par les pores et fissures) et les fluides et/minéraux contenus dans les pores (loi d'Archie).
- La porosité égale à quelques %, diminue exponentiellement avec la profondeur (diagenèse ou effet de compaction et cimentation) pour atteindre moins de 1% à environ 6 km.
- La diagenèse est relayée par le métamorphisme: augmentation de la température (gradient géothermique) et la pression lithostatique induisent une recristallisation et le développement des grains des minéraux (quartz). Ceci contribue à la diminution de la conductivité.

### 1.10.3 Croûte continentale

Dans la croûte continentale:

- La loi d'Archie constitue une approche de 1er ordre pour décrire la conductivité dans la croûte. Dans des forages expérimentaux profonds, des fractures imbibées d'eau salée ont été observées à des profondeurs de 11 km (!).
- Ainsi, la croûte supérieure est très résistante particulièrement sous les cratons où elle atteint  $> 10\ 000\ \Omega \cdot m$ , voire  $> 100\ 000\ \Omega \cdot m$ .
- La croûte moyenne est très conductrice ( $\sim 10\ \Omega \cdot m$ ).
- La croûte inférieure est modérément conductrice (quelques  $100\ \Omega \cdot m$ ).
- Le Moho *électrique* est détectable que dans certaines régions (fenêtres)

### 1.10.4 Manteau continental

- Le manteau lithosphérique (100 à 250 km d'épaisseur) a une résistivité modérée de quelques centaines d' $\Omega \cdot m$ .
- Le manteau asthénosphérique est conducteur (de l'ordre de  $10\ \Omega \cdot m$ ).

## 1.11 Equation de Maxwell

On rappelle les 4 équations de Maxwell en domaine spectral. Dans le cas général et en absence de source électromagnétique

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{c} \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (1.4)$$

Où  $\vec{H}$  et  $\vec{B}$  sont les vecteurs de champ magnétique et d'induction magnétique ;  $\vec{E}$  et  $\vec{D}$  sont les vecteurs du champ électrique et déplacement électrique ;  $q$  est la densité de charge électrique.  $\vec{j}$  Est la densité électrique de courant de conduction et  $\vec{c}$  est la densité totale de courant. Les champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont liés par des relations dites 'constatives'

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (1.6)$$

Où  $\mu$  et  $\varepsilon$  sont les constantes de permittivité diélectrique et de perméabilité magnétique.

Les fonctions de transfert magnétotelluriques lient entre les fluctuations mesurées simultanément des champs électriques et magnétiques horizontales à certaines fréquences. De la relation entre les composantes électriques et magnétiques dans le domaine fréquentiel, nous pouvons définir le tenseur d'impédance complexe, (Eq.1-7):

$$\begin{pmatrix} E_i(\omega) \\ E_j(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{ii}(\omega) & z_{ij}(\omega) \\ z_{ji}(\omega) & z_{jj}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_i(\omega) \\ H_j(\omega) \end{pmatrix} \quad (1-7)$$

Où  $i$  et  $j$  sont deux directions perpendiculaires et  $\omega$  est la pulsation.

Les éléments d'impédance peuvent être adaptés pour obtenir la résistivité apparente,  $\rho_a$  (Eq.1-8) et la phase,  $\varphi$  (Eq. 1.9)

$$\rho_{a,ij}(\omega) = \frac{1}{\omega \mu} |z_{ij}(\omega)|^2 \quad (1.8)$$

$$\varphi_{ij}(\omega) = \tan^{-1} \left( \frac{z_{ij}^I(\omega)}{z_{ij}^R(\omega)} \right) \quad (1.9)$$

Les exposants R et I note la partie imaginaire et réelle de l'élément d'impédance, respectivement.

## Profondeur d'investigation: skin depth

La profondeur d'investigation peut être estimée en utilisant le paramètre skin depth ( $\delta$ ). Ce paramètre est définie comme « la fréquence dépend de la profondeur » où l'amplitude du champ électromagnétique à la surface de la Terre est atténuée par un facteur de  $e$  dans un milieu homogène.

$$\delta = 503 \sqrt{\rho T} \quad (1.10)$$

### 1.12 Dimensionnalité :

#### ❖ Cas 1D :

Dans le cas d'un milieu 1D, les composantes  $Z_{xx}$  et  $Z_{yy}$  du tenseur magnétotellurique sont nulles et  $Z_{xy} = -Z_{yx}$ .

$$\begin{pmatrix} E_x(\omega) \\ E_y(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & z \\ -z & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x(\omega) \\ H_y(\omega) \end{pmatrix}. \quad (1.11)$$

#### ❖ Cas 2D :

Dans le cas bidimensionnel (2D) et si les axes choisis sur le terrain coïncident avec les directions des structures  $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$ .



$$\begin{pmatrix} E_x(\omega) \\ E_y(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & z_{xy} \\ z_{yx} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x(\omega) \\ H_y(\omega) \end{pmatrix} \quad (1.12)$$

### ❖ Cas 3D

Dans le cas le plusgénéral, un milieu tridimensionnel (3D), toutes les composantes de  $Z$  sont non nulles.

$$\begin{pmatrix} E_x(\omega) \\ E_y(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{xx} & z_{xy} \\ z_{yx} & z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x(\omega) \\ H_y(\omega) \end{pmatrix}. \quad (1.13)$$

# Chapitre 2 : Anisotropie électrique dans la croûte

## Introduction

L'anisotropie et l'isotropie sont des propriétés des corps macroscopiques. Un système est isotrope si aucune de ses propriétés ne possède de dépendance directionnelle et sont toujours représentées par des tenseurs spécifiques conductivités, constante diélectrique, module d'élasticité.

Il est suffisant qu'une seule propriété soit directionnelle pour que le corps cesse d'être isotrope. L'espace est en générale considéré comme isotrope

### 2.1 Définition de l'isotrope :

Un milieu est dit isotrope si ses propriétés physiques sont identiques dans toutes les directions. Un système sera qualifié d'isotrope si ses propriétés (macroscopiques) sont invariantes par rapport à une direction particulière et donc, si aucune d'entre elles ne possède de dépendance directionnelle.

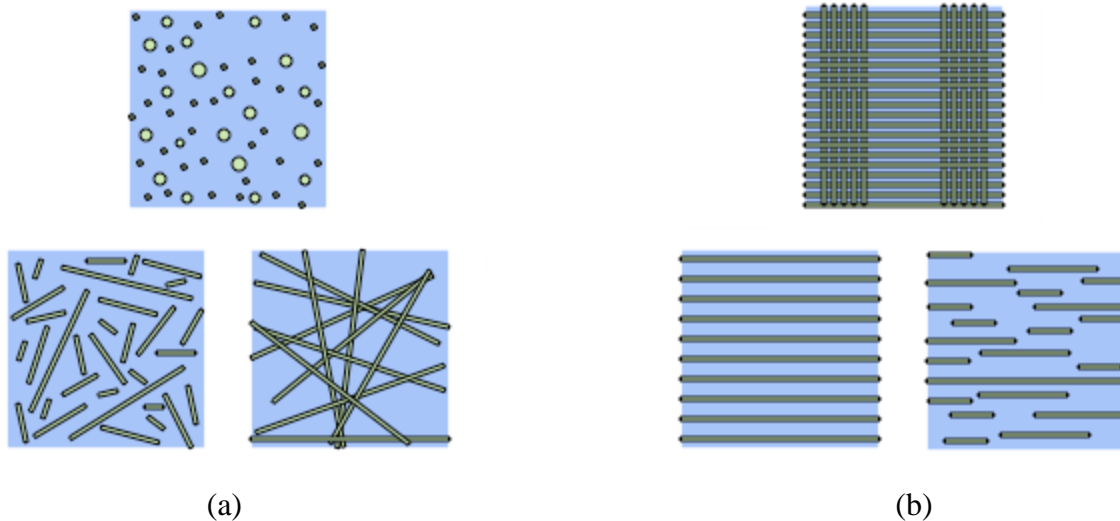


Figure 2.1 : Quelques exemples de microstructures de composites : (a) ayant un comportement isotrope ou quasi- isotrope, (b) ayant un comportement fortement anisotrope

### 2.2 Définition de l'anisotropie :

L'anisotropie (contraire d'isotropie) est la propriété d'être dépendant de la direction. Quelque chose d'anisotrope pourra présenter différentes caractéristiques selon son orientation.

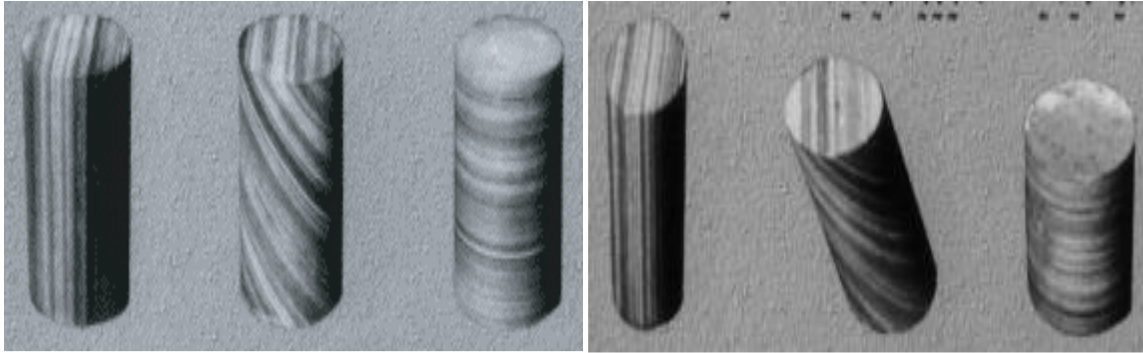


Figure 2.2 Sur cette transformation (non élastique !), la nature l'effet de l'anisotropie sont bien visibles: à gauche la roche native est visiblement feuilletée ; à droite, après une traction ou compression uni axiale, la déformée prend une allure surprenante selon l'orientation des feuillets (Marc François).

### 2.3 Propriétés anisotropie :

En physique, l'étude des phénomènes naturels conduit partout à étudier des propriétés physiques anisotropes. En physique des matériaux notamment, on étudie en particulier l'anisotropie :

Propriétés de conduction électrique : Le graphite, par exemple, est beaucoup plus conducteur dans le plan des feuillets que dans la direction perpendiculaire ;

L'anisotropie n'est pas pour autant l'apanage de la physique des matériaux.

### 2.4 La formes du tenseur d'impédance MT

Le tenseur d'impédance MT relie le composant horizontal orthogonal des champs électrique et magnétique à travers un tenseur complexe  $2 \times 2$

A savoir

$$E = Z.H \quad (1)$$

(Dépendance de la fréquence supposée). Le tenseur d'impédance prend trois formes bien connues en fonction de la dimensionnalité du sous-sol

### 2.5 Tenseur d'impédance bidimensionnel

En 2-D, c'est-à-dire avec une résistivité constante le long d'un axe (habituellement x) dans le sens de Strike géoélectrique des structure 2-D, le tenseur devient

$$Z_{2-D} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} \dots \quad (3)$$

Quatre paramètres (deux impédances complexes) par fréquence. Le system de coordonnées observé n'est souvent pas aligné sur Strike, donc un cinquième indépendant de la fréquence, à savoir l'obliquité entre le système de référence d'observation et le Strike géoélectrique  $\theta$ .

Doit être définie, là où

$$Z_{2-D}(\theta) = R.Z_{2-D}(0).R^T = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy}(0) \\ Z_{yx}(0) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \sin(\theta) \cos(\theta) [Z_{yx}(0) + Z_{xy}(0)] & \cos^2(\theta)Z_{xy}(0) - \sin^2(\theta)Z_{yx}(0) \\ \cos^2(\theta)Z_{yx}(0) - \sin^2(\theta)Z_{xy}(0) & -\cos(\theta) \sin(\theta) [Z_{yx}(0) + Z_{xy}(0)] \end{bmatrix} \dots(4)$$

Notons que  $Z_{yy}(\theta) = -Z_{xx}(\theta)$

$$Z_{2-D}(\theta) = \begin{bmatrix} Z_{xx}(\theta) & Z_{xy}(0) \\ Z_{yx}(0) & -Z_{xx}(\theta) \end{bmatrix} \dots (5)$$

## 2.6 Le tenseur d'impédance tridimensionnel :

En 3-D le tenseur d'impédance est

$$Z_{3-D}(\theta) = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \dots (6)$$

Et il y a huit paramètres (quatre impédance complexes) par fréquence.

## 2.7 Tenseur d'impédance anisotrope unidimensionnel :

Bien moins connu et apprécié, même au sein de la communauté MT, est une quatrième forme du tenseur d'impédance et c'est celle que tenseur prend sur un terre anisotrope 1-D générale dans laquelle il existe de multiples couches anisotropes avec des directions d'anisotropie différentes.

Cette formule est donné par :

$$Z_{1-Da} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & -Z_{xx} \end{bmatrix} \dots (7)$$

Et comprend six paramètres (trois impédances complexes) par fréquence, ou les termes diagonaux sont égaux mais de signe opposé.

Dans la forme général de  $Z_{1-Da}$  (équation 7), de six paramètres ne doit pas être confondu avec la forme tournée de  $Z_{2-D}$  (équation 3) donnée par  $Z_{2-D}$  (équation 5), de cinq paramètres, même si les deux apparaissent semblables. Il est toujours possible, dans le cas 2-D, de trouver un angle de rotation réel  $\theta$  qui tourné  $Z_{2-D}(\theta)$  de sorte tell qu'il puisse être anti-diagonalisé. Ceci n'est pas possible dans le cas général des milieux anisotropes en couches.

## 2.8 La différence entre l'anisotropie unidimensionnelle et la structure bidimensionnelle :

Étant donné que les formes de l'anisotropie 1-D et les tenseurs d'impédance 2-D sont similaires, comment se différencier entre les deux et reconnaître L'existence de l'anisotropie 1-D sur la structure 2-D?

Il existe essentiellement trois façons:

1. La fonction de transfert du champ magnétique vertical est nulle sur une Terre anisotrope 1-D, mais elle est non nulle sur une Terre 2-D.

2. Les fonctions de transfert de champ magnétique horizontal sont anisotrope 1-D mais sont complexes et différents de celui de l'unité sur une Terre 2-D.
3. Il existe une différence de phase constante sur une grande région pour une Terre anisotrope 1-D, alors qu'une Terre 2-D à des maxima en différence de phase aux discontinuités latérales enconductivité.

# Chapitre3 : algorithme modélisation 2d par éléments finis

## Introduction:

Dans ce chapitre on utilise logicielle Geotools pour dessiner les modèles de l'anisotropie électrique dans la croûte.

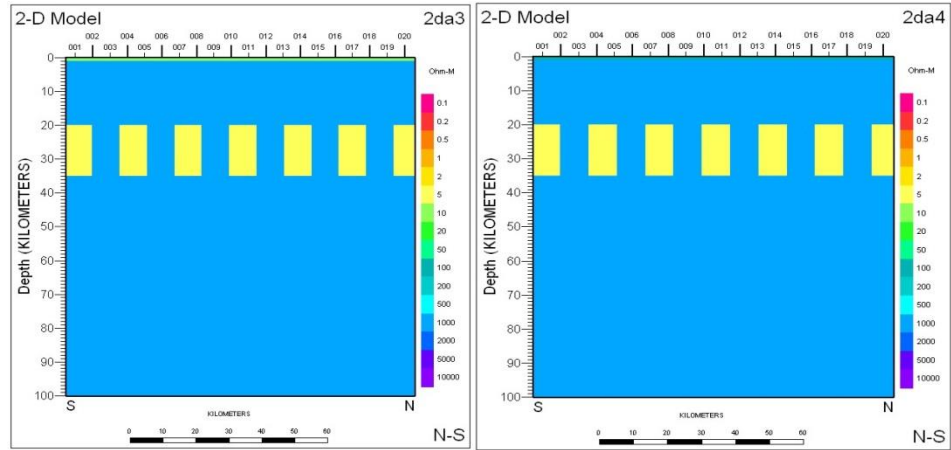
Une sophistication croissante dans l'application de Magnetotellurics (MT) a contribué à en faire un outil précieux pour de nombreux types d'exploration. Geotools tente de combiner les fonctionnalités d'interprétation MT les plus utiles et souhaitées en un système logiciel intégré.

Le système est un produit de troisième génération et l'aboutissement de nombreuses années d'expérience combinée en MT. Il a été conçu avec un certain nombre d'objectifs à l'esprit:

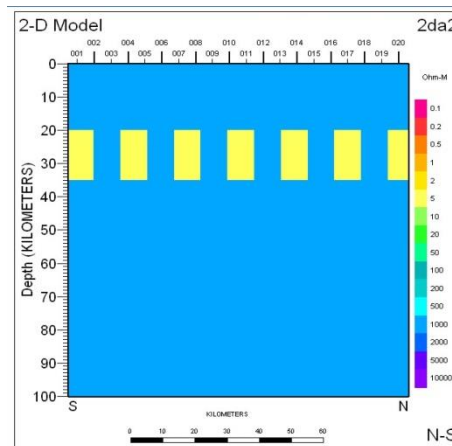
- Fournir une approche globale de l'analyse MT permettant à l'interprète d'intégrer la modélisation, l'acquisition et le traitement de données, la modélisation et la présentation.
- Présenter une plate-forme de recherche qui s'occupe de nombreux détails fastidieux de la gestion et de l'affichage des données, ce qui permettent aux chercheurs de se concentrer sur des problèmes plus importants.
- Soutenir de nombreuses philosophies différentes de l'interprétation MT en incluant un ensemble d'outils général et flexible.
- Mettre en œuvre efficacement les outils afin qu'un géophysicien puisse rapidement déterminer le caractère des données pour effectuer une interprétation préliminaire rapide et précise.
- Fournir des outils suffisamment puissants pour extraire autant d'informations que possible des données avec traitement, modélisation et présentation détaillés.

### 3.1 Les zones conductive crustales :

- 1<sup>ère</sup> model qui englobe (le model a, b et c)et contient 20 site représente la couche anisotrope recouverte de deux couches: la seule différence entre les model a, b et c est dans la première couche dans le model a (10 *Ohm.m* ), dans le model b (1000*hm.m* ) et dans le dernier c (10000*hm.m* ).



(a) (b)



(c)

Figure 3.1 : présente 3 modèles a, b et c qui diffèrent dans la première couche.

- La figure (3.2) présente les modèles en couches ICC (isotropic crustal conductor) et ACC-I (anisotropic crustal conductor). Ils simulent les sédiments conducteurs et les résidus résistants lithosphère sous la couche conductrice. Dans la croûte terrestre, à une profondeur de 20 à 35km, le modèle ICC contient le conducteur isotrope sous la forme du 2-D prisme homogène d'une résistivité de  $100 \text{ Ohm.m}$  et largeur de 44 km. Dans le modèle ACC-I nous avons le même prisme composée de dykes verticales alternées de résistivité de 5 et  $1000 \text{ Ohm.m}$ . Le prisme peut être considéré comme une couche anisotrope (macro anisotrope) avec le tenseur de diagonale

$$\rho_{ACC-I} = \begin{bmatrix} \rho_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{zz} \end{bmatrix}.$$

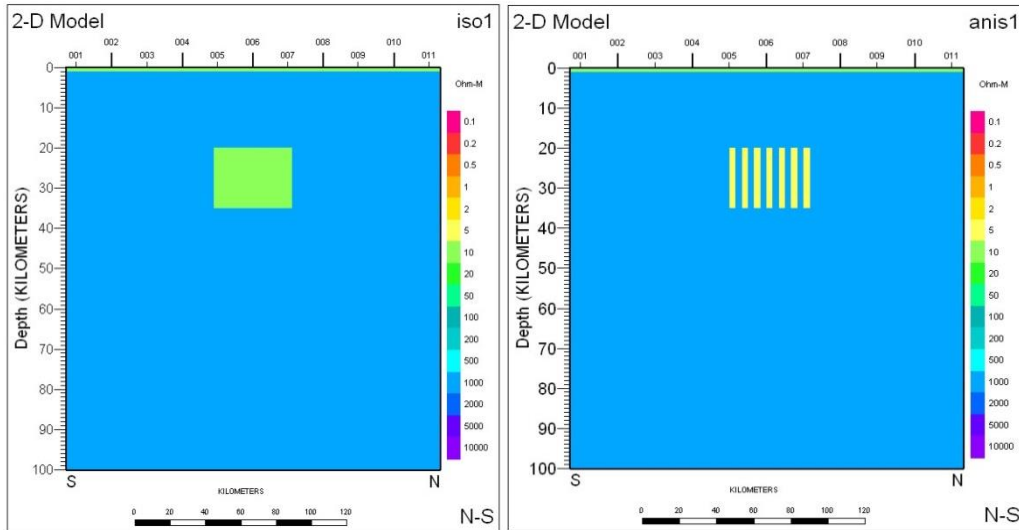


Figure. (3.2). Modèles bidimensionnels du conducteur en croûte. Le modèle ICC contient un isotrope Conducteur de croûte, modèle ACC-I contient un conducteur de croûte anisotrope avec alternance Couches verticales de résistivité supérieure et inférieure.

- Une équivalence similaire est observée à la fig.3.3 Nous avons ici le même modèle ICC avec le conducteur croisé isotrope sous forme de prisme 2-D de résistivité de 10 Ohm.m et la modèle ACC-II avec le prisme composé d'alterne a ce couches horizontales de résistivité de 5 et 1000 Ohm.m. Le prisme peut être considéré comme un conducteur anisotrope (macro anisotrope) avec le tenseur de résistivité diagonale

$$\rho_{ACC-II} = \begin{bmatrix} \rho_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{zz} \end{bmatrix}.$$

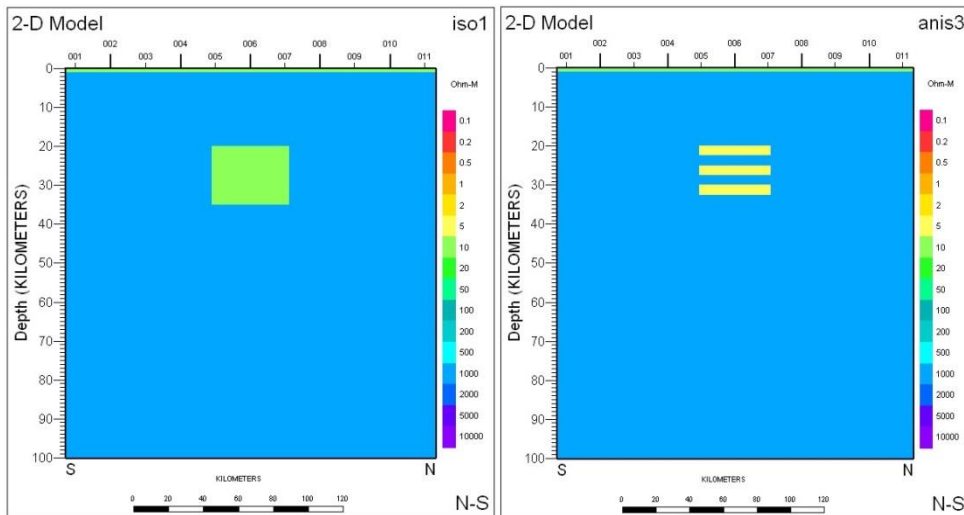


Figure (3.3). Modèles bidimensionnels du conducteur en croûte. Le modèle ICC contient un isotrope Conducteur de croûte, le modèle ACC-II contient un conducteur en croûte anisotrope avec alternance Couches horizontales de résistivité supérieure et inférieure.



### 3.2 Le contact vertical entre milieu l'isotrope et anisotrope

Le modèle (figure 3-4) consiste en un milieu anisotrope latéral avec des résistivités principales de 5 et 1000 ohm.m en contact avec un milieu isotrope et recouvert par deux couches résistive de 10 et 1000ohm. m .

En profondeur, le modèle s'étend jusqu'à l'infini, et une résistivité du milieu isotrope  $\rho_2 = 1000\text{ohm.m}$  (égal a  $\rho_{\text{max}}$ )

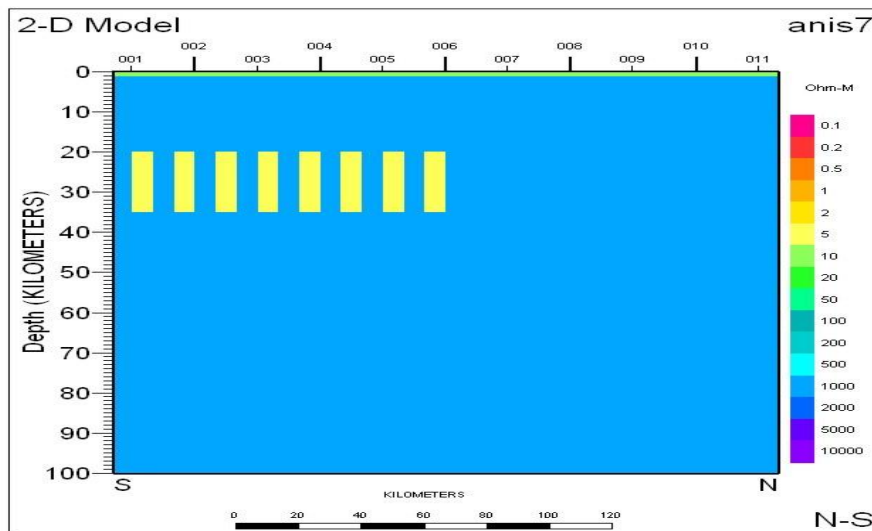


Figure : (3.4) Le modèle 1 consiste en une faute(milieu 1 anisotrope avec une résistivité principales  $\rho_{\text{min}} = 5\text{ohm.m} / \rho_{\text{max}} = 1000\text{ohm.m}$ , et milieu 2 isotrope) recouvre deux couches résistante de 10 et 1000Ohm. m.

# Chapitre 4 : Les résultats

## 4.1 Résultats liés au tenseur d'impédance

Les paramètres calculés de MT sont les suivants:

- les résistivités apparentes principales  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$ ;
- les phases principales  $\varphi_{xy}, \varphi_{yx}$ ;

Notons que le caractère 1-D d'un sondage MT est vérifié quand les courbes de résistivité apparente en fonction de la fréquence sont confondues et ce, quel que soit l'orientation.

L'interprétation 1-D ne pose aucun problème.

Si les structures géologiques font apparaître des failles, des changements latéraux de faciès etc. ; cela se traduit dans la plupart des cas, par des variations latérales de résistivité et donc par une structure à deux ou à trois dimensions. On définit alors les résistivités apparentes et les phases principales, c'est-à-dire les réponses MT selon l'axe de la structure (polarisation E) et selon le profil transversal (polarisation H).

## 4.2 Résultats liés aux fonctions de transfert magnétique

C'est :

- le tipper (vecteur d'induction);

## 4.3 Analyse de la modélisation d'une structure anisotropie :

Si milieu est rigoureusement homogène, Les valeurs de résistivités apparentes  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont identique en fonction de la fréquence suivant les deux directions de mesure, puisque ce cas  $Z_{xy} = -Z_{yx}$  (haut fréquence). Cette réponse MT peut être associée à des modèles trois terrain : résistant- conducteur- résistant.

Pour le modèle 1(a) les valeurs de la résistivité apparente  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont constant et identique de  $100 \text{ ohm.m}$  vers le champ de (10 Hz à 1000Hz), nous remarquons que la résistivité apparente est croissant de ( $10^{-1}$  à 10Hz).  $\rho_{yx}$  augmente tandis que  $\rho_{xy}$  décline sur la fréquence de ( $10^{-2}$  à  $10^{-1}$ Hz) alors que sur le champ de ( $10^{-3}$  à  $10^{-2}$ Hz) les cas inversent .

Pour le modèle 1(b) les valeurs de la résistivité apparente  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont constant et identique de  $1000 \text{ ohm.m}$  vers le champ de (10 Hz à 1000Hz), nous remarquons que la résistivité apparente est croissant de ( $10^{-1}$ Hz à 10Hz).  $\rho_{yx}$  augmente tandis que  $\rho_{xy}$  décline sur la fréquence de ( $10^{-2}$  à  $10^{-1}$ Hz) alors que sur le champ de ( $10^{-3}$  à  $10^{-2}$ Hz) les cas inversent.

Pour le modèle 1(c) les valeurs de la résistivité apparente  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont constantes et identique de  $10000 \text{ ohm.m}$  vers le champ de (1 Hz à 1000Hz) tandis que  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont décroissante de ( $10^{-1}$ Hz à 1Hz).  $\rho_{yx}$  est stable au niveau de  $1000 \text{ ohm.m}$  alors que  $\rho_{xy}$  décline à  $100 \text{ ohm.m}$  de ( $10^{-2}$  à  $10^{-1}$ Hz).  $\rho_{xy}$  et  $\rho_{yx}$  sont décroissante de ( $10^{-3}$  à  $10^{-2}$ Hz).

Les phases associées sont représentées à la figure (4.1) elles sont entre ( $-180^\circ$  et  $90^\circ$ ) et l'amplitude entre  $\varphi_{xy}$  et  $\varphi_{yx}$  sont  $180^\circ$ .

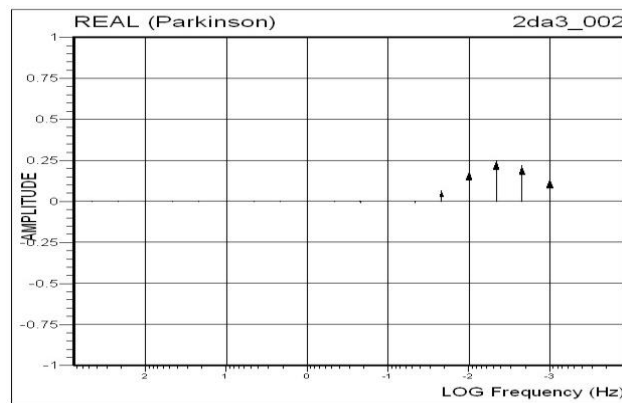
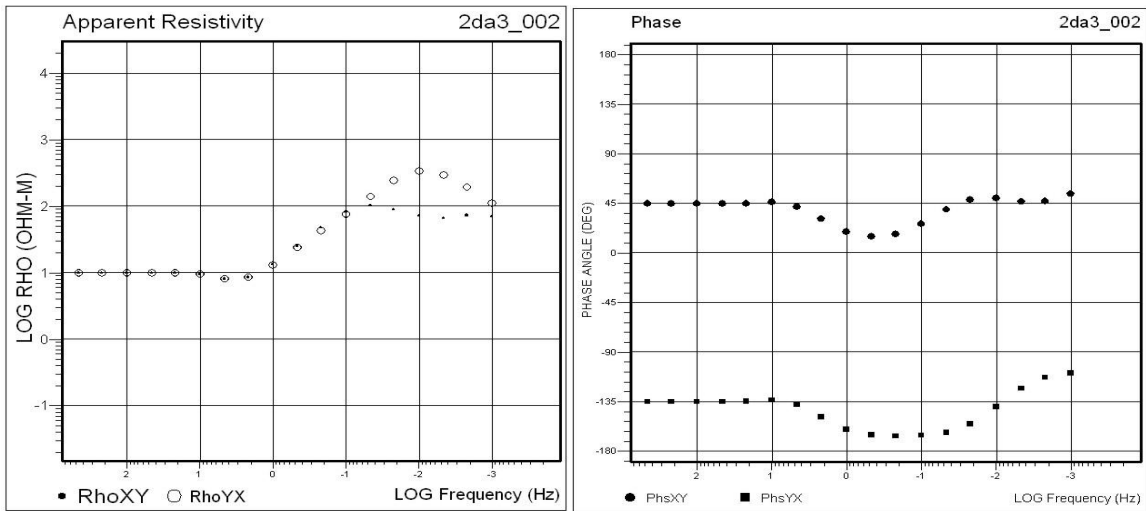
Les flèches d'induction sont nulles dans les hautes fréquences et augmentent dans les basses fréquences, l'amplitude est positive (entre 0 et 0.5 km) dans le site 1 jusqu'à 9, nulle dans le site 10, et négative (entre 0 et -0.5 km) dans le site 11 jusqu'à 20.

## Les sites des Modèles:

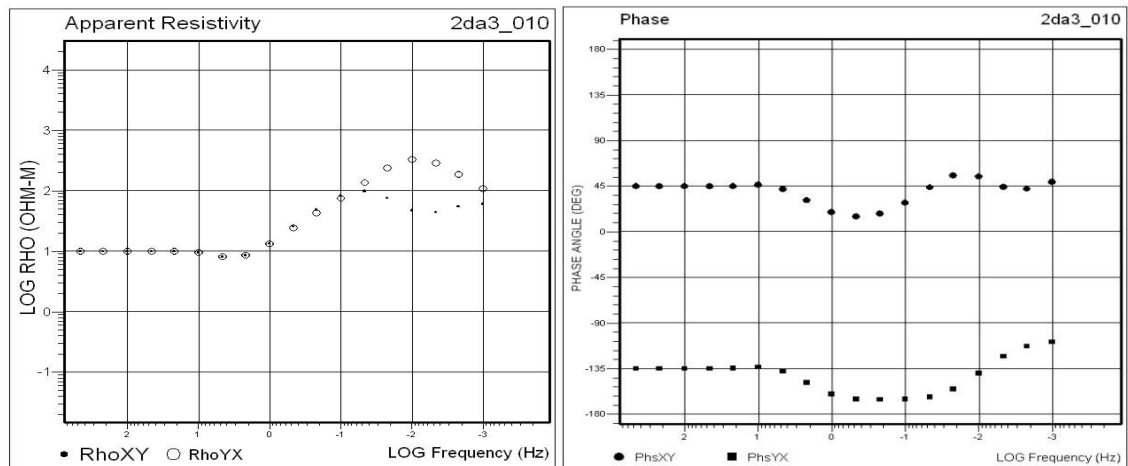
### Modèle1 :

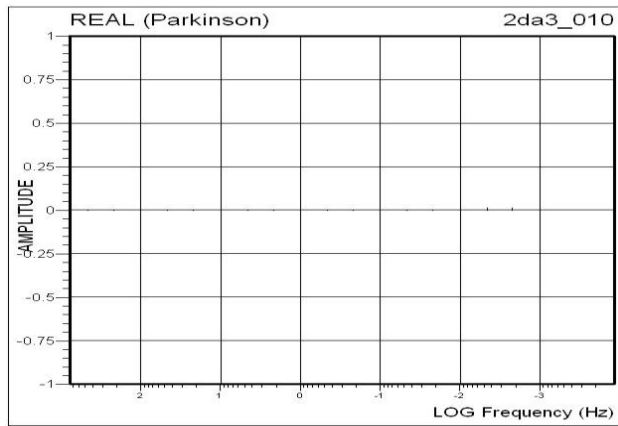
- **Modèle 1(a) :**

Site 2 :

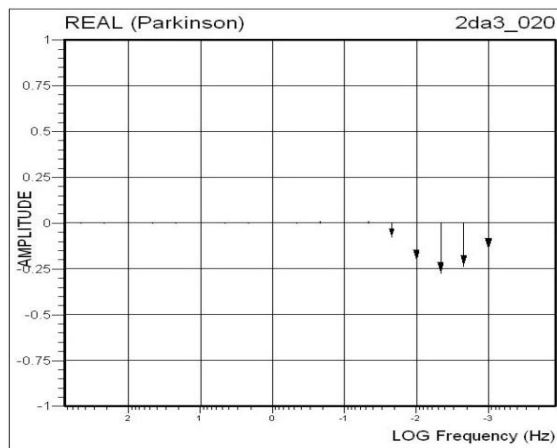
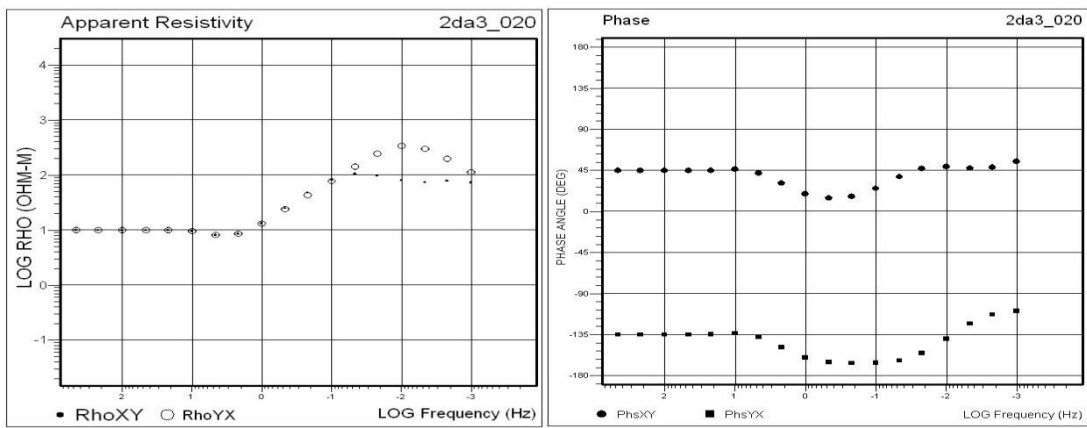


Site 10 :



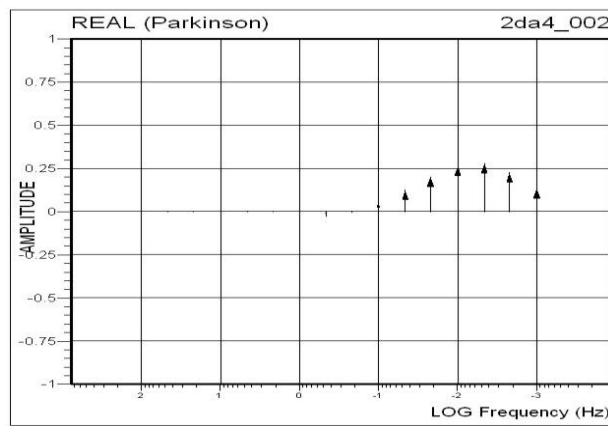
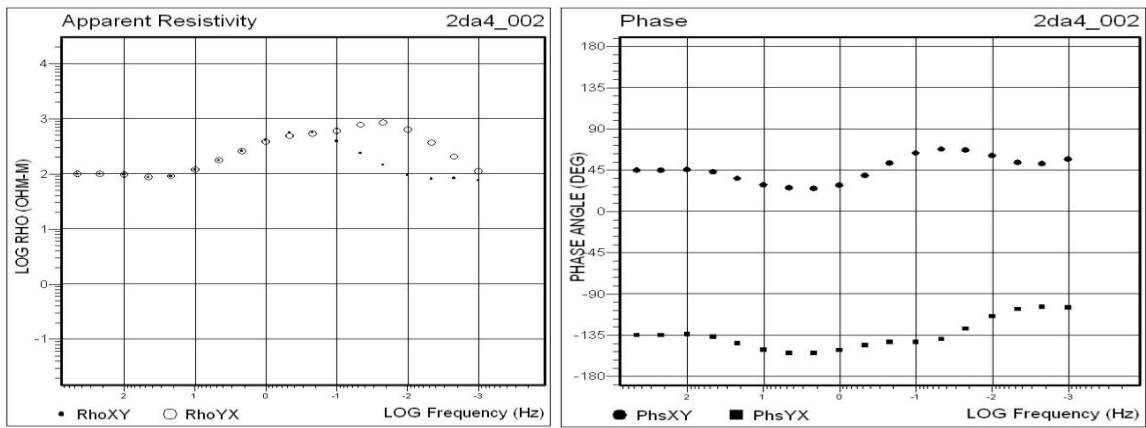


Site 20 :

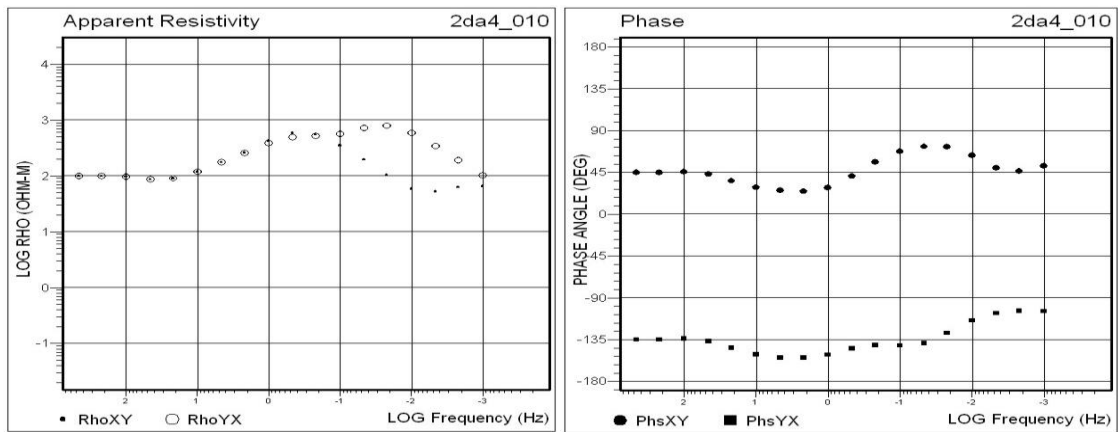


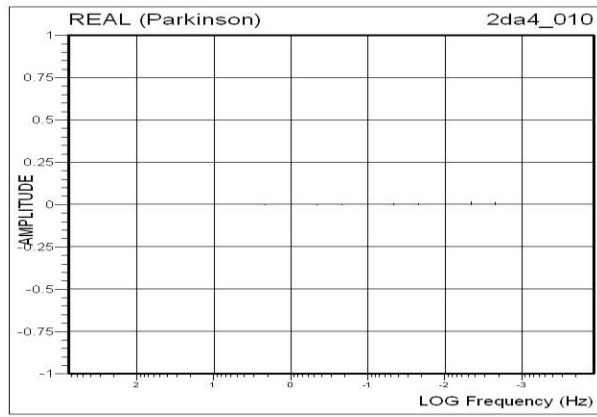
Modèle 1(b) :

Site 2 :

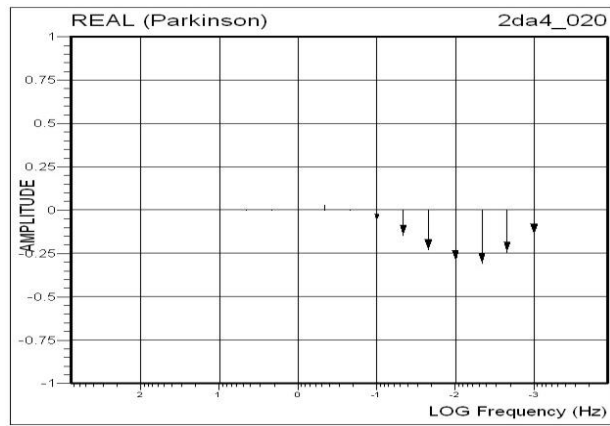
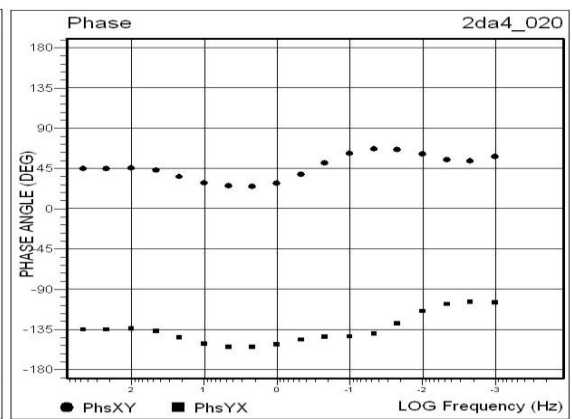
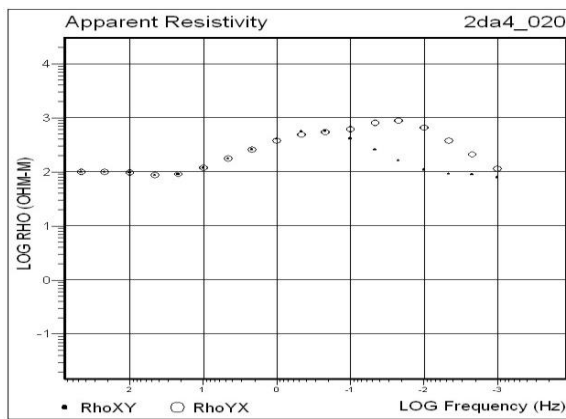


Site 10 :



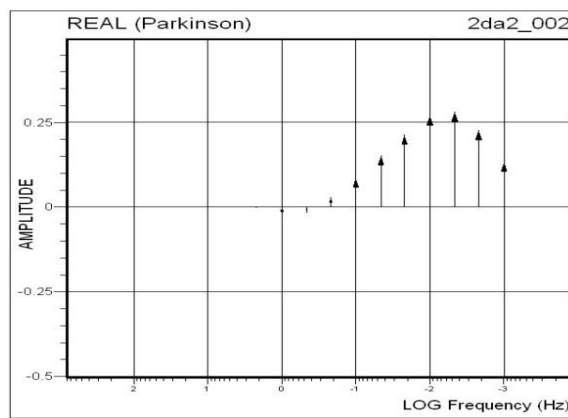
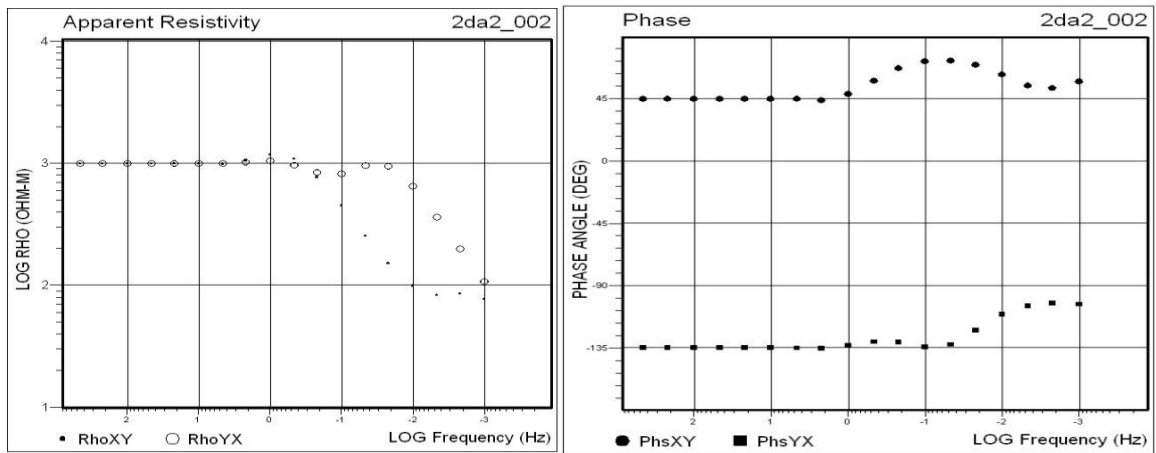


Site 20 :

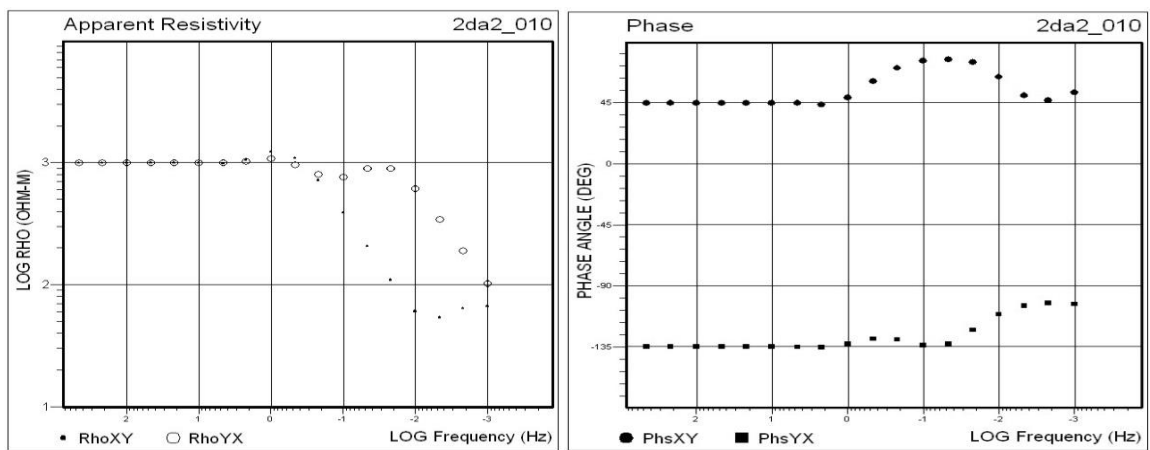


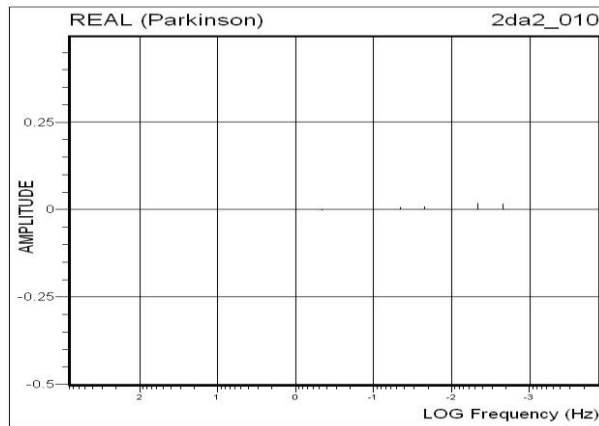
Modèle 1(c) :

Site 2 :



Site 10 :





Site 20 :

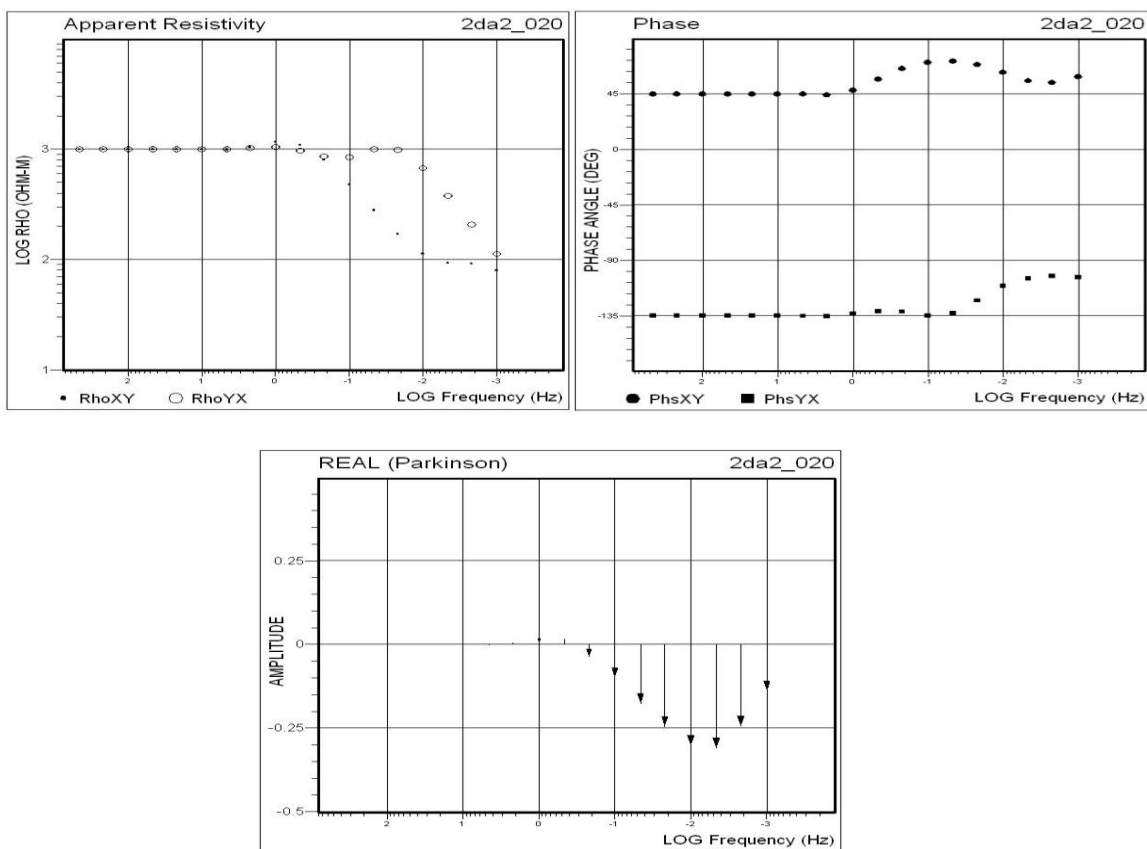


Figure (4.1) : représente la résistivité apparente, la phase et les vecteur d'induction de modèle 1(a, b et c) pour 20 sites

**Modèle 2(ICC) :**

Pour les sites(1, 2, 3, 9, 10 et 11) les valeurs de la résistivité apparent  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont constant et identique de  $100hm.m$  vers le champ de (10 Hz à 1000 Hz), nous remarquons que la résistivité apparent est croissant de ( $10^{-2}$  à 10Hz) et de ( $10^{-3}$  à  $10^{-2} HZ$ )  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont décroissant.

Pour les sites (4 et 8) les valeurs de la résistivité apparent  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont constant et identique de  $100hm.m$  vers le champ de (10 Hz à 1000 Hz), nous remarquons que la résistivité



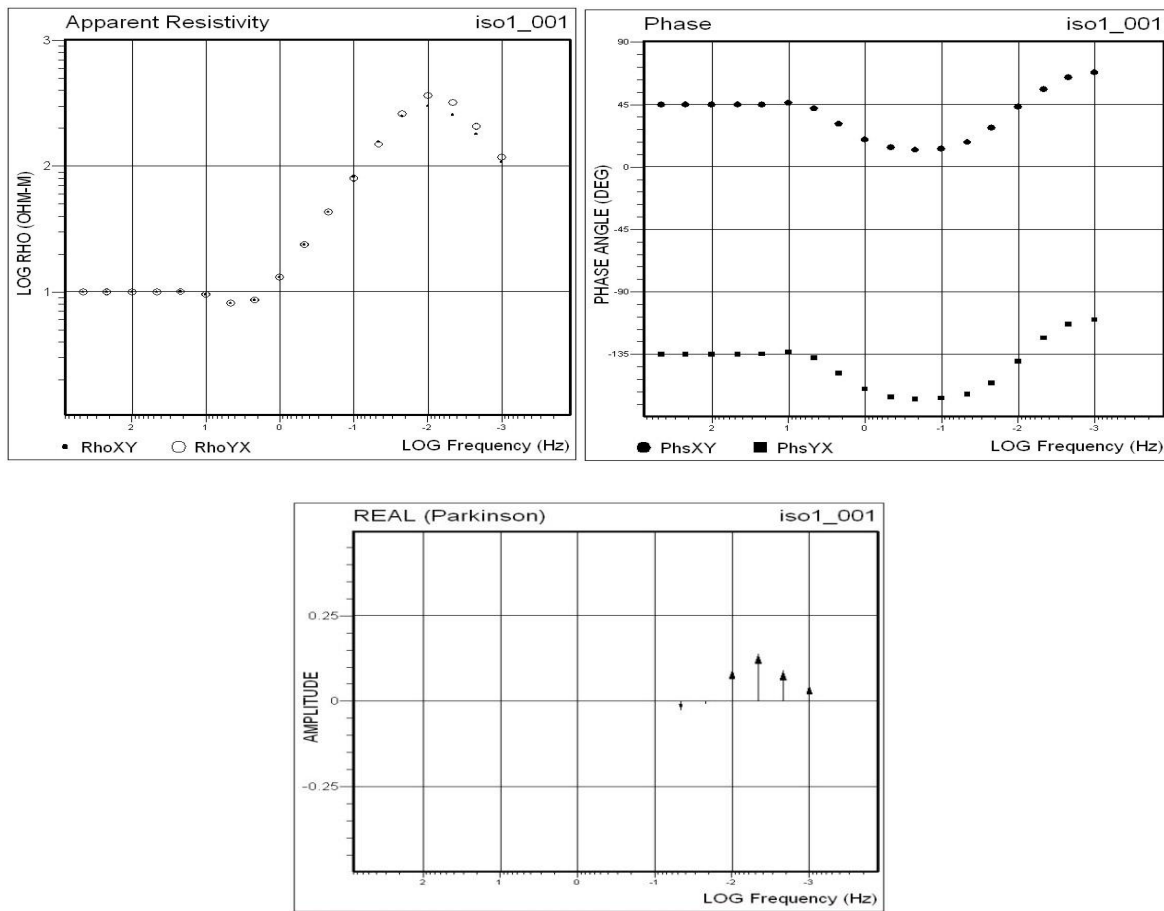
apparent est croissant de ( $10^{-1}$  à  $10\text{Hz}$ ).  $\rho_{yx}$  augmente tandis que  $\rho_{xy}$  décline sur la fréquence de ( $10^{-2}$  à  $10^{-1}\text{HZ}$ ).  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont décroissant de ( $10^{-3}$  à  $10^{-2}\text{HZ}$ ).

Pour les sites (5, 6 et 7) de ( $10^{-1}$  à  $1000\text{Hz}$ ) les valeurs de la résistivité apparente  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  reste le même avec les autres sites.  $\rho_{yx}$  augmente tandis que  $\rho_{xy}$  décline sur la fréquence de ( $10^{-2}$  à  $10^{-1}\text{HZ}$ ) alors que sur le champ de ( $10^{-3}$  à  $10^{-2}\text{HZ}$ ) les cas inversent.

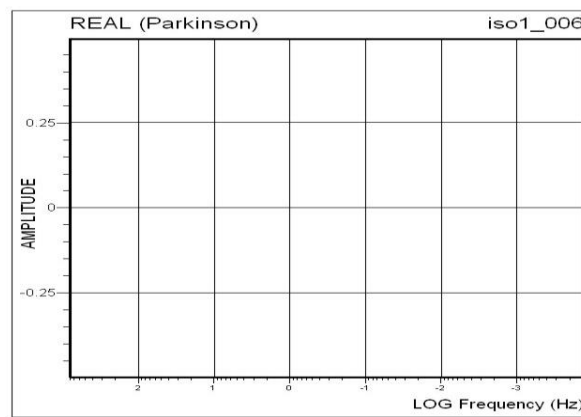
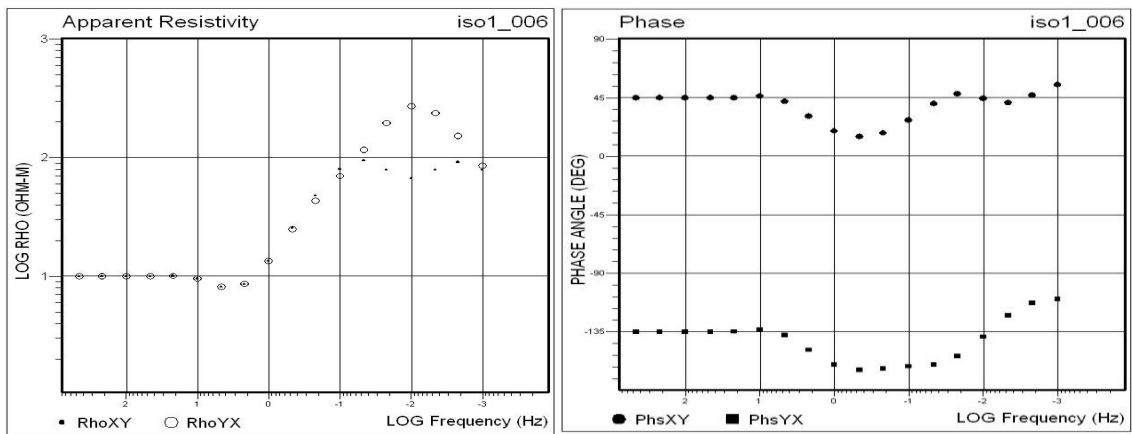
Les phases associées sont représentées à la figure (4.2) elles sont entre ( $-180^\circ$  et  $90^\circ$ ) et l'amplitude entre  $\varphi_{xy}$  et  $\varphi_{yx}$  sont  $180^\circ$ .

Les flèches d'induction sont nulles dans les hautes fréquences et augmentent dans les basses fréquences, l'amplitude est positive (entre 0 et 0.5 km) dans le site 1 jusqu'à 5, nulle dans le site 6, et négative (entre 0 et -0.5 km) dans le site 7 jusqu'à 11.

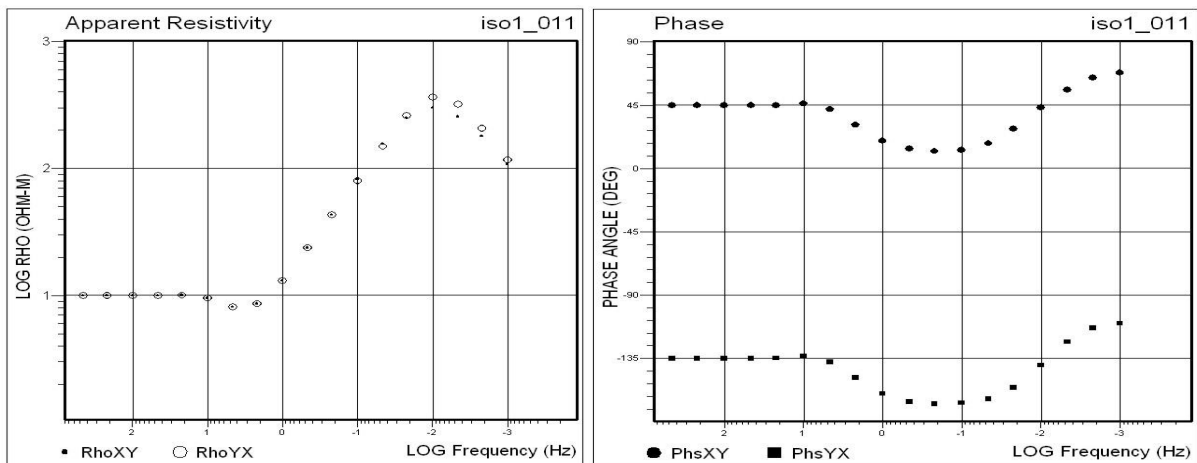
Site 1 :



Site 6 :



Site 11 :



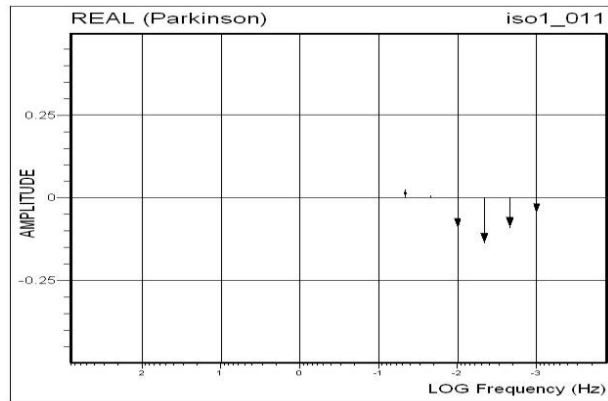


Figure (4.2) : représente la résistivité apparente, la phase et les vecteurs d'induction de model ICC (isotropic crustal conductor) pour 11 sites.

### Modèle 3(ACC-I) :

Pour les sites (1, 2, 3, 9, 10 et 11) les valeurs de la résistivité apparent  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont constant et identique de  $100 \text{ hm.m}$  vers le champ de (10 Hz à 1000Hz), nous remarquons que la résistivité apparent est croissant de ( $10^{-2}$  à 10Hz) et de ( $10^{-3}$  à  $10^{-2}$  HZ)  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont décroissant.

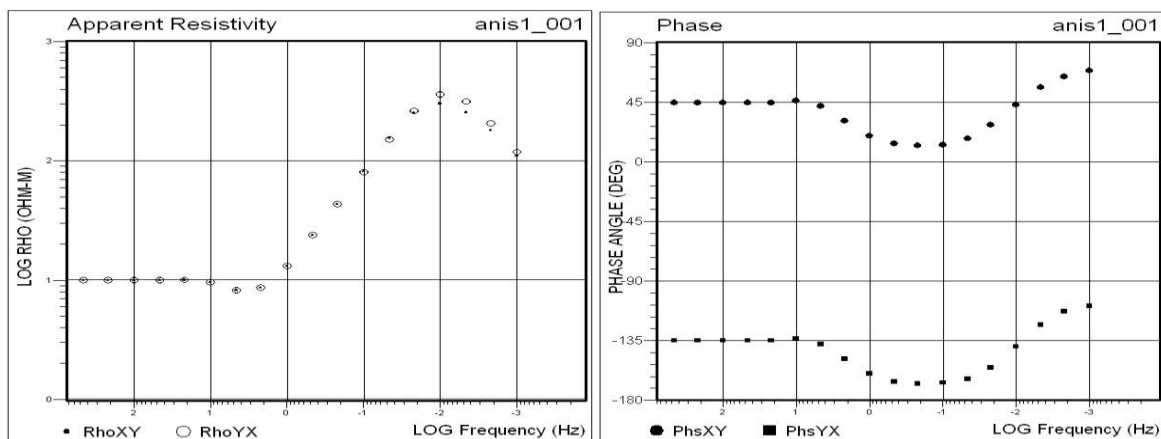
Pour les sites (4 et 8) les valeurs de la résistivité apparent  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont constant et identique de  $100 \text{ hm.m}$  vers le champ de (10 Hz à 1000Hz), nous remarquons que la résistivité apparent est croissant de ( $10^{-1}$  à 10Hz).  $\rho_{yx}$  augmente tandis que  $\rho_{xy}$  décline sur la fréquence de ( $10^{-2}$  à  $10^{-1}$  HZ).  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont décroissant de ( $10^{-3}$  à  $10^{-2}$  HZ).

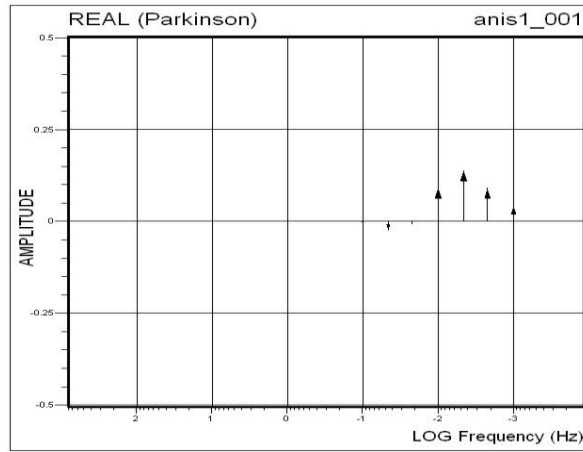
Pour les sites (5, 6 et 7) de ( $10^{-1}$  à 1000Hz) les valeurs de la résistivité apparente  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  reste le même avec les autres sites.  $\rho_{yx}$  augmente tandis que  $\rho_{yx}$  décline sur la fréquence de ( $10^{-2}$  à  $10^{-1}$  HZ) alors que sur le champ de ( $10^{-3}$  à  $10^{-2}$  HZ) les cas inversent.

Les phases associe sont représenté à la figure (4.3) elles sont entre ( $-180^\circ$  et  $90^\circ$ ) et l'amplitude entre  $\varphi_{xy}$  et  $\varphi_{yx}$  sont  $180^\circ$ .

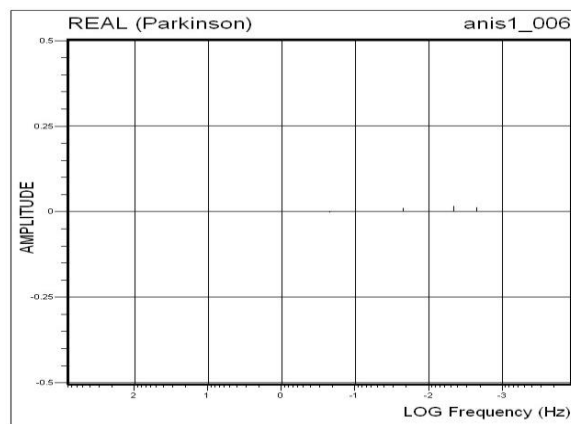
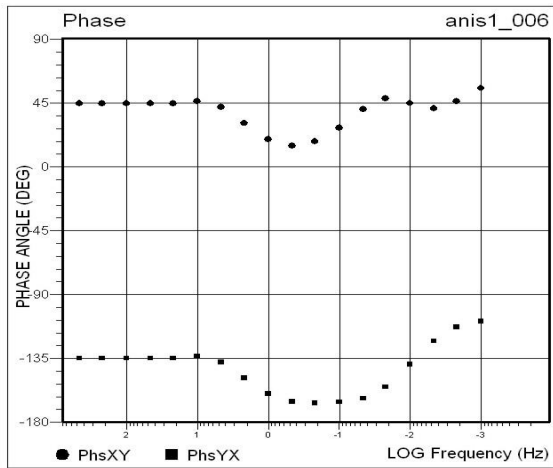
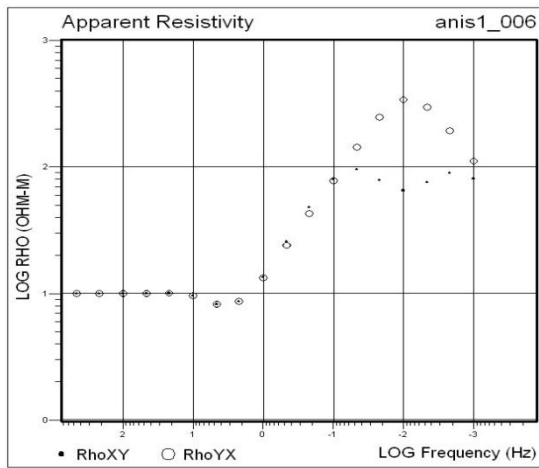
Les flèches d'induction sont nulles dans les hautes fréquences et augmente dans les basses fréquences, l'amplitude est positive (entre 0 et 0.5 km) dans le site 1 jusqu'à 5, nulle dans le site 6, et négative (entre 0 et -0.5 km) dans le site 7 jusqu'à 11.

Site 1 :





Site 6 :



Site 10 :

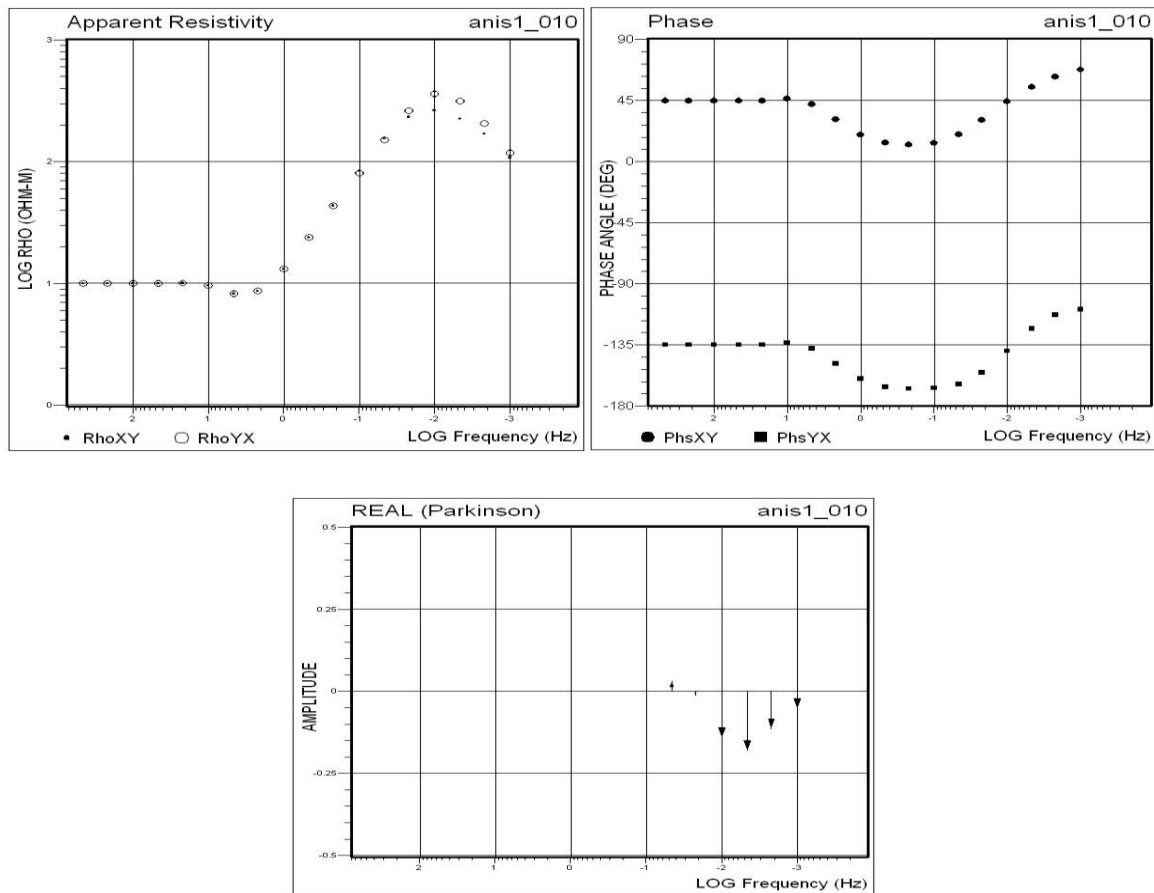


Figure (4.3) : représente la résistivité apparente, la phase et les vecteurs d'induction de modèle ACC-I (anisotropic crustal conductor) pour 11 sites.

### Modèle 4(ACC-II) :

Pour les sites (1, 2, 3, 9, 10 et 11) les valeurs de la résistivité apparent  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont constant et identique de  $10 \text{ Ohm.m}$  vers le champ de (10 Hz à 1000Hz), nous remarquons que la résistivité apparent est croissant de ( $10^{-2}$  à 10Hz) et de ( $10^{-3}$  à  $10^{-2}$  Hz)  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont décroissant.

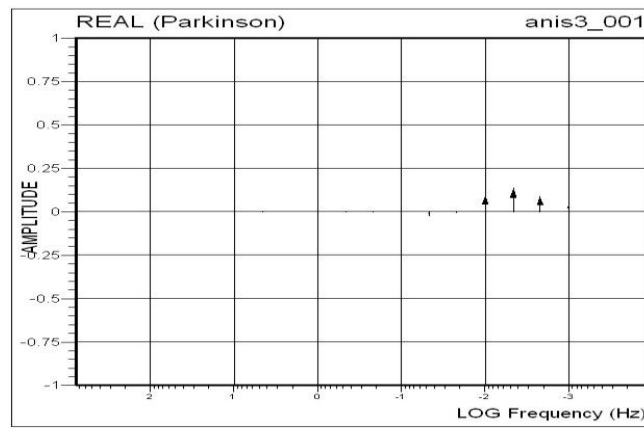
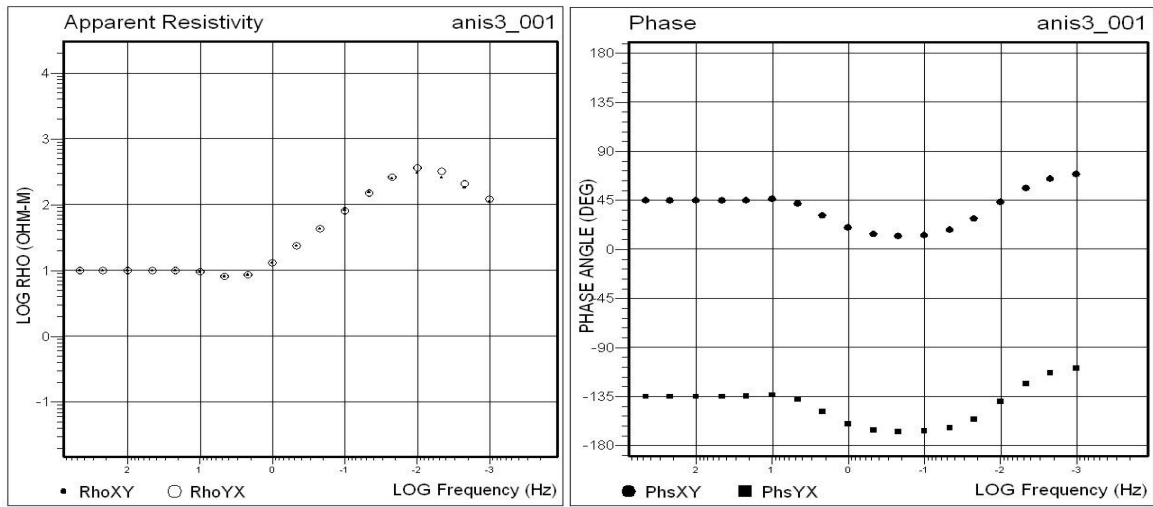
Pour les sites (4 et 8) les valeurs de la résistivité apparent  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont constant et identique de  $10 \text{ Ohm.m}$  vers le champ de (10 Hz à 1000Hz), nous remarquons que la résistivité apparent est croissant de ( $10^{-1}$  à 10Hz).  $\rho_{yx}$  augmente tandis que  $\rho_{xy}$  décline sur la fréquence de ( $10^{-2}$  à  $10^{-1}$  Hz).  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont décroissant de ( $10^{-3}$  à  $10^{-2}$  Hz).

Pour les sites (5, 6 et 7) de ( $10^{-1}$  à 1000Hz) les valeurs de la résistivité apparente  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  reste le même avec les autres sites.  $\rho_{yx}$  augmente tandis que  $\rho_{xy}$  décline sur la fréquence de ( $10^{-2}$  à  $10^{-1}$  Hz) alors que sur le champ de ( $10^{-3}$  à  $10^{-2}$  Hz) les cas inversent.

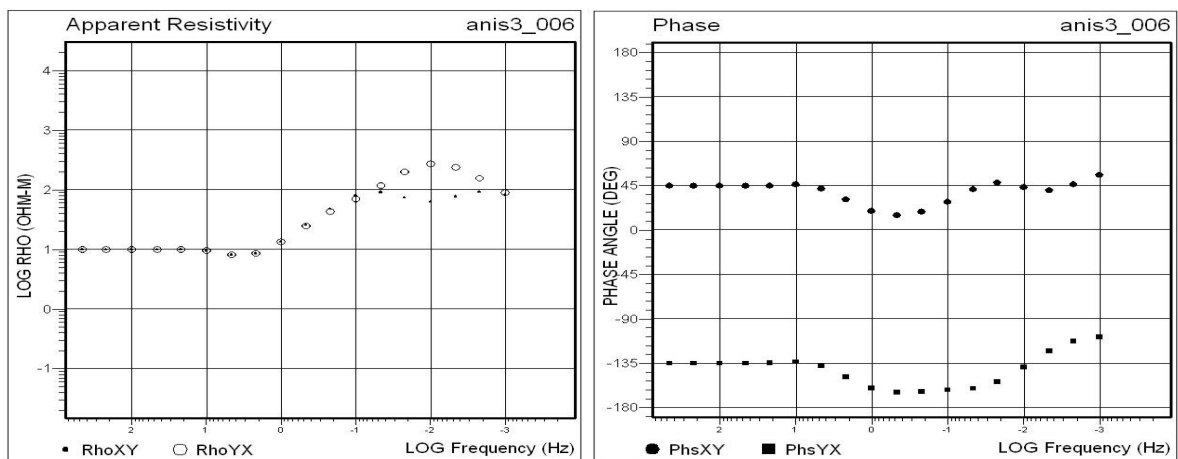
Les phases associée sont représenté à la figure (4.4) elles sont entre ( $-180^\circ$  et  $90^\circ$ ) et l'amplitude entre  $\varphi_{xy}$  et  $\varphi_{yx}$  sont  $180^\circ$ .

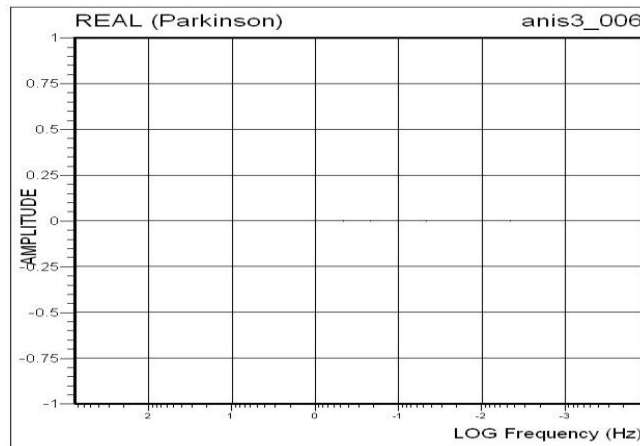
Les flèches d'induction sont nulles dans les hautes fréquences et augmente dans les basses fréquences, l'amplitude est positive (entre 0 et 0.5 km) dans le site 1 jusqu'à 5, nulle dans le site 6, et négative (entre 0 et -0.5 km) dans le site 7 jusqu'à 11.

Site 1 :



Site 6 :





Site 11 :

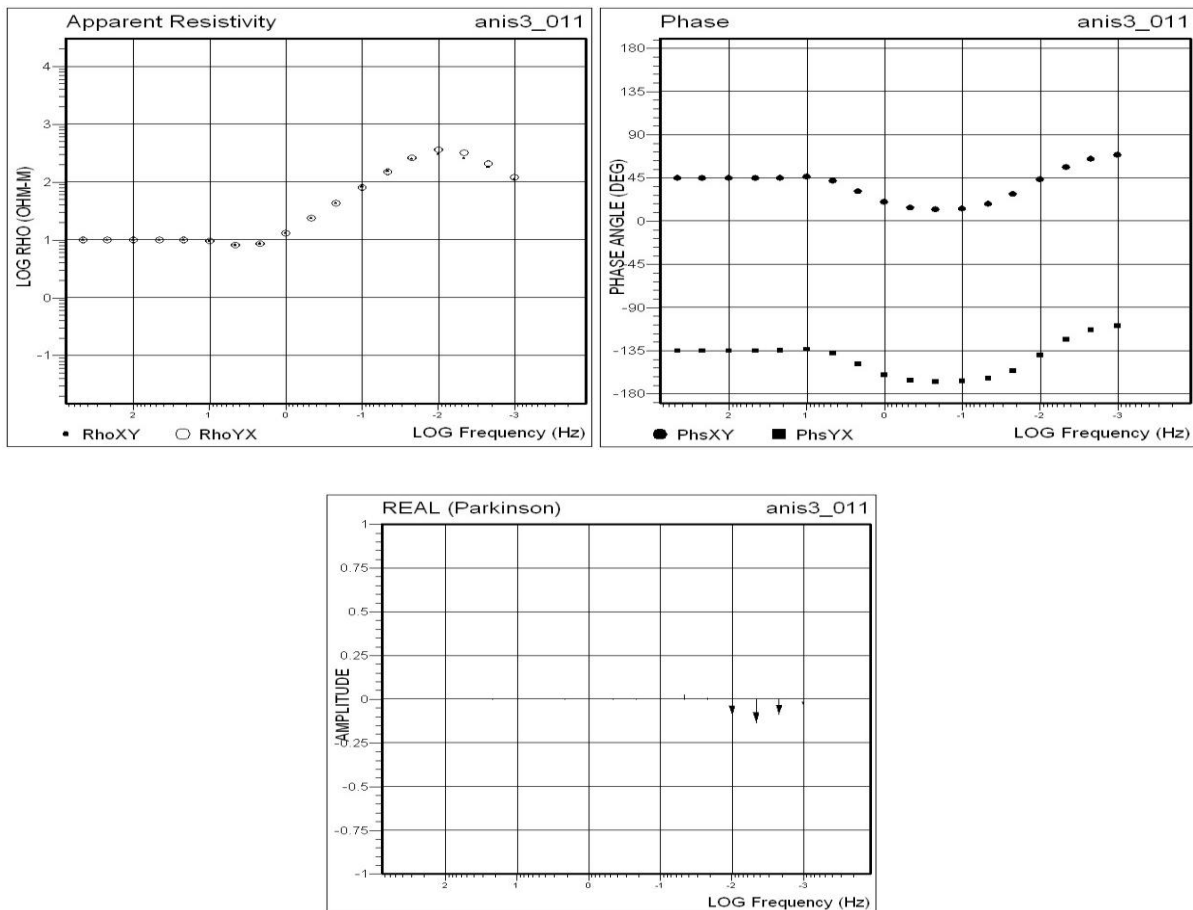


Figure (4.4) : représente la résistivité apparente, la phase et les vecteurs d'induction de modèle ACC-II (anisotropic crustal conductor) pour 11 sites.

### Modèle 5 :

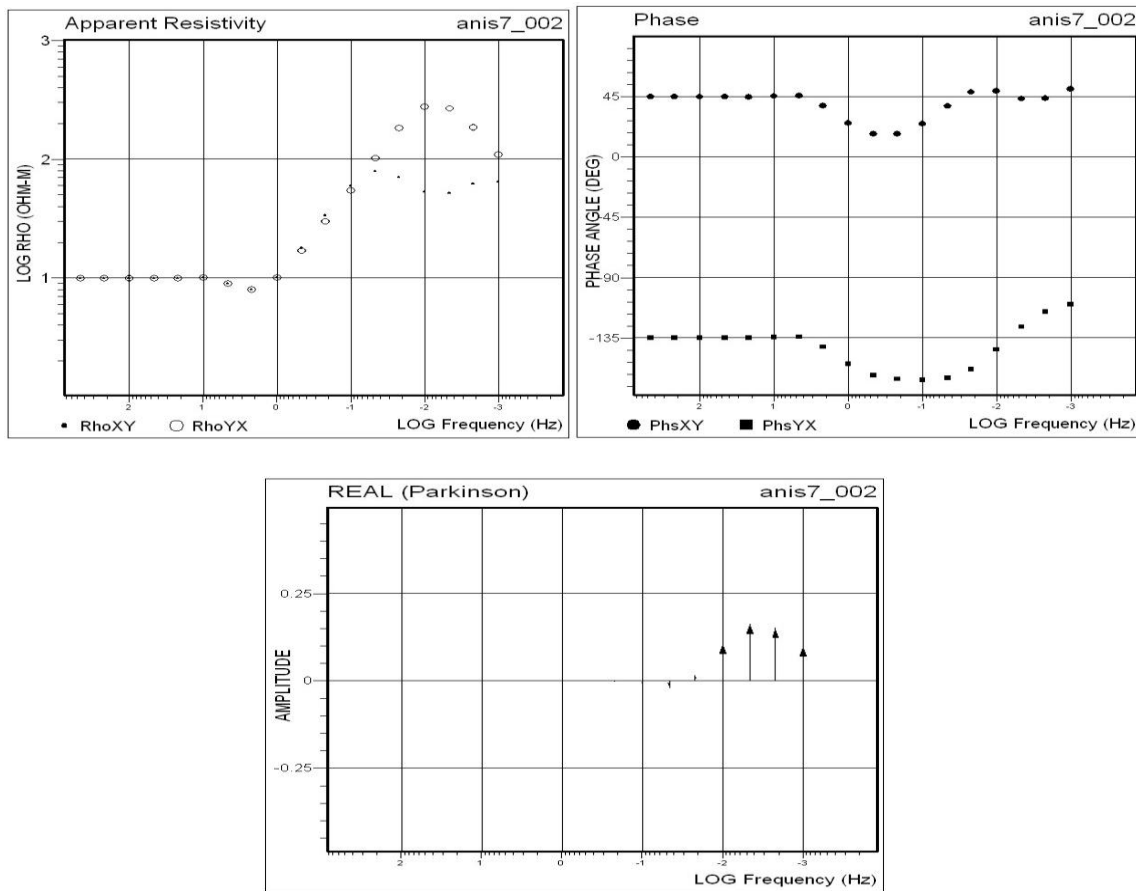
Pour les sites (1, 2, 3, 4, 5 et 6) les valeurs de la résistivité apparent  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont constant et identique de  $100hm.m$  vers le champ de (10 Hz à 1000 Hz), nous remarquons que la résistivité apparent est croissant de ( $10^{-1}$  à 10 Hz).  $\rho_{yx}$  augmente tandis que  $\rho_{xy}$  décline sur la fréquence de ( $10^{-2}$  à  $10^{-1}$  HZ) alors que sur le champ de ( $10^{-3}$  à  $10^{-2}$  HZ) les cas inversent.

Pour les sites (7, 8, 9, 10 et 11) de ( $10^{-1}$  à  $1000\text{Hz}$ ) les valeurs de la résistivité apparente  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  reste le même avec les autres sites. Nous remarquons que la résistivité apparente est croissant de ( $10^{-2}$  à  $10^{-1}\text{Hz}$ ) et de ( $10^{-3}$  à  $10^{-2}\text{Hz}$ )  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont décroissant.

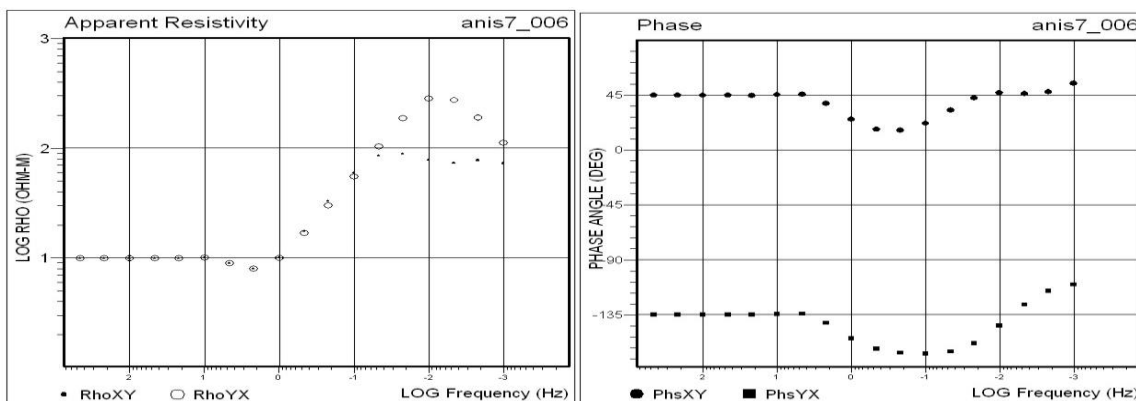
Les phases associées sont représentées à la figure (4.5) elles sont entre ( $-180^\circ$  et  $90^\circ$ ) et l'amplitude entre  $\varphi_{xy}$  et  $\varphi_{yx}$  sont  $180^\circ$ .

Les flèches d'induction sont nulles dans les hautes fréquences et augmentent dans les basses fréquences, l'amplitude est positive (entre 0 et 0.5 km) dans le site 1 jusqu'à 5, nulle dans le site 6, et négative (entre 0 et -0.5 km) dans le site 7 jusqu'à 11.

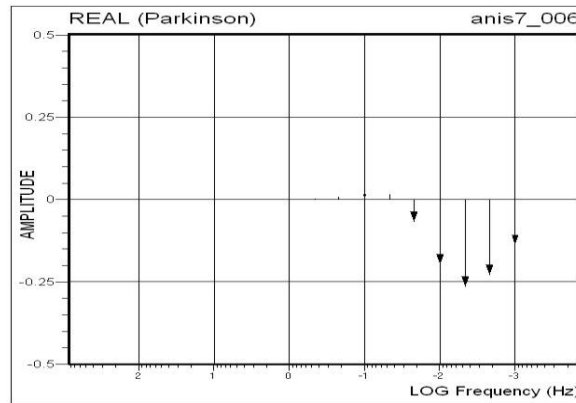
Site 2 :



Site 6 :







Site 11 :

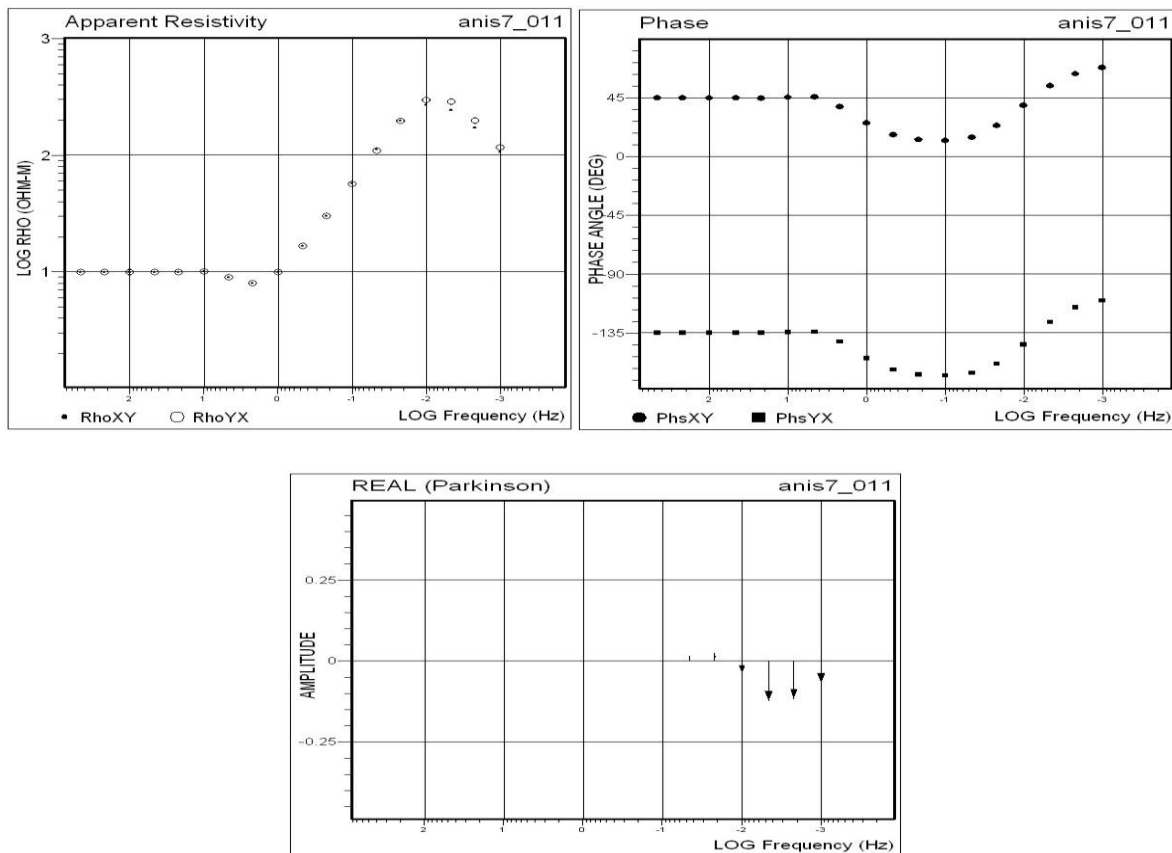


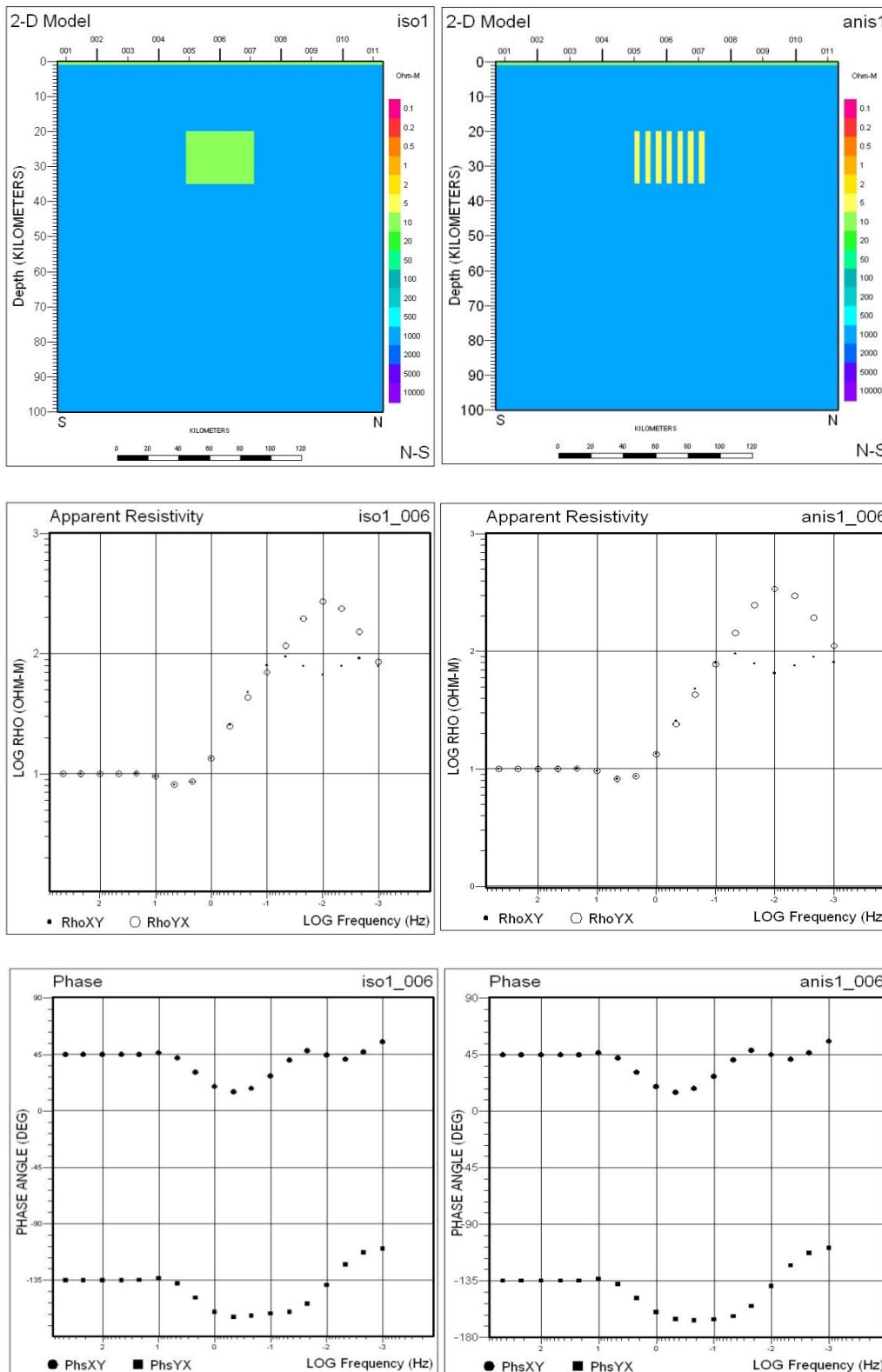
Figure (4.5) : représente les sites (2, 6 et 11) de la résistivité apparente, la phase et les vecteurs d'induction de modèle de milieu 1 anisotrope et milieu 2 isotrope.

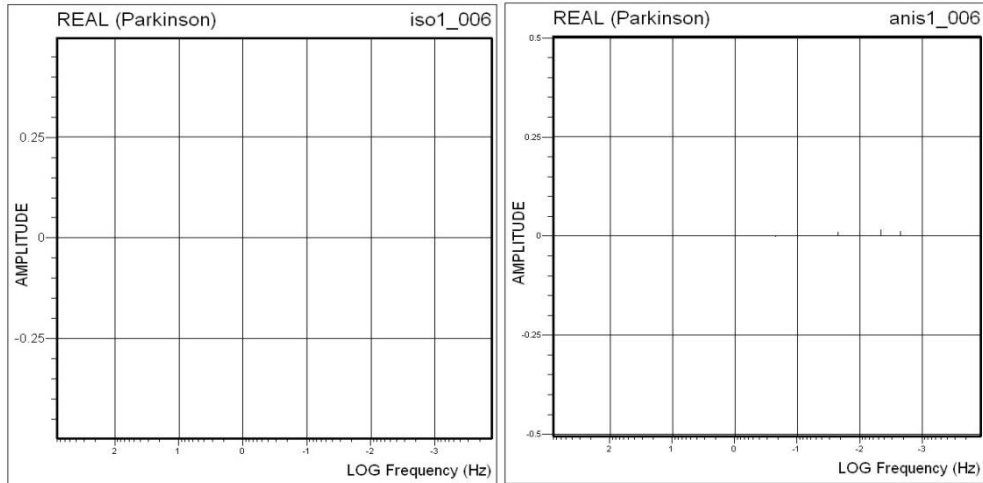
#### 4.4 Comparaison entre modèle anisotrope et isotrope:

Nous remarquons que isotrope et anisotrope sont presque les mêmes dans la résistivité apparente identique, croissant et décroissant. La phase est toujours entre  $-180^\circ$  et  $90^\circ$  et l'amplitude entre  $\varphi_{xy}$  et  $\varphi_{yx}$  sont à  $180^\circ$ . Ce qui concerne les vecteurs d'induction sont nulles aux hautes fréquences et augmente dans les basses fréquences l'amplitude est positive (entre 0 et 0.5 km) dans le site 1 jusqu'à 5, nulle dans le site 6, et négative (entre 0 et -0.5 km) dans le site 7 jusqu'à 11.

### 4.4.1 Comparaison entre ICC et ACC-I :

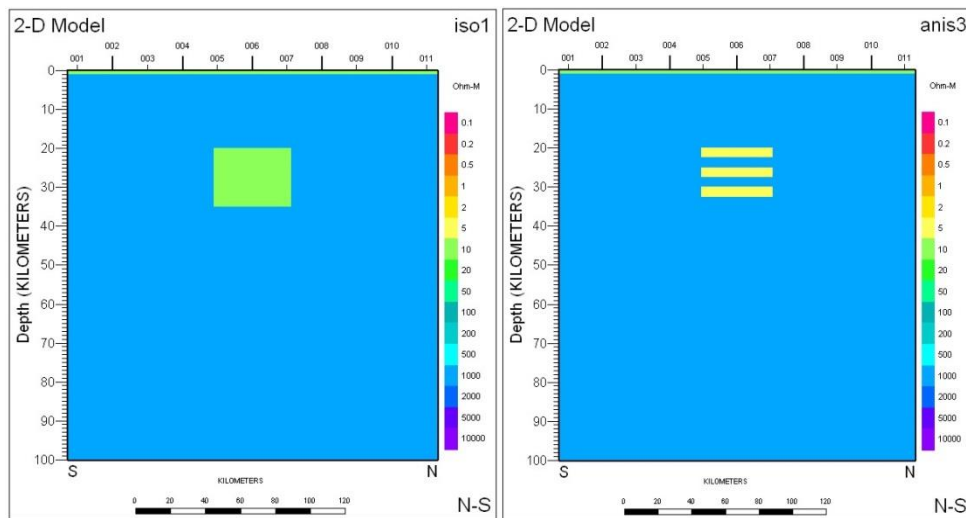
Dans le site 6, nous remarquons que ICC et ACC-I sont presque les mêmes dans la résistivité apparente, croissant et décroissant. La phase est entre  $-180^\circ$  et  $90^\circ$  et l'amplitude entre  $\varphi_{xy}$  et  $\varphi_{yx}$  sont à  $180^\circ$ . Ce qui concerne les vecteurs d'induction sont nulles dans ce site

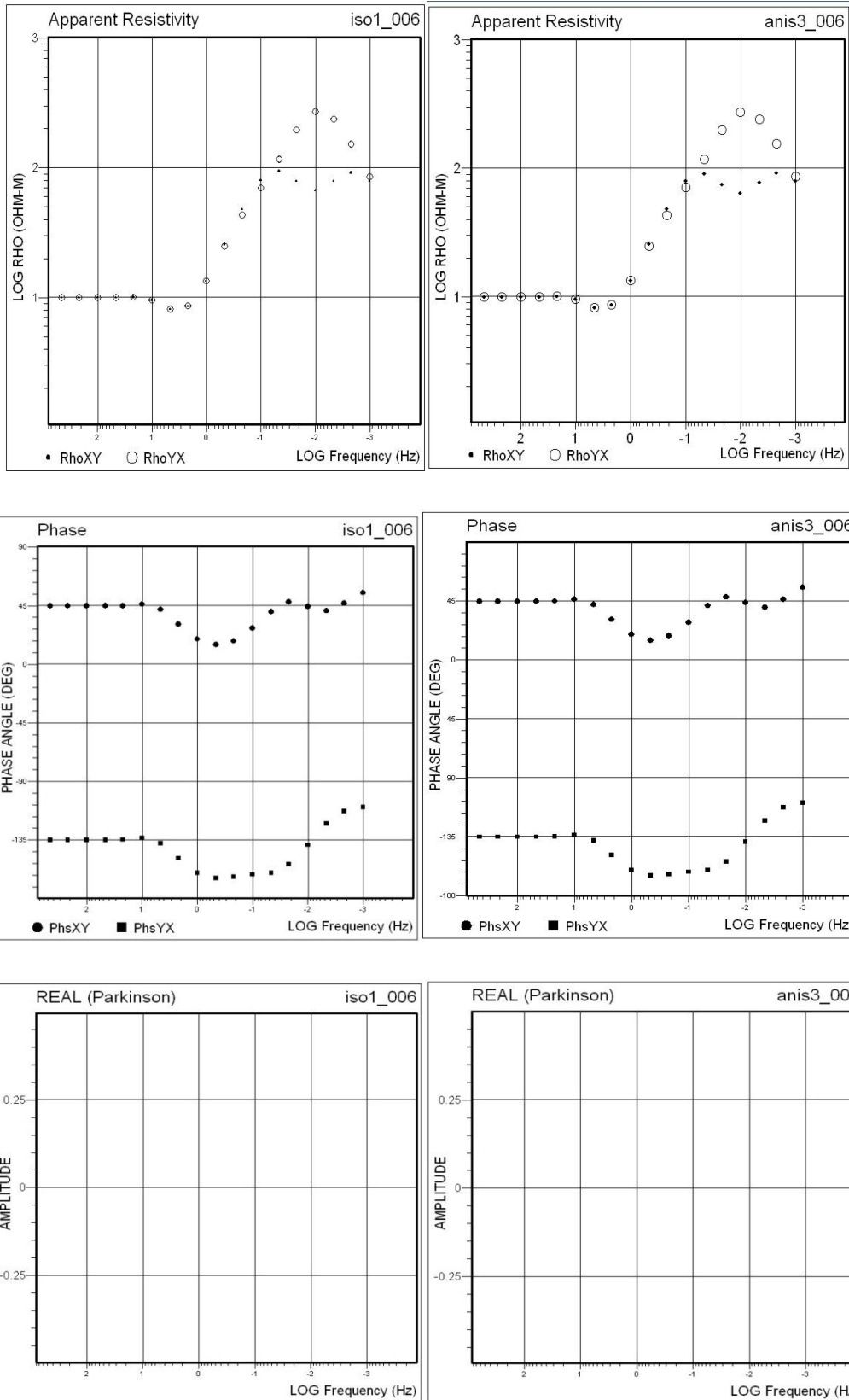




#### 4.4.2 Comparaison entre ICC et ACC-II :

Dans le site 6, nous remarquons que ICC et ACC-II sont presque les mêmes dans la résistivité apparente, croissant et décroissant. La phase est entre  $-180^\circ$  et  $90^\circ$  et l'amplitude entre  $\varphi_{xy}$  et  $\varphi_{yx}$  sont à  $180^\circ$ . Ce qui concerne les vecteurs d'indiction sont nulles dans ce site





#### 4.4.3 Modèle avec milieu 1 anisotrope et milieu 2 isotrope :

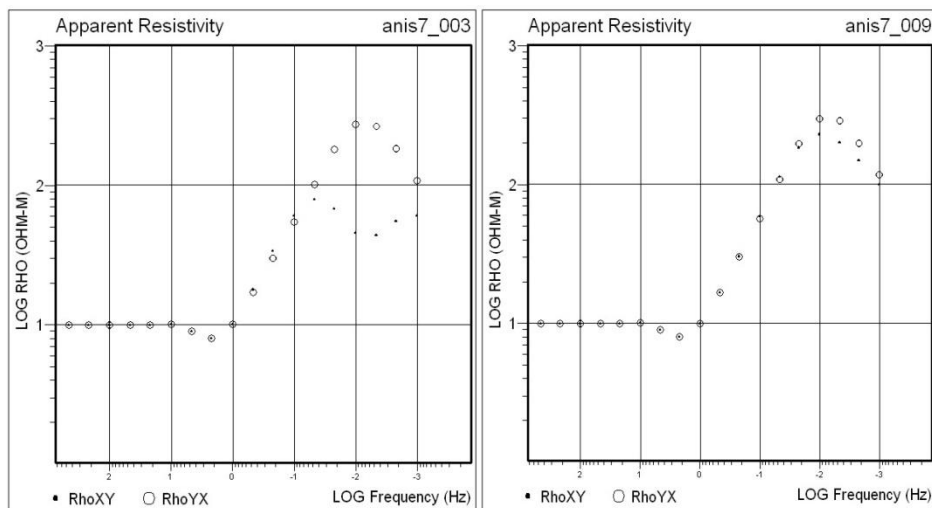
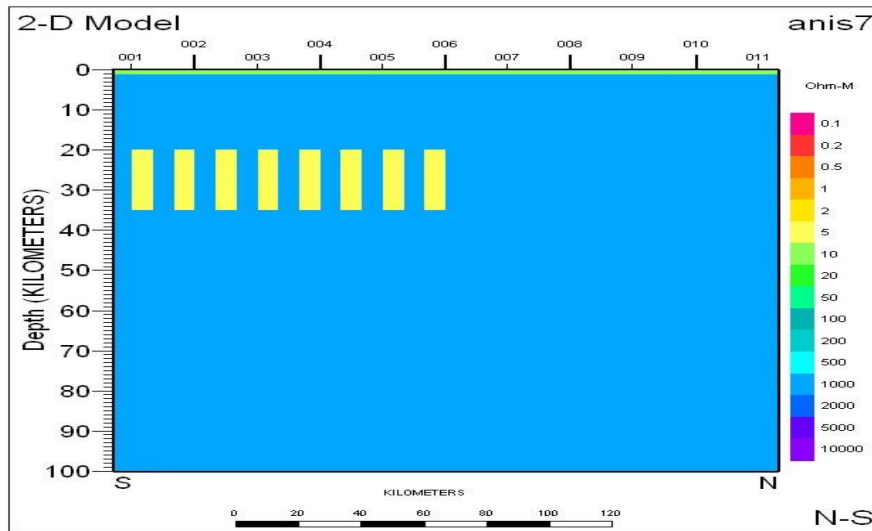
Pour le site 3 les valeurs de la résistivité apparent  $\rho_{xy}$ ,  $\rho_{yx}$  sont constant et identique de  $100 \text{ hm.m}$  vers le champ de (10 Hz à 1000Hz), nous remarquons que la résistivité apparent

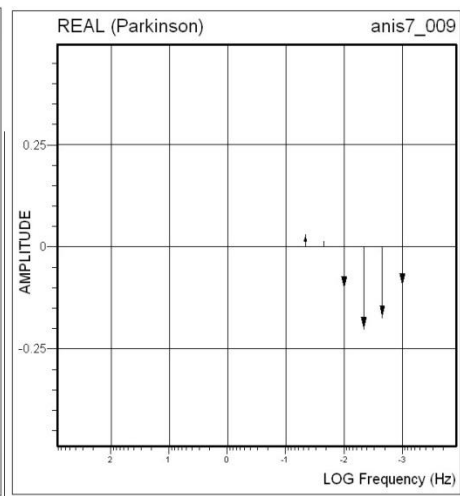
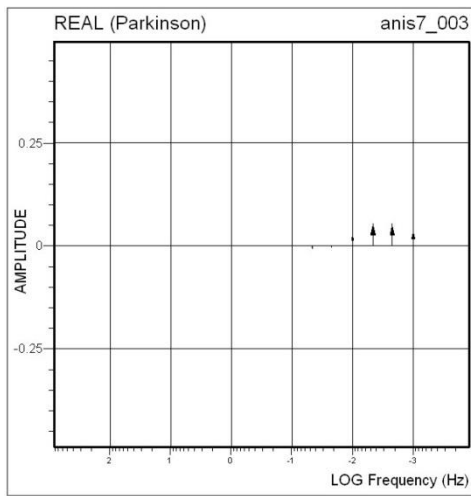
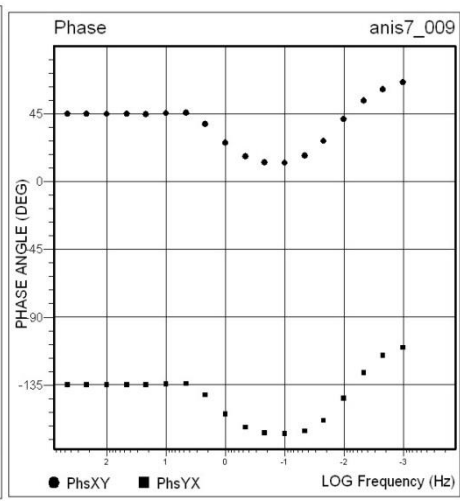
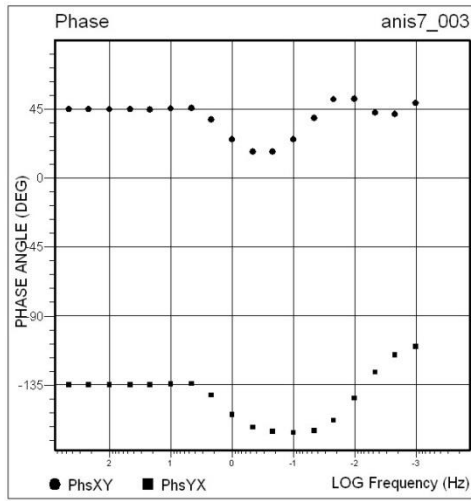
est croissant de ( $10^{-1}$  à  $10\text{Hz}$ ).  $\rho_{yx}$  augmente tandis que  $\rho_{xy}$  décline sur la fréquence de ( $10^{-2}$  à  $10^{-1}\text{HZ}$ ) alors que sur le champ de ( $10^{-3}$  à  $10^{-2}\text{HZ}$ ) les cas inversent.

Pour le site 9 de ( $10^{-1}$  à  $1000\text{Hz}$ ) les valeurs de la résistivité apparente  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  reste le même avec le site 3. Nous remarquons que la résistivité apparente est croissant de ( $10^{-2}$  à  $10^{-1}\text{Hz}$ ) et de ( $10^{-3}$  à  $10^{-2}\text{HZ}$ )  $\rho_{xy}, \rho_{yx}$  sont décroissant.

La phase est entre  $-180^\circ$  et  $90^\circ$  et l'amplitude entre  $\varphi_{xy}$  et  $\varphi_{yx}$  sont à  $180^\circ$ .

Les flèches d'induction sont nulles dans les hautes fréquences et augmente dans les basses fréquences, l'amplitude est positive (entre 0 et 0.5 km) dans le site 3 et négative (entre 0 et -0.5 km) dans le site 9.



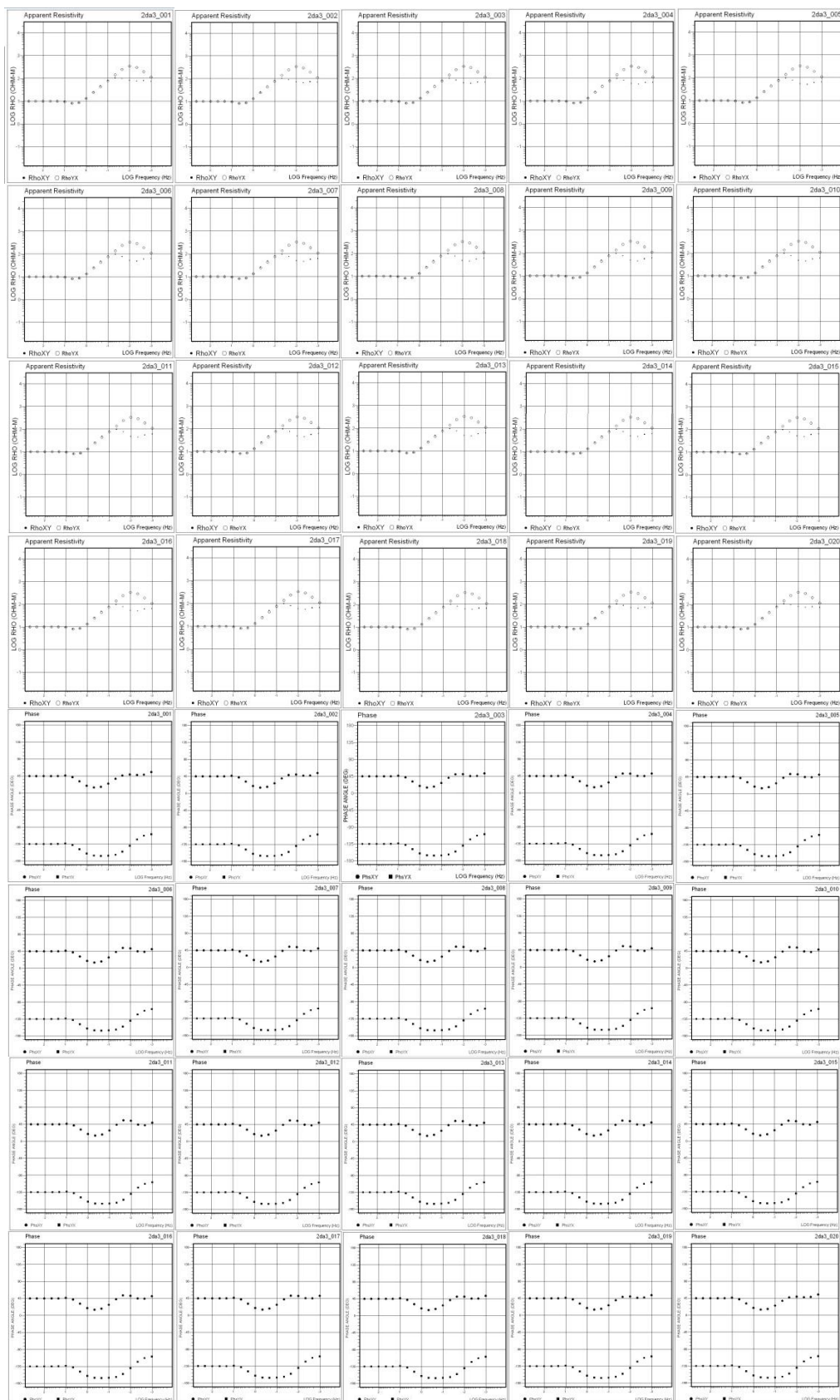


## Conclusion finale

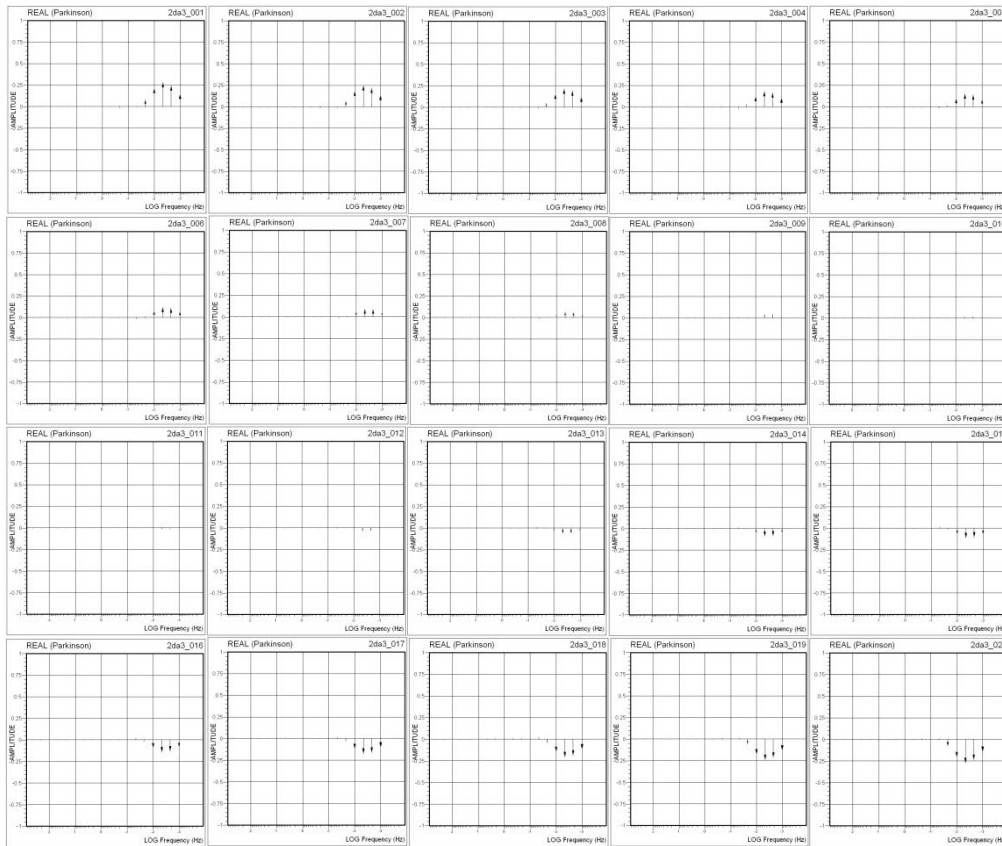
- (1) La direction de Strike d'une modèle 2-D affecté par une anisotropie dépend de la fréquence et varie également le long du profil. Si anisotropie est détectée à partir des données ou d'autre données supplémentaires informationnels, puis une direction de Strike préféré, qui coïncide avec la Strike d'anisotropie dans une certaine gamme de variation, peut être choisie
- (2) Si le rapport d'anisotropie est supérieur à cinq, l'inversion 2-D récupère le modèle originale avec une anisotropie à condition que les données soient tournées dans la direction de la Strike d'anisotropie au tout autre angle dans la plage de variation. L'anisotropie apparait comme une séquence typique de dykes conducteurs et résistives (macro-anisotropie) à partir de le quelle dont le rapport d'anisotropie intrinsèque peut être calculé. Nous proposons que cette procédure de 2-D inversion pour les modèles isotropes puisse être utilisée approche systématiquement pour récupérer l'anisotropie
- (3) En l'absence de preuve d'anisotropie, lorsqu'on préféré Strike est choisie et le modèle d'inversion 2-D contient une séquence de zones résistives conducteurs verticales, un soupçon d'une anisotropie doit être envisagé pour une enquête plus approfondie.
- (4) Les flèches d'induction sont gravement affectées par les anisotropes structures. Leur direction dépend de la Strike d'anisotropie, les contrastes de résistivité et la fréquence. Leur direction en général ne coïncide pas avec la direction perpendiculaire au 2-D Strike ou à la Strike d'anisotropie. Par conséquent, ils sont inappropriés à utiliser pour déterminer la direction de Strike en 2-D ou le Strike anisotropie.
- (5) Il n'est pas facile de faire la différence entre l'anisotrope et l'isotrope
- (6) Les phases sont toujours entre  $-180^\circ$  et  $90^\circ$  et l'amplitude entre  $\varphi_{xy}$  et  $\varphi_{yx}$  sont à  $180^\circ$ .
- (7) Les vecteurs d'induction sont nuls dans les hautes fréquences augment dans les basses et l'inexistence des flèches d'induction au milieu

# Annexe

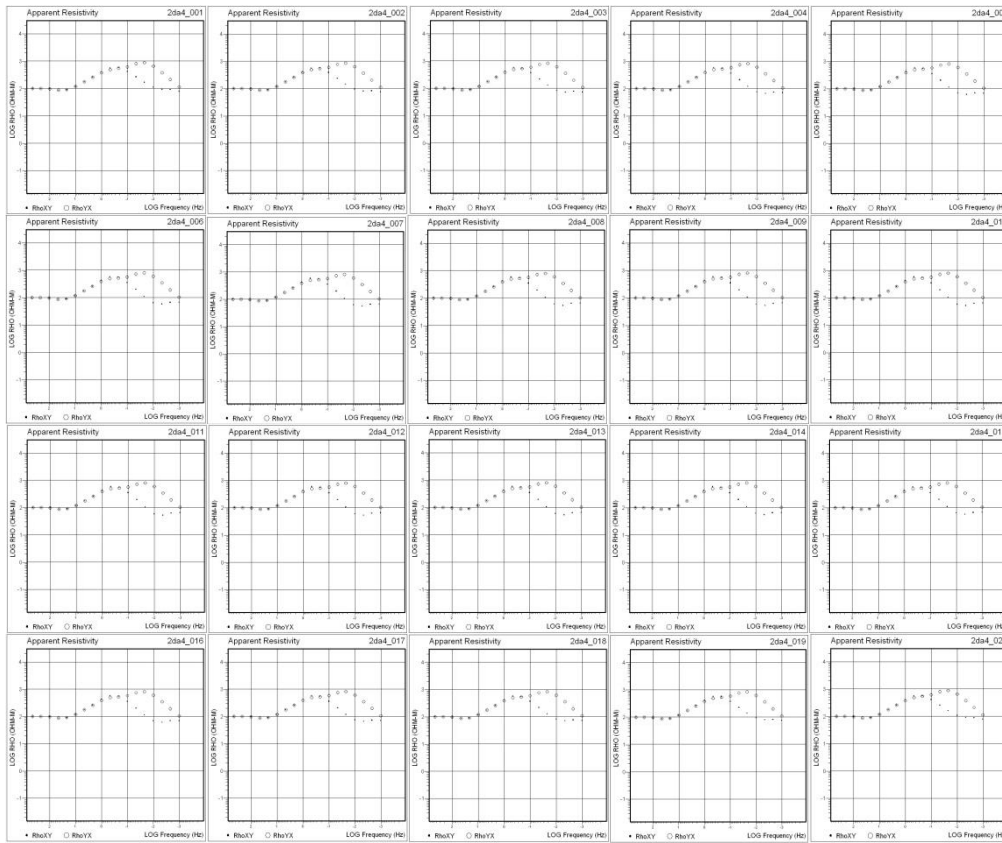
## Modèle 1(a) :

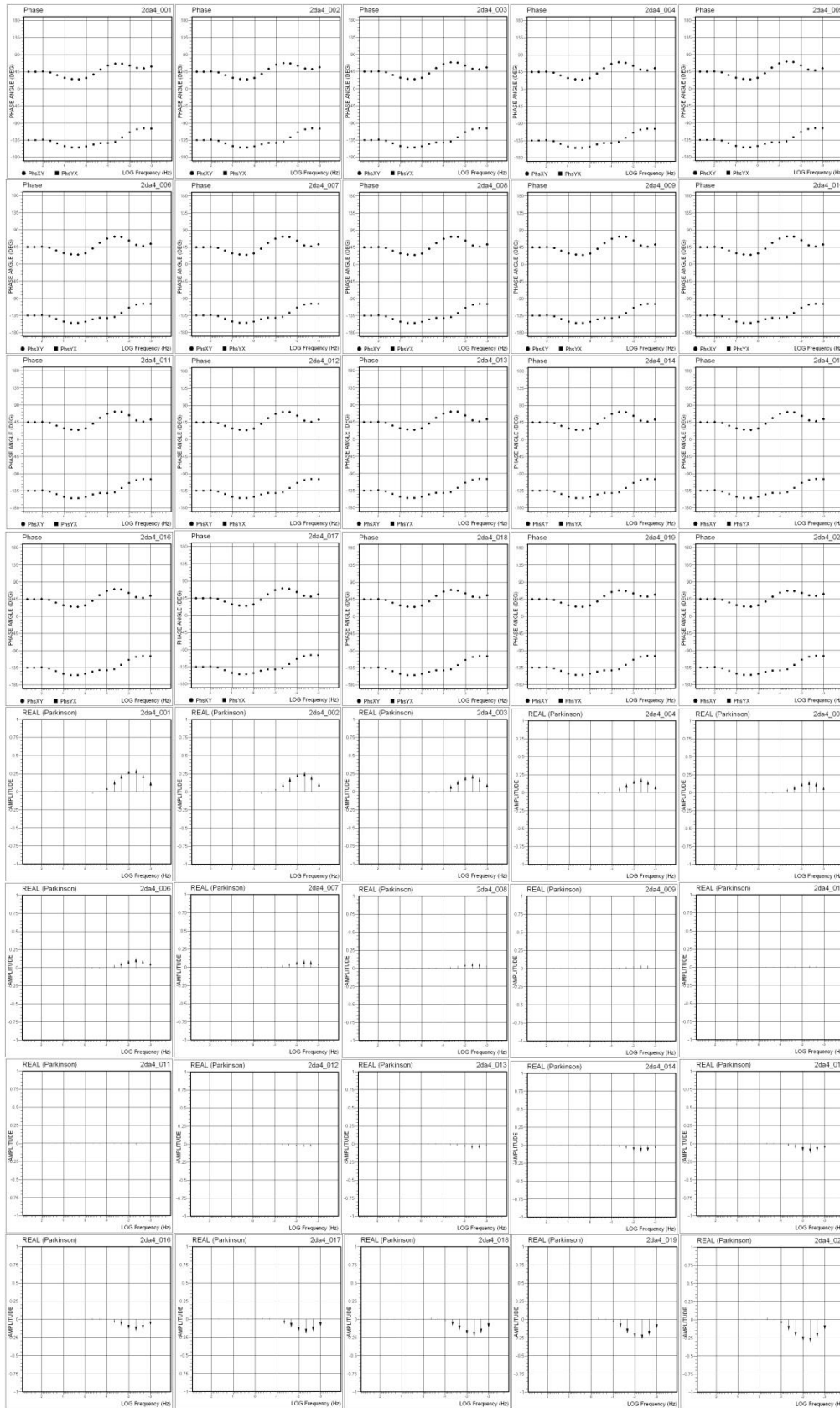




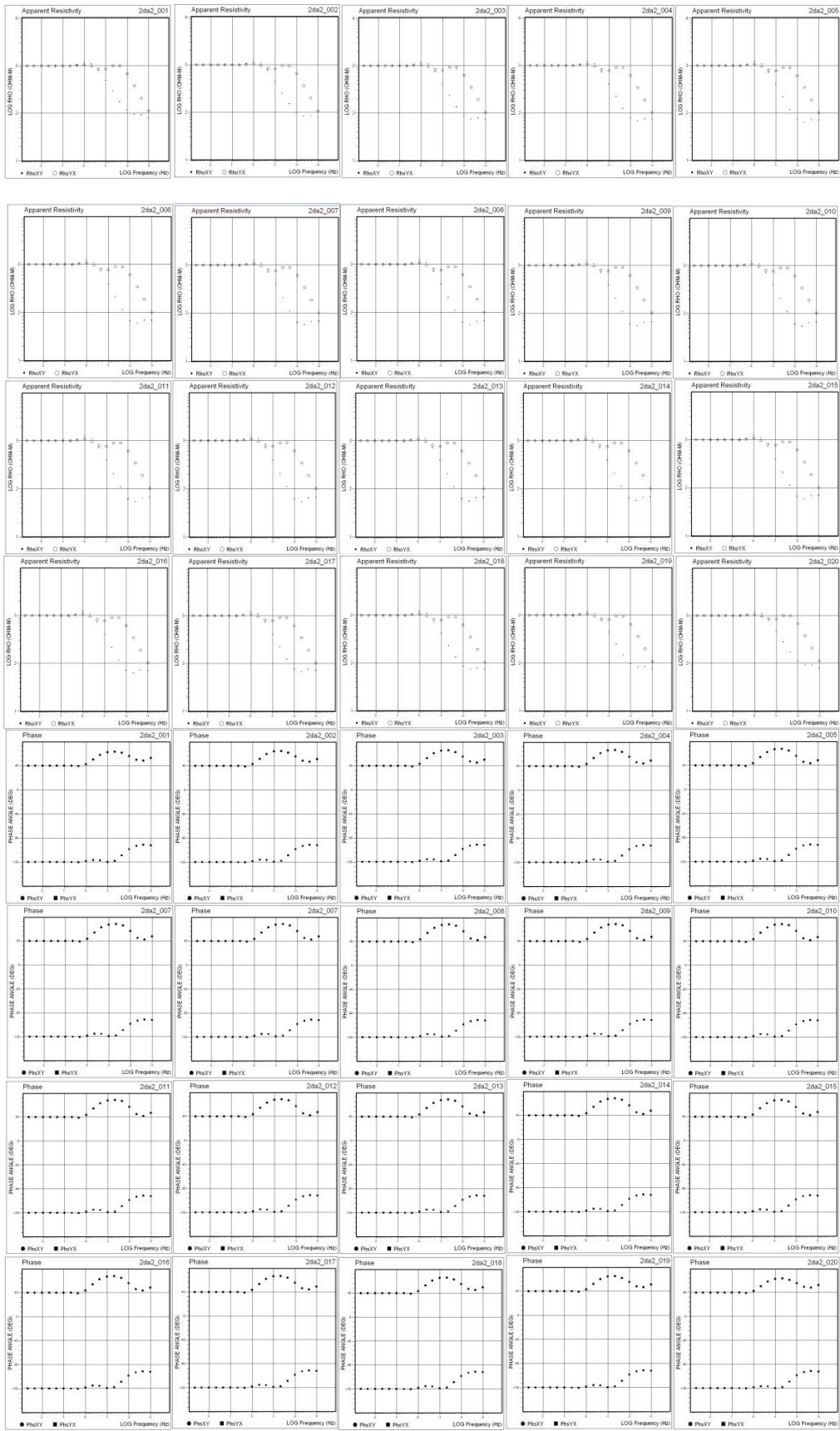


### Modèle 1(b) :



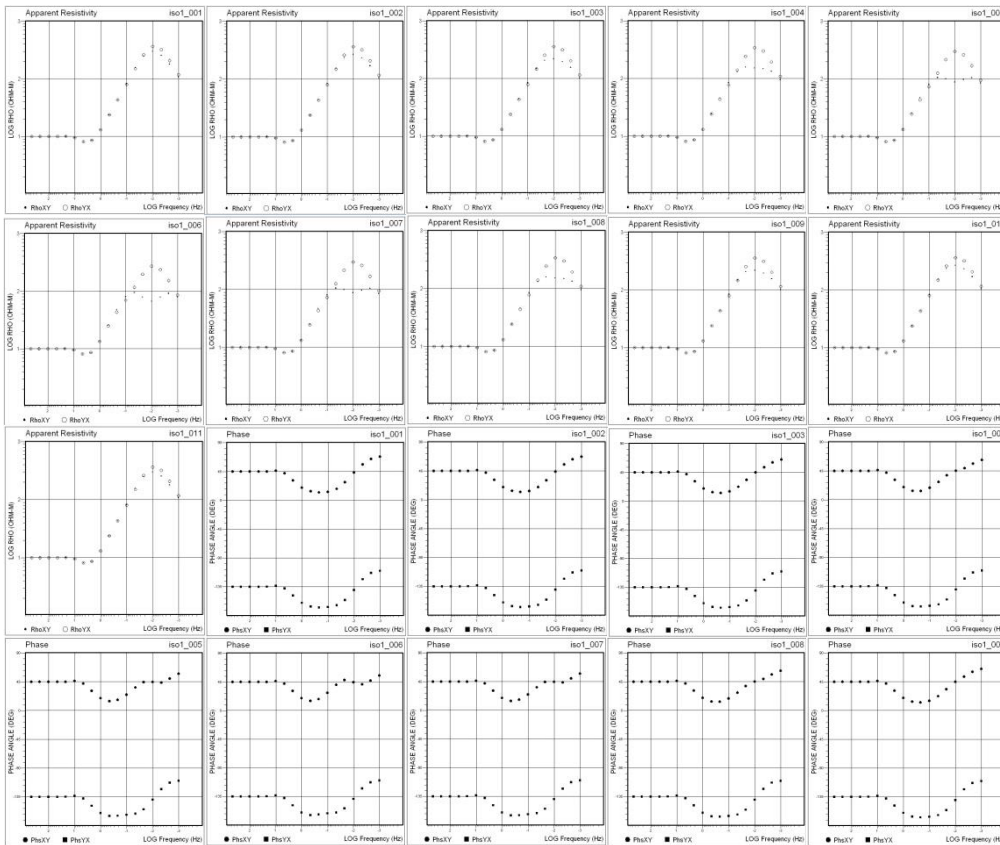


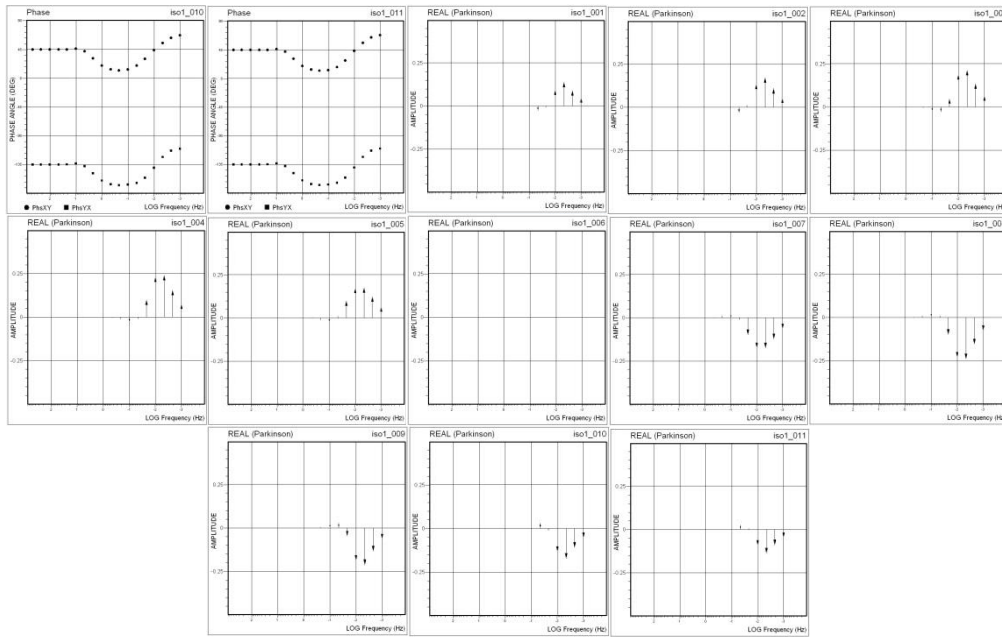
**Modèle 1(c) :**



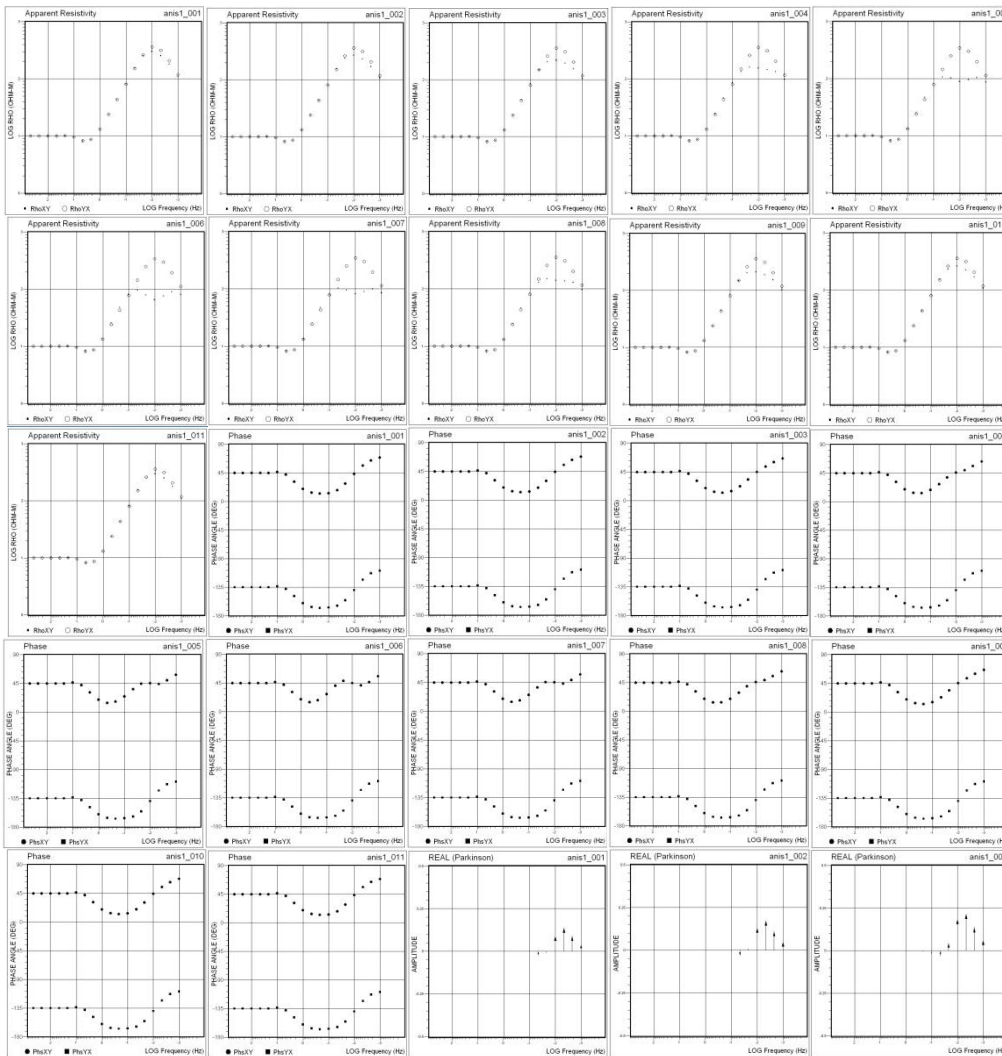


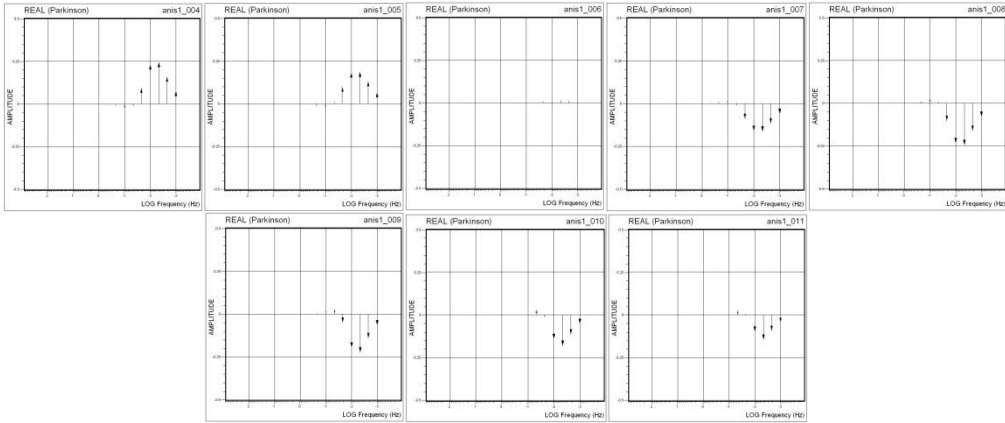
**Modèle ICC :**



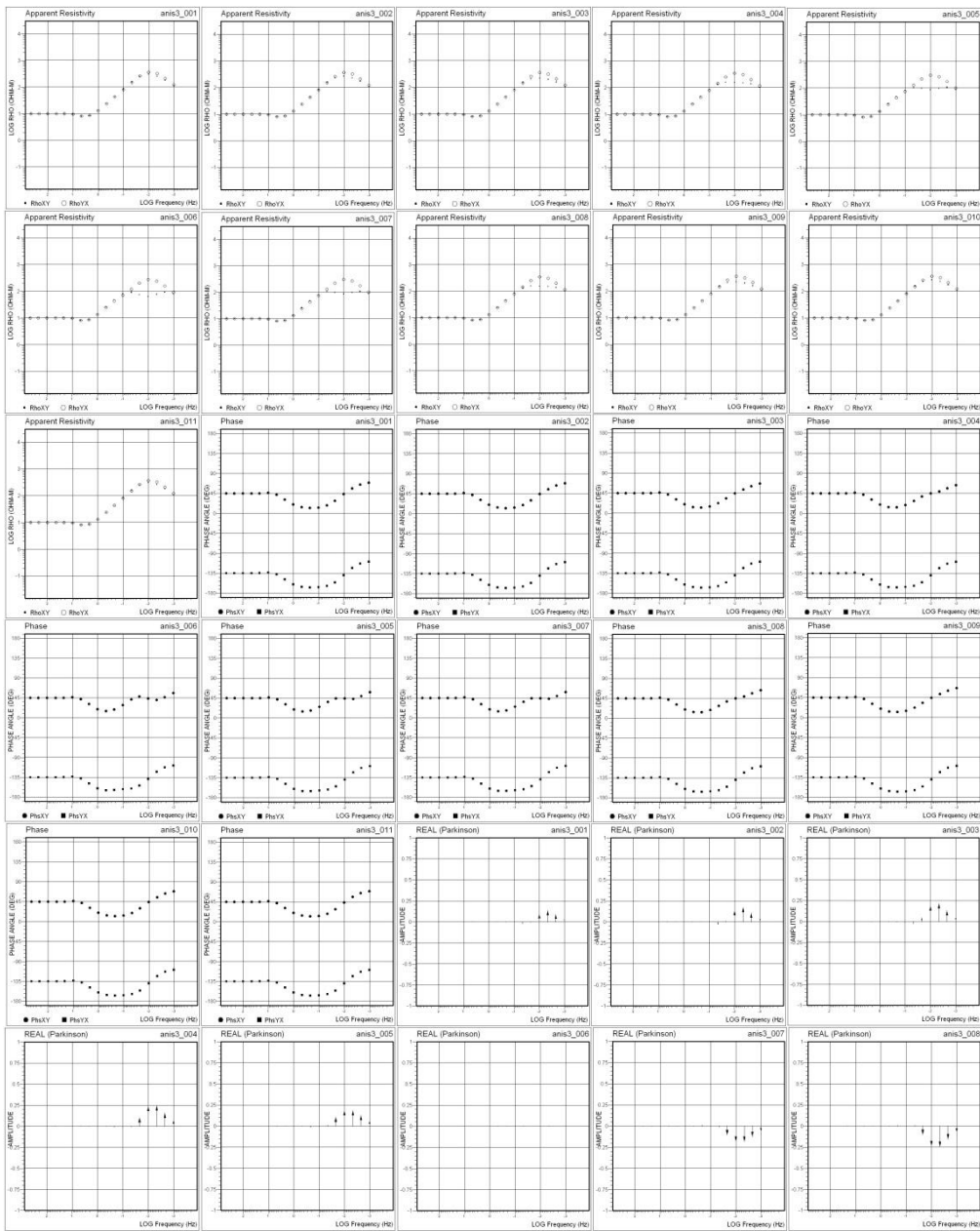


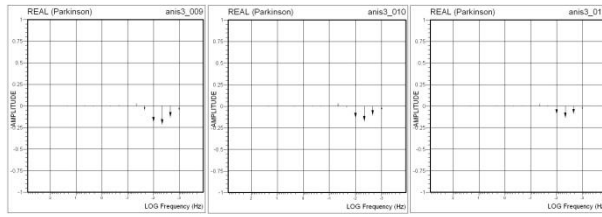
## Modèle ACC-I :



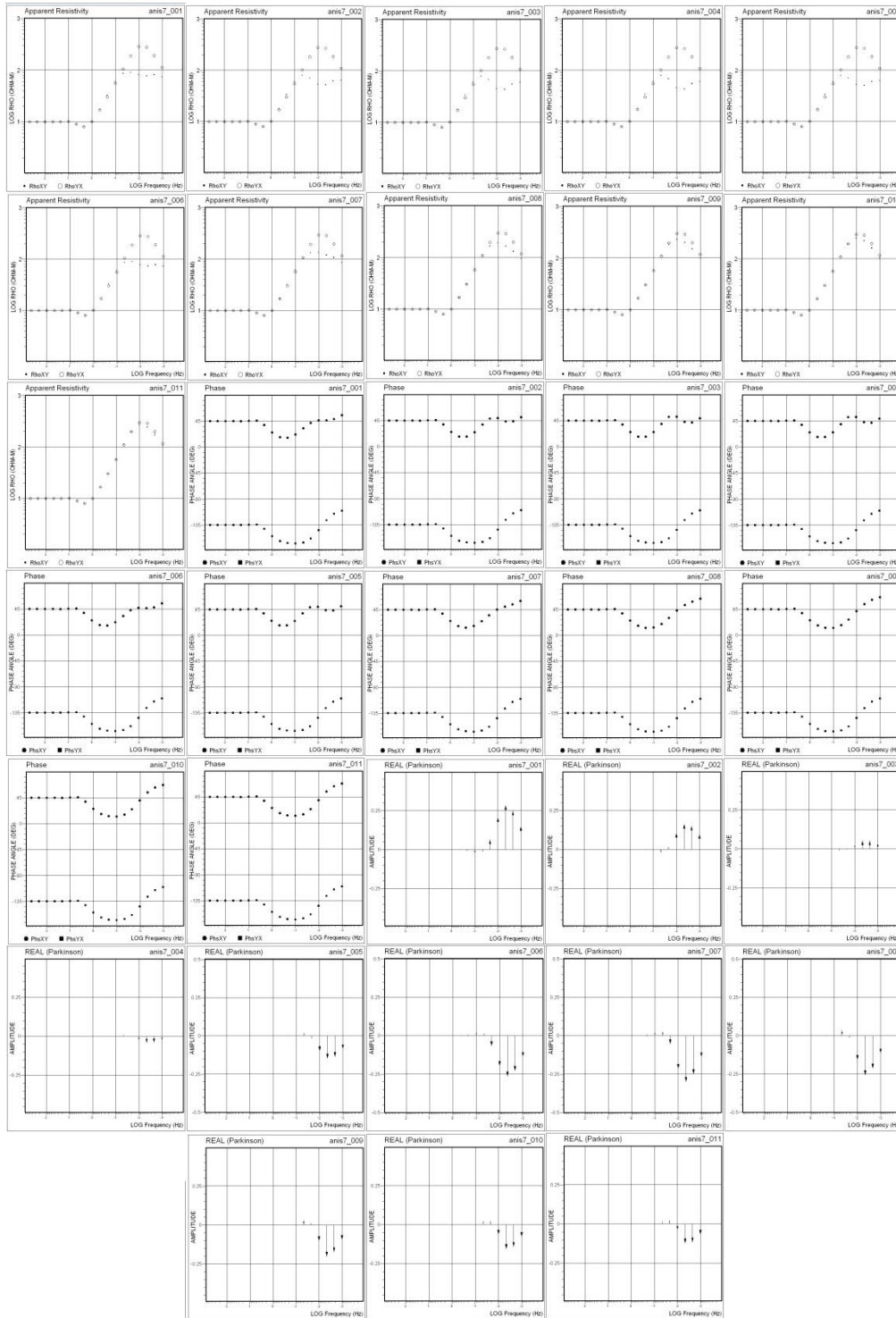


## Modèle ACC-II:





## Modèle 5 :



## Références bibliographiques

- [1] Bouzid Abderrezak, cours MT
- [2] Alan G. Jones, Distortion decomposition of the magnetotelluric impedance tensors from a one-dimensional anisotropic Earth, Dublin Institute for Advanced Studies, 5 Merrion Square, Dublin 2, Ireland. E-mail: alan@cp.dias.ie
- [3] Wiebke Heise and Jaume Pous, Effects of anisotropy on the two-dimensional inversion procedure, Departament de Geodina`mica i Geofi`sica, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona, Spain. E-mail: [wiebke@geo.ub.es](mailto:wiebke@geo.ub.es)
- [4] Mark N. BERDICHEVSKY and Pavel Yu. PUSHKAREV, Are the crustal and mantle conductive zones isotropic or anisotropic? Geological Department, Moscow State University Leninskie Gory 1, 1992 Moscow, Russia e-mail: [mark.berd@mtu-net.ru](mailto:mark.berd@mtu-net.ru)
- [5] Chou ting-kuei, mémoire sur Magnetotelluric prospecting in the matagami mining camp, département des génies civil, géologique et des mines école polytechnique de montréal, © Ting-Kuei Chou, 2010.
- [6] Federica Daghia- Lionel Gendre, Modélisation du comportement des composites : L'élasticité anisotrope, Université Paris-Saclay, Edité le 04/05/2011
- [7] MAGATIE FAR! KANI NIANG, Interpretation de données Géophysique sur la structure profonde du bassin sédimentaire Sénégalais et sur la zone de socle au Sénégal oriental, *Mention Sciences (Géologie - Géophysique)*, le 30 Juin 1995
- [8] Yassine Abdelfettah, Inversion conjointe des données magnétotelluriques et Gravimétriques: Application à l'imagerie géophysique Crustale et mantellique, HAL Id: tel-00424413, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00424413>, Submitted on 15 Oct 2009
- [9] HAJAR BELGHAZAL, Modélisation des aquifères thermaux avec des méthodes géophysiques intégrées, Scuola di Dottorato di Ingegneria Civile Architettura Ecole Doctorale D'Ingénierie Civile et Architecture, Marzo/Mars 2012.