

N° d'ordre : 41/2012-M/S.T

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET

DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

« HOUARI BOUMEDIENE »

FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE, GEOGRAPHIE

ET AMENAGEMENT DU TERRITOIRE



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER

EN : Science de la Terre

Spécialité : Géophysique

Par : BOUKAR Abdelghafour

Sujet

Analyse de la phase du tenseur d'impédance magnétotellurique
Étude comparative et application sur des données réelles. Cas du Hoggar

Soutenu publiquement le : 08 / 03 / 2012, devant le jury composé de :

M ^f M ^{ed} . HAMOUDI	Professeur à l'USTHB	Président
M ^f M ^{ed} . DJEDDI	Professeur à l'USTHB	Rapporteur
M ^{me} N.ZAOURAR	Professeur à l'USTHB	Examinatrice
M ^f A.BOUZID	Maitre de recherche au CRAAG	Invité
M ^f .A . ABTOUT	Maitre de recherche au CRAAG	Invité

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier

Monsieur **Mohammed DJEDDI**, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (Alger), mon directeur de thèse, pour avoir me proposé le thème de ce travail, m'a dirigé, et m'a suivi tout au long de ce mémoire.

Monsieur **Mohammed HAMOUDI**, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (Alger), pour son soutien morale et ses encouragements, et qui m'a fait l'honneur de présider mon jury.

Madame **Naima ZAOURAR**, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (Alger), pour son soutien morale, et qui ma fait l'honneur de juger ce travail.

Monsieur **Abderazak BOUZID**, Maitre de recherche au Centre de Recherche d'Astronomie d'Astrophysique et de Géophysique (CRAAG) de Bouzareah, pour les nombreuses discussions sur la MT, ainsi que ses critiques constructives, et qui a bien voulu accepter d'examiner ce travail.

Monsieur **Abdesselame ABTOUT**, Maitre de recherche au Centre de Recherche d'Astronomie d'Astrophysique et de Géophysique (CRAAG) de Bouzareah, d'avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens à remercier aussi tous ceux, de près ou de loin, sans que ce travail n'ait pas vu le jour.

DÉDICACE

Je Dédie Ce Modeste Travail À mes très chères parentes

À mes frères et sœurs

À toute ma famille

À tous mes amis

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
-------------------	---

CHAPITRE I : LA THEORIE DE LA METHODE MAGNETOTELLURIQUE

I-1-Définition.....	4
I-2- principe et bases théoriques.....	4
I-3-Tenseur d'impédance.....	8
I-4-Distorsion des champs électromagnétiques.....	10
I-5- Méthodes d'analyse du tenseur d'impédance.....	12
I-5-1- La méthode de Bahr (1988et 1991).....	12
I-5-2- La méthode de Groom-Bailey (1989).....	15
I-5-3- La méthode de Caldwell (2004).....	18

CHAPITRE II: LA METHODE DE CALDWELL (TENSEUR DE PHASE)

II-1-Définition.....	20
II-2- Propriétés du tenseur de phase ...	21
II-2-1-Dans le cas 1-D.....	21
II-2-2- Dans le cas 2-D.....	22
II-2-3- Dans le cas 3-D.....	24
II-3-Représentation graphique du tenseur de phase.....	25

II-3-1-Dans le cas 2-D.....	25
II-3-2-Dans le cas 3-D.....	26
II-4-Relation entre le tenseur de phase et la méthode de Bahr (1988 et 1991)	27
II-5-Relation avec la décomposition de Groom-Bailey (1989 et 1991)	29

CHAPITRE III:

LA GEOLOGIE DU HOGGAR

III -1-Aperçu géologique du Hoggar.....	31
III -2-Structure géologique du Hoggar.....	33
III -3-La région d'étude.....	35

CHAPITRE IV:

ANALYSE DU TENSEUR D'IMPEDANCE MT PAR LA METHODE DE CALDWELL (2004)

IV-1-Implémentation de la méthode du tenseur de phase sous Fortran.....	38
IV-2-Modélisation.....	41
IV-2-1-le modèle synthétique utilisé.....	41
IV-2-2-Application sur les données du modèle.....	43
IV-2-3- Analyse des résultats obtenus.....	46
IV-3-Application sur des données réelles	46
IV-3-1-les données Magnétotelluriques utilisées.....	46
IV-3-2-Application	48
IV-3-3- Analyse des résultats obtenus.....	51

CHAPITRE V :
ANALYSE DU TENSEUR D'IMPEDANCE MT PAR LES METHODES CLASSIQUES

V-1-Analyse du tenseur d'impédance par la méthode de Bahr (1988 et 1991).....	61
V-1-1-Application.....	61
V-1-2-Analyse et interprétation des résultats.....	62
V-2-Analyse du tenseur d'impédance par la méthode de Groom-Bailey (1989 et 1991).....	64
V-2-1-Application.....	64
V-2-2-Analyse et interprétation des résultats.....	64
V-3-Comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes d'analyse.....	67
CONCLUSION	73

BIBLIOGRAPHIES

Introduction

Introduction :

Parvenir à donner une image parfaite et plus proche de la réalité de la structure interne de la terre, demeure un des objectifs fondamentaux de différentes disciplines de sciences de la Terre, pour cette raison on fait appelle à des méthodes géophysiques fiables et performantes ; telle que la magnétotellurique dite aussi MT , qui occupe aujourd'hui une place très importante parmi ces méthodes, et ce là pour sa profondeur d'investigation ainsi que son pouvoir de résolution, en plus de son utilisation d'un champ électromagnétique naturel ne demandant aucune source d'énergie.

Les applications de la magnétotellurique sont vastes et varies, elles ont pris de l'ampleur dans plusieurs domaines de sciences de la Terre, couvrant la prospection pétrolière et minière, la recherche géothermique, l'étude de la structure lithologique de la croute et de manteau, et les problèmes liés à l'environnement.

Les différents progrès en termes d'équipement d'acquisition, et de soft pour traitement et interprétation des données magnétotelluriques confirment l'efficacité et la rentabilité de cette méthode.

La MT permet de cartographier le changement de la résistivité électrique ou son inverse, la conductivité électrique dans la sub-surface, à partir des mesures des champs tellurique et magnétique simultanément en un point donné à la surface du sol.

L'interprétation des données MT nécessite le calcul du tenseur d'impédance MT, dont l'analyse est nécessaire.

L'objectif de cette analyse est, tout d'abord la détermination de la géométrie ou la dimensionnalité de la structure géologique régionale .Dans le cas où la structure est 2-D, il est nécessaire de déterminer sa direction structurale (direction de l'allongement de la structure) ou ce qu'on appelle le Strike.

Pour faire cette analyse du tenseur, plusieurs méthodes sont proposées dont les plus utilisées sont la méthode de Bahr (1988 et 1991) et la méthode de Groom- Bailey (1989 et 1991).

Introduction

Plus récemment, une nouvelle approche a été proposée par Caldwell et al. (2004) dite méthode de la phase du tenseur (phase tensor) qui s'avère très intéressante.

L'objectif principale de ce travail, consiste à implémenter la méthode de Caldwell calculant le tenseur de phase ainsi que ses différents paramètres et sa comparaison avec les méthodes classiques (Bahr 1988 et 1991, Groom-Bailey 1989 et 1991).

Pour présenter les résultats de la présente étude, nous avons adopté le plan de travail suivant :

Dans le premier chapitre nous allons définir les bases théoriques nécessaires, de la méthode magnétotellurique, ainsi que les différentes méthodes d'analyse de tenseur d'impédance utilisées.

Le deuxième chapitre sera consacré à la méthode du tenseur de phase (méthode de Caldwell 2004), et dans lequel, nous présentons les différentes bases théoriques et physiques du tenseur de phase et ses différents paramètres, ainsi que leurs relation vis-à-vis la géométrie et le Strike de la structure géologique régionale.

Quant au troisième chapitre, il sera réservé d'une façon succincte à la géologie du Hoggar, et en particulier à notre région d'étude.

Dans le quatrième chapitre nous allons détailler les différentes applications, et résultats obtenus, en appliquant la méthode du tenseur de phase, sur un modèle synthétique, et sur les données réelles de la région d'étude ,suivie d'une analyse et une interprétation des résultats.

Le cinquième chapitre, sera consacré à l'application des méthodes de Bahr (1988 et 1991), et de Groom-Bailey (1989 et 1991) sur les données réelles, suivie d'une comparaison des résultats obtenus par celle de Caldwell(2004).

Nous terminons ce travail par une conclusion, ou seront commentées les différents résultats obtenus par les méthodes d'analyse classiques et celles obtenus par la méthode du tenseur de phase.

Chapitre I

I-1-Définition :

La magnétotellurique dite MT est une méthode géophysique, permettant de cartographier la résistivité électrique du sous-sol. Elle utilise des sources naturelles se trouvant dans l'ionosphère et la basse atmosphère, dont la bande de fréquence s'étend en général de **0.0001 à 10000 Hz**.

la MT a une profondeur d'investigation qui varie dans une gamme assez large, d'où son utilisation dans plusieurs domaines de sciences de la Terre tel que la prospection pétrolière et minière, l'étude de la structure lithosphérique, la Recherche géothermique et l'environnement.

I-2- principe et bases théoriques :

Le principe de cette méthode est le calcul de la résistivité électrique des roches, à partir des mesures des champs tellurique et magnétique simultanément en un point donné.

La bande de fréquence utilisée lors d'une campagne magnétotellurique s'étend entre **[0.0001, 10.000] Hz** (Ou en période de **10.000s** à **0.0001s**). Ces ondes trouvent leur origine dans et dessus des couches supérieures de l'atmosphère. Les orages électriques qui se produisent dans la basse atmosphère sont la cause principale des champs électromagnétiques de hautes fréquences comprises entre **[1,10.000] Hz**. Les champs électromagnétiques à basses fréquences comprises entre **[0.0001, 1] Hz** trouvent leur naissance dans la magnétosphère.

Comme toute autre méthode électromagnétique, la magnétotellurique fait appelle aux équations de Maxwell, qui régissent tous les phénomènes électromagnétiques. A cet effet considérant que la sub-surface étant un demi-espace infini vers le bas, et que l'onde EM générée par la source est une onde plane et uniforme dont les champs électrique (**E**) et magnétique (**H**) sont harmoniques. On suppose, que la perméabilité magnétique **μ** est constante dans le sous-sol dont la valeur est égale à celle de vide, et également que la conductivité électrique **σ** du sous-sol est très grande devant le produit **$\omega \cdot \epsilon$** , ce qui fait que les courants de déplacement sont négligés devant les courants de conduction.

Alors dans un système d'axe dont les axes **x** et **y** définissent la surface du sol, avec **x** pointant vers le Nord et **y** vers l'Est et **z** vers le bas. Les équations de Maxwell s'écrivent comme suit :

$$\nabla \times E = -i\omega\mu H \quad (\text{I-1})$$

$$\nabla \times H = \sigma E \quad (\text{I-2})$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (\text{I-3})$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (\text{I-4})$$

Avec:

E : est le champ électrique (**V/m**)

H : est le champ magnétique (**A/m**)

ω : est la fréquence angulaire du signal (**$2\pi f$**) ; où **f** est la fréquence en **Hertz**.

μ : est la perméabilité magnétique du sous-sol (**H/m**)

σ : est la conductivité électrique du sous-sol (**S/m**)

Pour découpler les deux champs (champ électrique et champ magnétique) on applique la rotationnelle sur les deux premières équations de Maxwell, ce qui nous donne les équations d' Helmholtz suivantes :

$$\nabla^2 E - i\omega\mu\sigma E = 0 \quad (\text{I-5})$$

$$\nabla^2 H - i\omega\mu\sigma H = 0 \quad (\text{I-6})$$

❖ On peut écrire les deux équations sous la forme suivante

$$\nabla^2 E + K^2 E = 0 \quad (\text{I-7})$$

$$\nabla^2 H + K^2 H = 0 \quad (\text{I-8})$$

Avec :

$$K^2 \approx -i\omega\mu\sigma \quad (\text{I-9})$$

- ❖ Il s'agit donc des champs diffusants dont l'amplitude diminue avec la distance caractéristique

$$\frac{1}{\sqrt{\mu\sigma}}$$

- ❖ Les équations d'Helmholtz admettent des solutions sous la forme suivante

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-ikz} e^{i\omega t} \quad (\text{I-10})$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{-ikz} e^{i\omega t} \quad (\text{I-11})$$

- ❖ Comme le nombre d'onde \mathbf{K} est complexe donc on peut l'exprimer par $\mathbf{K} = \alpha - i\beta$

Avec α et β sont des réels.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t} \quad (\text{I-12})$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{-\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t} \quad (\text{I-13})$$

Le terme $e^{-\beta z}$ indique que les deux champs électrique et magnétique diminuent très rapidement en fonction de la profondeur z , et la grandeur physique qui quantifie cette diminution s'appelle la profondeur de peau ou le skin depth « δ ».

À une profondeur $\delta = \frac{1}{\beta}$ l'amplitude des champs égaux à 1/e de leur valeur à la surface du sol.

- ❖ la profondeur de peau est donnée par formule suivante :

$$\delta(\text{m}) = \sqrt{\left(\frac{2}{\mu\sigma\omega}\right)} \approx 503\sqrt{\rho T} \quad (\text{I-14})$$

Avec

ρ : est la résistivité électrique du sous-sol en (Ωm)

T : est la période en (s)

- ❖ Considérant un sous-sol homogène et une onde électromagnétique, dont les champs électrique et magnétique ont les composantes suivantes :

$$\mathbf{E} = (E_x, 0, 0) \quad \text{et} \quad \mathbf{H} = (0, H_y, 0)$$

- ❖ En utilisant les équations de Maxwell, on pourra démontrer qu'à la surface du sol, les composantes horizontales de champ électrique et magnétique sont liées par la relation suivante :

$$E_x = (i\omega\mu/\sigma)^{1/2} H_y \quad (\text{I-15})$$

- ❖ cette formule montre qu'il y a une relation linéaire entre les composantes horizontales des champs et le rapport E_x/H_y , ce dernier noté « Z_{xy} » est appelé impédance magnétotellurique dont les dimensions sont celles d'une résistivité électrique.
- ❖ Donc à partir de la mesure des composantes horizontales du champ électrique et magnétique on peut calculer la conductivité électrique du sous-sol « σ » ou bien son inverse la résistivité électrique « ρ » donnée par :

$$\rho = \left(\frac{1}{\omega\mu} \right) \cdot \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (\text{I-16})$$

- ❖ Le déphasage entre le champ électrique et magnétique est donné par :

$$\varphi = \arg \left(\frac{E_x}{H_y} \right) \quad (\text{I-17})$$

Avec φ le déphasage en degré.

Pour un sous-sol stratifié horizontalement, Cagniard (1953) définit une résistivité apparente égale à la résistivité d'un demi-espace homogène électriquement équivalent au sous-sol stratifié.

$$\rho_a = (1/\mu\omega) \cdot |E_x/H_y|^2 \quad (\text{I-18})$$

En utilisant les unités suivantes :

« **mV/Km** » pour le champ électrique

« **nT** » ou le « **Gamma** » pour l'induction magnétique

La « **seconde** » pour la période T

Le « **Ωm** » pour la résistivité électrique

La formule précédente s'écrit :

$$\rho_a \approx 0.2T |E_x / H_y|^2 \quad (I-19)$$

I-3-Tenseur d'impédance :

Pour le cas d'une sub-surface isotrope, Caldwell en (1960) a généralisé la notion d'impédance scalaire de Cagniard à un tenseur d'impédance, qui permet d'établir une relation linéaire entre les composantes horizontales des champs électrique et magnétique.

$$E(\omega) = Z(\omega).H(\omega) \quad (I-20)$$

ω : est la fréquence angulaire du signal (**2πf**) ; où **f** est la fréquence de l'onde électromagnétique en **Hertz**.

Ou bien :

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (I-21)$$

En fonction de la dimensionnalité de la structure géo électrique le tenseur d'impédance peut prendre trois formes.

Pour une structure 1-D

Dans ce cas la résistivité électrique du sous-sol varie seulement en fonction de la profondeur. Et le tenseur d'impédance prend la forme suivante :

$$\mathbf{Z}(\omega) = \begin{bmatrix} 0 & Z_0(\omega) \\ -Z_0(\omega) & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{I-22})$$

Avec :

$Z_0(\omega)$: L'impédance complexe.

Pour une structure 2-D

Dans ce cas la résistivité électrique du sous-sol varie verticalement et suivant l'une des directions latérales, et le tenseur d'impédance a la forme suivante :

$$\mathbf{Z}(\omega) = \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} 0 & Z_{\parallel}(\omega) \\ -Z_{\perp}(\omega) & 0 \end{bmatrix} \mathbf{R}^T(\theta) \quad (\text{I-23})$$

Avec :

$\mathbf{R}(\theta)$: la matrice de rotation, donnée par :

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (\text{I-24})$$

$\mathbf{R}^T(\theta)$: la matrice transposée de la matrice de rotation.

Z_{\parallel} : l'impédance associée au mode **TE**, mode dans lequel le champ électrique est parallèle à la direction d'allongement de la structure géo-électrique.

Z_{\perp} : L'impédance associée au mode **TM**, mode dans lequel le champ électrique est perpendiculaire à la direction d'allongement de la structure géo-électrique.

Θ : l'angle du Strike (ou direction d'allongement de la structure)

En fait, dans le cas d'une structure 2-D quelle que soit la direction des axes de mesure, il est possible de retrouver par rotation mathématique la direction structurale, dont on associe

Les deux résistivités apparentes :

$$\rho_{\parallel} = (1/\mu\omega)T \cdot |Z_{\parallel}|^2 \quad \Phi = \arg(Z_{\parallel}) \quad (\text{I-25})$$

$$\rho_{\perp} = (1/\mu\omega)T \cdot |Z_{\perp}|^2 \quad \Phi = \arg(Z_{\perp}) \quad (\text{I-26})$$

Avec :

T : est la période en (s)

Pour une structure 3-D

Dans ce cas la résistivité électrique du sous-sol varie suivant les trois directions. Et le tenseur d'impédance est asymétrique, et dont la forme est la suivante :

$$Z(\omega) = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \quad (\text{I-27})$$

I-4-Distorsion des champs électromagnétiques :

Les champs électromagnétiques subissent souvent une certaine distorsion. D'après Berdichevsky et Dmitriev (1976), cette distorsion en fonction de leur origine peut être subdivisée en deux types.

La distorsion galvanique ou l'effet galvanique

Cet effet est dû essentiellement à l'accumulation des charges électriques, au niveau de la surface de séparation de deux milieux de conductivités électriques différentes sous l'effet du champ électrique régional \mathbf{E}_r . Ces charges produiront un champ électrique secondaire \mathbf{E}_s qui vient s'ajouter au champ régional.

La distorsion inductive ou l'effet inductif

L'origine de cet effet est les courants induits par le champ magnétique régional \mathbf{H}_r , et qui produiront par la suite un champ magnétique secondaire \mathbf{H}_s et qui vient se superposer au champ régional. L'effet inductif est infiniment petit pour toute hétérogénéité à faible dimensions, ou bien pour les basses fréquences.

D'après Groom & Bahr 1992 ; Chave & Smith 1994, l'effet inductif est négligeable devant l'effet galvanique ce qui donne au tenseur d'impédance mesuré la forme suivante :

$$\mathbf{Z}_m(\omega) = \mathbf{R}(\theta) \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{Z}(\omega) \cdot \mathbf{R}^T(\theta) \quad (I-28)$$

Avec :

$\mathbf{Z}_m(\omega)$: le tenseur d'impédance mesuré

$\mathbf{Z}(\omega)$: le tenseur d'impédance de la structure régional

\mathbf{C} : matrice réelle indépendante de la fréquence de dimension (2x2), appelée également matrice de distorsion.

I-5- Méthodes d'analyse du tenseur d'impédance :

Pour analyser le tenseur d'impédance MT, plusieurs méthodes sont proposées dont les plus utilisées sont la méthode de Bahr (1988 et 1991) basée sur l'analyse des invariants rotationnels (le skew de Swift(K), le skew régional(η), la différence de phase(μ) et le paramètre de bi-dimensionnalité Σ), la méthode de Groom- Bailey (1989 et 1991) basée sur l'expression :

$$Z_m(\omega) = R(\theta) \cdot C \cdot Z(\omega) \cdot R^T(\theta) \quad (I-29)$$

Plus récemment, une nouvelle approche a été proposée par Caldwell et al. (2004) dite méthode de la phase du tenseur (phase tensor) qui s'avère très intéressante. Dans ce qui suit nous allons définir chacune de ces méthodes.

I-5-1-La méthode de Bahr (1988 et 1991) :

Cette méthode considère le cas général c.-à-d. une structure locale 3-D Superposée à une structure régionale 1-D ou 2-D à laquelle on s'intéresse.

L'objectif de cette méthode est, la détermination de la géométrie ou la dimensionnalité de la structure régionale, dans le cas où celle-ci est 2-D, il est primordial de donner son Strike ou sa direction structurale.

Cette méthode de Bahr est basée sur l'analyse des invariants rotationnels, indicateurs de dimensionnalité (Tableau I-1) qui sont :

a)-Skew de Swift K (1967) Cet invariant susceptible d'être affecté par la distorsion due aux hétérogénéités superficielles car celui-ci est estimé à partir des modules des éléments du tenseur d'impédance. Skew de Swift est donné par la formule suivante :

$$K = |S_1| / |D_2| \quad (I-30)$$

Avec:

$$S_1 = Z_{xx} + Z_{yy} \quad (I-31)$$

$$D_2 = Z_{xy} - Z_{yx} \quad (I-32)$$

K est nul pour toute structure 1-D ou 2-D ne contenant pas d'hétérogénéités superficielles.

En (1988,1991) Bahr introduit trois autres invariants rotationnels, indicateurs de dimensionnalité basées sur les phases du tenseur, et donc ne contenant que la réponse de la structure régionale. Pour définir ces invariants Bahr utilise les notations suivantes :

$$[C_1, C_2] = \text{Im} (C_2 C_1^*) = \text{Re} C_1 \cdot \text{Im} C_2 - \text{Re} C_2 \cdot \text{Im} C_1 \quad (I-33)$$

$$\{C_1, C_2\} = \text{Re} (C_2 C_1^*) = \text{Re} C_1 \cdot \text{Re} C_2 + \text{Im} C_2 \cdot \text{Im} C_1 \quad (I-34)$$

Avec (*) désigne le complexe conjugué.

Alors en utilisant ces notations, Bahr définit :

b)-Skew régional « phase sensitive » η

Cet indicateur de dimensionnalité est donné par :

$$\eta = \frac{|[D_1, S_2] - [S_1, D_2]|^{1/2}}{|D_2|} \quad (I-35)$$

Avec:

$$S_2 = Z_{xy} + Z_{yx} \quad (I-36)$$

$$D_1 = Z_{xx} - Z_{yy} \quad (I-37)$$

Le Skew régional est nul pour toute structure régionale uni ou bidimensionnelle.

c)-La différence de phase μ

Cet invariant mesure la différence de phase dans le tenseur d'impédance, il est donné par :

$$\mu = (| [D_1, S_2] | + | [S_1, D_2] |)^{1/2} / | D_2 | \quad (I-38)$$

Dans le cas où $\mu=0$, les quatre phases des éléments du tenseur d'impédance sont identiques ce qui correspond à un terrain stratifié.

d)-Paramètre de bi-dimensionnalité Σ

Comme son nom l'indique cet indicateur rotationnel, nous informe s'il s'agit d'une structure 2-D ou pas, il est donné par :

$$\Sigma = (D_1^2 + S_2^2) / D_2^2 \quad (I-39)$$

Alors ce paramètre est non nul pour une structure 2-D qui ne comportant pas de distorsion, ou toute structure affectée par la distorsion.

Paramètres	Sans distorsion		Avec distorsion	
	1-D	2-D	1-D	2-D
η	0	0	0	0
K	0	0	$\neq 0$	$\neq 0$
μ	0	0	0	$\neq 0$
Σ	0	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$

Tableau I-1 synthèse des valeurs des quatre paramètres de dimensionnalité dans le cas théorique (sans bruit)

e) Angle du Strike

Si la structure régionale est 2-D, alors Bahr en (1991) a donné également une formule pour le calcul de l'angle du Strike.

$$\text{Tg}(2 \alpha) = ([S_1, S_2] - [D_1, D_2]) / ([S_1, D_1] + [S_2, D_2]) \quad (\text{I-40})$$

Avec :

α : est l'angle du Strike

Les invariants de Bahr permettent, de faire une analyse du tenseur d'impédance mesuré pour déterminer :

- ❖ La dimensionnalité de la structure régionale.
- ❖ L'existence ou non d'une structure locale qui induirait une distorsion de la réponse MT.

I-5- 2-La méthode de Groom-Bailey (1989) :

Quand à la méthode Groom – Bailey , on prend le cas d'une structure régionale 2-D superposée à une structure locale 3-D , considérée comme du bruit géologique générant d' une distorsion des courants telluriques , et qui affecte le tenseur d'impédance mesuré indépendamment de la fréquence .Donc le modèle adopté est donné par :

$$\mathbf{Z}_m(\omega) = \mathbf{R}(\theta) \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{Z}_{2-D}(\omega) \cdot \mathbf{R}^T(\theta) \quad (\text{I-41})$$

Donc L'objectif de cette méthode est :

- ❖ Extraire le tenseur régional \mathbf{Z}_{2-D} .
- ❖ Déterminer l'angle de la Strike θ .
- ❖ Caractériser le tenseur réel C de distorsion.

Pour caractériser le tenseur de distorsion \mathbf{C} , Groom & Bailey décomposent celui-ci en trois tenseurs.

$$\mathbf{C} = \mathbf{g} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{A} \quad (\text{I-42})$$

$$Z_m(\omega) = g. R(\theta). T. S. A. Z_{2-D}(\omega). R^T(\theta) \quad (I-43)$$

Avec :

g: est un scalaire qui constitue un facteur d'échelle, appelé le gain du site.

T: est appelé le « **twist** », il est donné par :

$$T = \frac{1}{\sqrt{1+t^2}} \begin{pmatrix} 1 & -t \\ t & 1 \end{pmatrix} \quad (I-44)$$

Le twist produit une rotation du vecteur champ électrique dans le sens rétrograde avec un angle Φ égale à :

$$\Phi = \text{arc tg}(t) \quad (I-45)$$

S: appelé « **shear** » défini par :

$$S = \frac{1}{\sqrt{1+e^2}} \begin{pmatrix} 1 & e \\ e & 1 \end{pmatrix} \quad (I-46)$$

Le shear provoque une anisotropie selon un système d'axe oblique par rapport à celui de la structure géologique régionale, et on peut le représenter par l'angle du shear noté Φ_e qui est défini par :

$$\Phi_e = \text{arc tg}(e) \quad (I-47)$$

A : le « **splitting** » ou tenseur d'anisotropie .ce tenseur provoque un étirement des deux composantes du champ, se traduisant par une anisotropie .Il est donné par :

$$A = \frac{1}{\sqrt{1+s^2}} \begin{pmatrix} 1+s & 0 \\ 0 & 1-s \end{pmatrix} \quad (I-48)$$

Pour déterminer les paramètres de cette décomposition, les différents auteurs utilisent la méthode des moindres carrés. En effet, il s'agit donc de déterminer Pour chaque fréquence ω paramètres qui sont :

- ❖ 4 paramètres pour caractériser le tenseur de la distorsion.
- ❖ 4 paramètres pour le tenseur Z_{2-D}
- ❖ L'angle du Strike régionale (θ).

Comme il y a seulement 8 observations (les 4 éléments complexes de Z_m), alors un problème de sous détermination se pose, pour réduire le nombre d'inconnus, et en prenant en considération les caractéristiques de l'effet galvanique, Groom et Bailey (1989) font absorber le produit ($g.A$) dans Z_{2-D}

Le facteur multiplicatif ($g.A$) « static shift » est réel et indépendant de la fréquence, et il ne peut pas être déterminé à partir des données Magnétotelluriques.

Donc le tenseur d'impédance mesuré devient :

$$Z_m(\omega) = R(\theta) \cdot T \cdot S \cdot Z'_{2-D}(\omega) \cdot R^T(\theta) \quad (I-49)$$

Il s'agit donc de calculer pour chacune des fréquences ω 07 paramètres qui sont :

- ❖ Les impédances liées aux deux modes c.-à-d. $X_{\perp}, Y_{\perp}, X_{\parallel}, Y_{\parallel}$
- ❖ Le shear « e »
- ❖ Le twist « t »
- ❖ L'angle du Strike « θ »

I-5-3-La méthode de Caldwell (2004) :

En 2004 Caldwell a mis en place une nouvelle méthode d'analyse du tenseur d'impédance, basée essentiellement sur l'analyse de la phase du tenseur d'impédance. Cette approche s'avère très intéressante, de fait que la phase du tenseur est insensible à la distorsion galvanique.

Aussi, elle peut être utilisée dans le cas d'une structure locale 3-D superposée à une structure régionale 3-D. comme cette méthode est l'essentiel de notre travail, alors nous allons la détailler dans le chapitre suivant.

Chapitre II

-Méthode de Caldwell (2004) :

-Introduction :

Toutes les méthodes classiques d'analyse du tenseur d'impédance magnétotellurique (Méthode de Chakridi et al (1992), et Méthode de Groom& Bailey(1989) sont basées sur l'étude du comportement des éléments du tenseur d'impédance, or ces éléments sont affectés par la distorsion galvanique .En revanche le seul paramètre qui reste intacte à cette distorsion est la phase.

En (2004) Caldwell défini les bases théoriques de cette méthode, et qui sont présentées dans ce qui suit.

II-1 –Définition :

La phase d'un nombre complexe est définie par le rapport entre sa partie imaginaire et sa partie réelle .cette relation peut être généralisée pour une matrice complexe (Tenseur), donc le tenseur de phase est défini par la relation.

$$\Phi = X^{-1} Y \tag{II-1}$$

Avec :

X^{-1} : est l'inverse de X (X : Matrice de la partie réelle du tenseur d'impédance)

Y : Matrice de la partie imaginaire du tenseur d'impédance.

Dans le système des coordonnées cartésienne (x_1, x_2) , le tenseur de phase Φ peut s'écrire comme suit :

$$\begin{pmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} \end{pmatrix} = \frac{1}{\det(X)} \begin{pmatrix} X_{22}Y_{11} - X_{12}Y_{21} & X_{22}Y_{12} - X_{12}Y_{22} \\ X_{11}Y_{21} - X_{21}Y_{11} & X_{11}Y_{22} - X_{21}Y_{12} \end{pmatrix} \tag{II-2}$$

Avec :

$\det(X)$ est le déterminant de X, qu'est égale à :

$$\det(\mathbf{X}) = X_{11} X_{22} - X_{21} X_{12}$$

En générale le tenseur Φ n'est pas symétrique, et ses composantes ne dépendent pas de l'argument du tenseur d'impédance Z_{kl} . c.-à-d. que $\Phi_{ij} \neq f(\arg[Z_{kl}])$.

II-2- Propriétés du tenseur de phase :

II-2- 1-Dans le cas 1-D :

Si la structure régionale est isotrope et 1-D (c.-à-d que la conductivité électrique varie seulement en fonction de la profondeur), alors dans le système des coordonnées cartésienne (x_1, x_2) Le tenseur de phase est donné par :

$$\begin{aligned} \Phi_{1D} &= \begin{bmatrix} Y_{1D}/X_{1D} & 0 \\ 0 & Y_{1D}/X_{1D} \end{bmatrix} \\ &= (Y_{1D}/X_{1D}) \mathbf{I} = \tan(\Phi) \mathbf{I} \end{aligned} \quad (\text{II-3})$$

Avec :

\mathbf{I} : la matrice identité.

X_{1D} : partie réelle du tenseur d'impédance 1-D.

Y_{1D} : partie imaginaire du tenseur d'impédance 1-D.

Dans ce cas le tenseur est caractérisé par une seule quantité scalaire qu'est égale à la tangente de la phase de la MT conventionnelle pour une structure 1-D, et dans ce cas le tenseur ne varie pas avec la rotation. C.-à-d. que le champ électrique et le champ magnétique sont perpendiculaires l'un à l'autre et sont indépendants de la direction de polarisation.

II-2- 2-Dans le cas 2-D :

Pour une structure régionale 2-D le tenseur de phase est en fonction de l'impédance associé au mode TE (Z_{\parallel}) et celle associé au mode TM (Z_{\perp}), qu'on peut l'écrire sous la forme suivante :

$$\Phi = \begin{pmatrix} Y_{\perp}/X_{\perp} & 0 \\ 0 & Y_{\parallel}/X_{\parallel} \end{pmatrix} \quad \text{ou} \quad \Phi = \begin{pmatrix} Y_{\parallel}/X_{\parallel} & 0 \\ 0 & Y_{\perp}/X_{\perp} \end{pmatrix} \quad (\text{II-4})$$

Dans ce cas Le tenseur est caractérisé par deux valeurs principales qui sont : la phase associée au mode TE et celle associée au mode TM.

Dans le cas général, le tenseur est caractérisé par trois invariants rotationnelles qui sont :

- ❖ La trace : la somme des éléments diagonaux.
- ❖ Le skew : la différence des éléments anti diagonaux.
- ❖ Le déterminant

Dans ce qui suit nous adoptons les notations suivantes pour les invariants du tenseur de phase:

$$\Phi = \begin{pmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} \end{pmatrix} \quad (\text{II-5})$$

La trace : $\text{tr}(\Phi) = \Phi_{11} + \Phi_{22}$ (II-6)

Le skew : $\text{sk}(\Phi) = \Phi_{12} - \Phi_{21}$ (II-7)

Le déterminant : $\det(\Phi) = \Phi_{11} \Phi_{22} - \Phi_{12} \Phi_{21}$ (II-8)

En utilisant les précédents invariants on peut écrire :

$$\Phi_1 = \text{tr}(\Phi)/2 \quad (\text{II-9})$$

$$\Phi_2 = [\det(\Phi)]^{1/2} \quad (\text{II-10})$$

$$\Phi_3 = \text{sk}(\Phi)/2 \quad (\text{II-11})$$

Comme toute combinaison d'invariants est un invariant, alors plusieurs façons d'exprimer les invariants sont possible, donc pour exprimer le tenseur de phase dans le cas 2-D nous allons utiliser l'une des représentations utilisées par Bibby(1986) basée sur les invariants données par :

$$\Phi = \mathbf{R}^T(\alpha - \beta) \begin{bmatrix} \Phi_{\max} & 0 \\ 0 & \Phi_{\min} \end{bmatrix} \mathbf{R}(\alpha + \beta) \quad (\text{II-12})$$

Avec :

α : est un variant rotationnelle, angle exprimant la dépendance du tenseur de phase avec le système d'axe de mesure, α est défini par :

$$\alpha = 1/2 \tan^{-1} (\Phi_{12} + \Phi_{21} / \Phi_{11} - \Phi_{22}) \quad (\text{II-13})$$

β : Appelé angle de skew qu'indique l'asymétrie du tenseur, exprimé par :

$$\beta = 1/2 \tan^{-1} (\Phi_3 / \Phi_1) \quad (\text{II-14})$$

Φ_{\max} : La valeur principale max, définie par :

$$\Phi_{\max} = (\Phi_1^2 + \Phi_3^2)^{1/2} + (\Phi_1^2 + \Phi_3^2 - \Phi_2^2)^{1/2} \quad (\text{II-15})$$

Φ_{\min} : La valeur principale min, donnée par :

$$\Phi_{\min} = (\Phi_1^2 + \Phi_3^2)^{1/2} - (\Phi_1^2 + \Phi_3^2 - \Phi_2^2)^{1/2} \quad (\text{II-16})$$

$\mathbf{R}(\alpha+\beta)$: est la matrice de rotation donnée par :

$$\mathbf{R}(\alpha + \beta) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha + \beta) & \sin(\alpha + \beta) \\ -\sin(\alpha + \beta) & \cos(\alpha + \beta) \end{bmatrix} \quad (\text{II-17})$$

Pour une structure 2-D on a toujours $\beta=0$, et donc le tenseur de phase est symétrique, et possède deux valeurs principales qui sont Φ_{\min} et Φ_{\max} .

Alors nous pouvons écrire :

$$\Phi = \mathbf{R}^T(\alpha) \begin{bmatrix} \Phi_{\max} & 0 \\ 0 & \Phi_{\min} \end{bmatrix} \mathbf{R}(\alpha) \quad (\text{II-18})$$

Avec (α) représente l'angle de la direction structurale (le Strike).

II-2- 3-Dans le cas 3-D :

Pour une structure régionale 3-D, Le tenseur de phase n'est pas symétrique, et possède trois valeurs principales, et dans ce cas le tenseur de phase s'écrit de la façon suivante :

$$\Phi = \mathbf{R}^T(\alpha-\beta) \begin{bmatrix} \Phi_{\max} & 0 \\ 0 & \Phi_{\min} \end{bmatrix} \mathbf{R}(\alpha+\beta) \quad (\text{II-19})$$

Paramètres du tenseur de phase	Structure 1-D	Structure 2-D	Structure 3-D
α	-----	L'angle du Strike	-----
β	0	0	Très grand
Φ_{\max}	-----	La direction du Strike	La direction préférée par le courant d'induction

Tableau II-1 propriétés des paramètres du tenseur de phase en fonction de la dimensionnalité de la structure régionale

II-3- Représentation graphique du tenseur de phase :

II-3-1- Dans le cas 2-D

Dans ce cas le tenseur de phase peut être représenté graphiquement par une ellipse dont le grand et le petit axe, sont respectivement ϕ_{\max} et ϕ_{\min} , et son inclinaison par rapport au système d'axe est donnée par l'angle α (**fig. II-1**), ce qui signifie que dans le cas d'une structure bidimensionnelle la direction structurale est donnée par le grand axe de l'ellipse, qui est proportionnel à la valeur principale max ϕ_{\max} du tenseur de phase, et l'angle du Strike est donné par l'angle α , c-à-d l'angle d'inclinaison entre le grand axe de l'ellipse et le système d'axe.

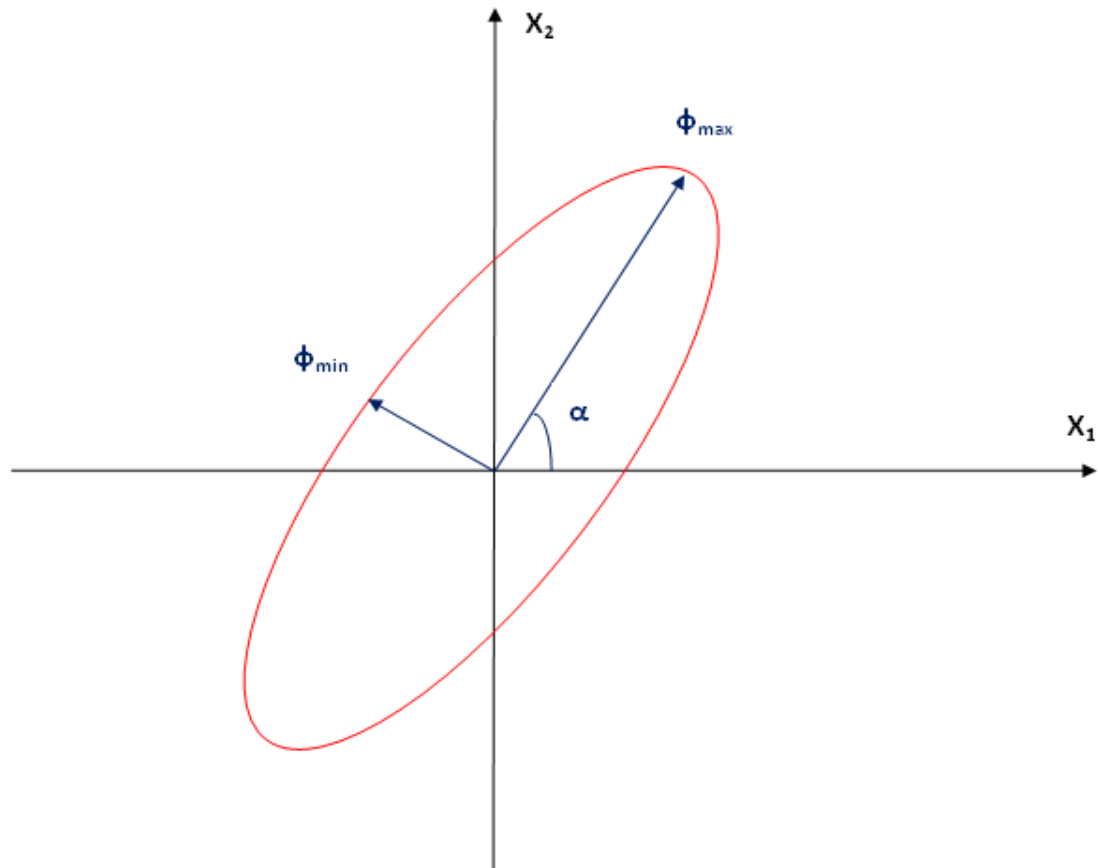


Figure II-1 : Représentation graphique du tenseur de phase dans le cas 2-D (Caldwell 2004)

II-3-2-Dans le cas 3-D

La représentation graphique du tenseur de phase dans le cas d'une structure tridimensionnelle, est donnée par une ellipse dont le grand et le petit axe sont représentés par les deux valeurs principales du tenseur c.-à-d. Φ_{\max} pour le grand axe et Φ_{\min} pour le petit axe et dont l'inclinaison par rapport au système d'axe est donnée par l'angle $(\alpha-\beta)$.(Figure. II-2).

l'étude de propriétés du tenseur de phase dans le cas 3-D par caldwell (2004) , montre que la direction principale de l'ellipse Φ_{\max} coïncide parfaitement avec la direction préférée par le courant d'induction. C.-à-d. que cette direction nous informe sur l'existence

des structures conductrices. Autrement dit la cartographie de l'ellipse de tenseur de phase permet de visualiser les variations latérales dans la structure conductrice régionale 3-D.

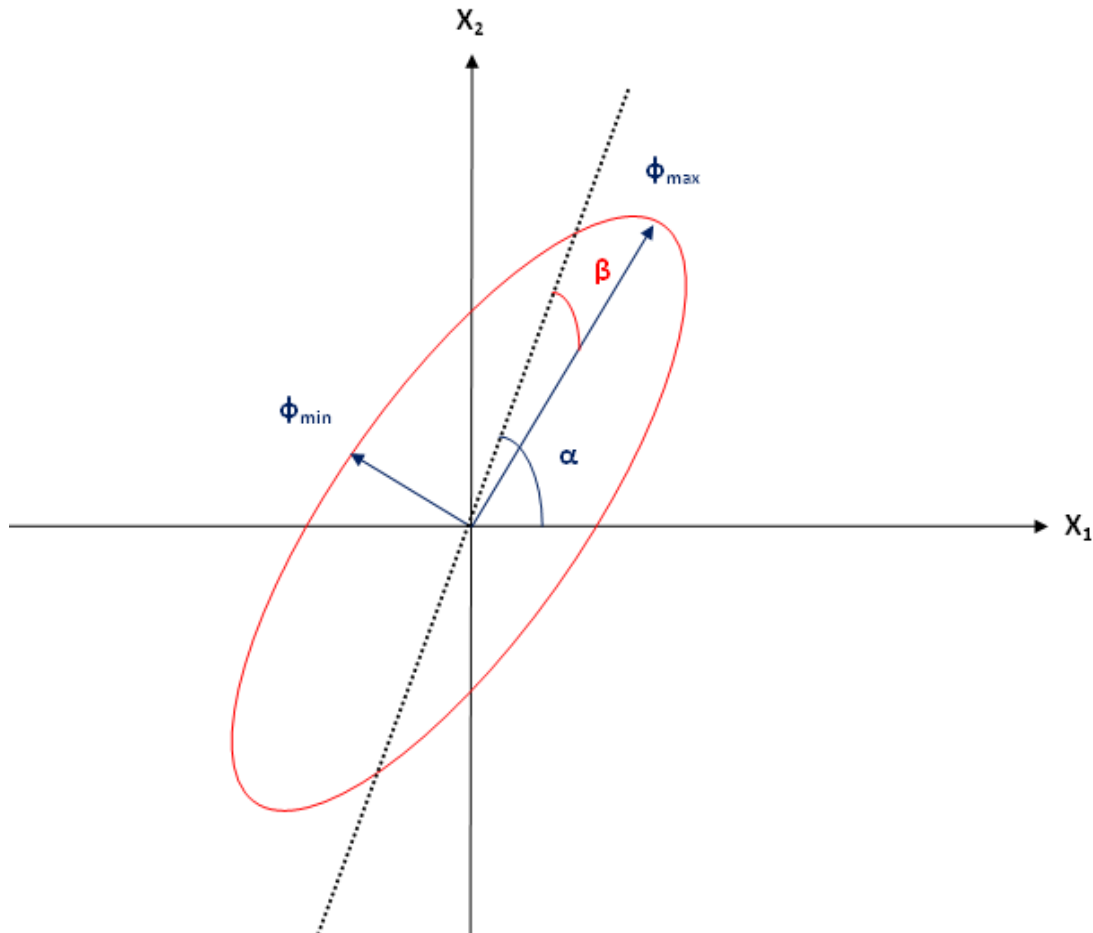


Figure II-2 : Représentation graphique du tenseur de phase dans le cas 3-D (Caldwell 2004)

II-4-Relation entre le tenseur de phase et la méthode de Bahr :

En principe, l'angle du Strike (α) donnée par la méthode de Caldwell sera la même que celle donnée par les deux autres approches d'analyse (technique de Groom-Baily (1989 et 1991) et la technique de Bahr (1988 et 1991)).

En particulier, la formule donnant la direction du strick, donnée par Bahr (l'équation I-40) peut être réduite à l'équation (II-13).

L'invariant rotationnelle indicateur de dimensionnalité de la structure régionale proposé par Bahr en (1988,1991) appelé également skew de sensibilité de phase (η) ressemble à l'angle de skew β donné par Caldwell (2004) .

L'expression donnant le skew de sensibilité de phase (η) en fonction des éléments du tenseur de phase, donnée par Bahr est définie par :

$$\eta^2 = 2 \det(\mathbf{x}) |\varphi_{12} - \varphi_{21}| / |z_{12} - z_{21}|^2 \quad (\text{II-20})$$

D'après cette formule, η est fonction des invariants du tenseur d'impédance observé et le skew du tenseur de phase ($\varphi_{12} - \varphi_{21}$) .il est évident que la condition $\eta = 0$ (équivalent à $\varphi_{12} - \varphi_{21} = 0$) ce qui signifie que les composantes de phase pour chaque colonne du tenseur d'impédance sont égales, ce qui est vraie lorsqu'il s'agit d'une structure régionale 2-D (Bahr 1988,1991).

Mais si $|\varphi_{12} - \varphi_{21}| \neq 0$ l'effet de la distorsion galvanique dans l'équation (II-20) contenu dans le déterminant $\det(\mathbf{x})$ et $|z_{12} - z_{21}|^2$ ne peut pas être éliminé. Donc si la structure régionale n'est pas 2-D, alors la valeur de η dépendra de la distorsion, et par conséquent la détermination de la dimensionnalité de la structure régionale par cette formule est en fonction de la distorsion.

toute analyse de distorsion basée sur l'hypothèse que la structure régionale est 2-D ,ne peut pas inclure l'asymétrie dans la réponse MT représentée par l'angle du skew du tenseur de phase (β). Pour représenter cette asymétrie Bahr en (1991) introduit un paramètre complexe (déviation de phase)dans le tenseur de distorsion mais tout en gardant la forme 2-D du tenseur d'impédance .ce paramétrage ne marche pas avec le cas 3-D qui est la source de l'asymétrie, et qui ne respecte pas les bases physiques de l'hypothèse que le tenseur de distorsion est réel pour la distorsion galvanique. L'un des avantages de l'analyse par le tenseur de phase est que l'asymétrie dans la réponse de phase est claire, et on n'a pas besoin d'une hypothèse sur la forme du tenseur d'impédance régional.

II-5-Relation avec la décomposition de Groom-Bailey :

Pour cette méthode, Il y a un autre paramétrage du tenseur de distorsion qui ressemble au tenseur de phase et qui est donné par.

$$\Phi = \mathbf{R}^T(\alpha_D - \beta_D) \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{\max} & 0 \\ 0 & \mathbf{d}_{\min} \end{bmatrix} \mathbf{R}(\alpha_D + \beta_D) \quad (\text{II-21})$$

Avec :

β_D et les valeurs principales \mathbf{d}_{\max} et \mathbf{d}_{\min} sont des invariants

α_D : est l'angle de dépendance avec les coordonnées qui correspond à l'équation (II-13).

Chapitre III

III-1-Aperçu géologique du Hoggar:

Situé entre le Craton Ouest Africain à l'Ouest et le méta craton Est Saharien à l'Est, Le bouclier touareg occupe une superficie de 550 000 km².il est constitué essentiellement par le Massif de l'Air au nord du Niger, le Massif de l'Adrar des Iforas au Nord du Mali, et le Massif du Hoggar au sud de l'Algérie qu'est le plus important constituant de ce bouclier (Figure III-1).

Le Massif du Hoggar, est un socle ancien dont l'histoire est complexe. Il est formé essentiellement des formations archéennes, paléoprotérozoïques et néoprotérozoïques surmontées en discordance par les formations sédimentaires du bassin de Taoudeni.

Le Hoggar affleure en boutonnière dans une couverture sédimentaire (les Tassilis).Présentant un bombement d'un diamètre de 1000 Km, avec des altitudes qui diminuent au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre (lesquer et al., 1988) (Figure III-2). Ce bombement est dû principalement à une activité volcanique qui a eu lieu du crétacé jusqu'à des périodes récentes, ce qui a donné naissance à plusieurs districts volcaniques. Topographiquement certains districts constituent un haut relief dont l'altitude dépasse les 2000 m. on trouve dans le massif de l'Atakor le Mont Tahat (2918 m), qui est le point culminant.

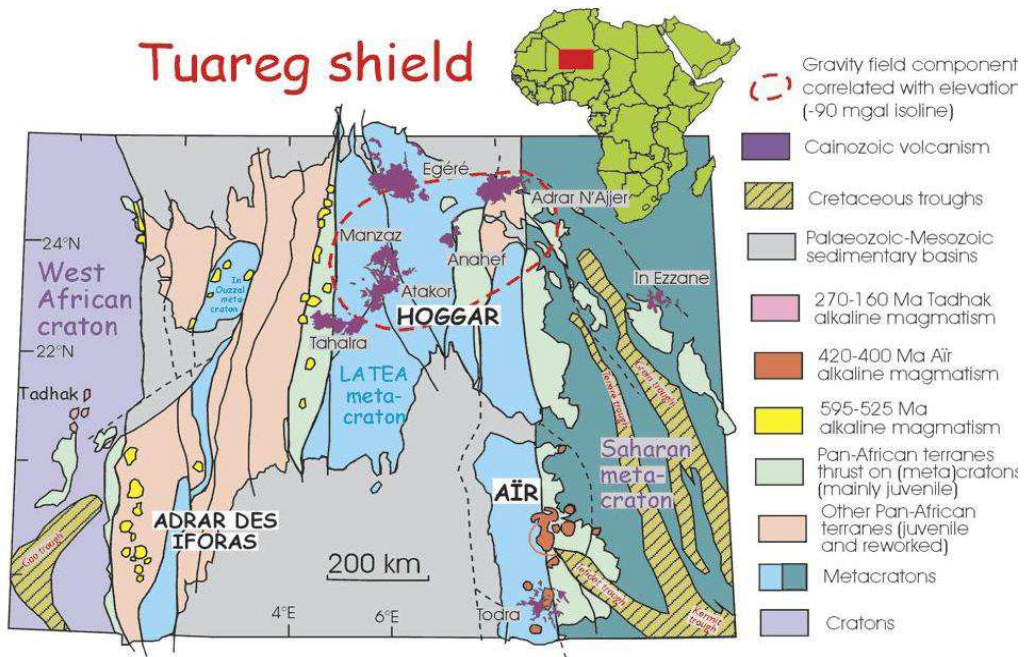


Figure III-1 : carte du bouclier touareg, avec l’anomalie du Bouguer de -90 mgal (tirée de Liégeois et al.2005, d’après Black et al., 1994, Liégeois et al., 2003).

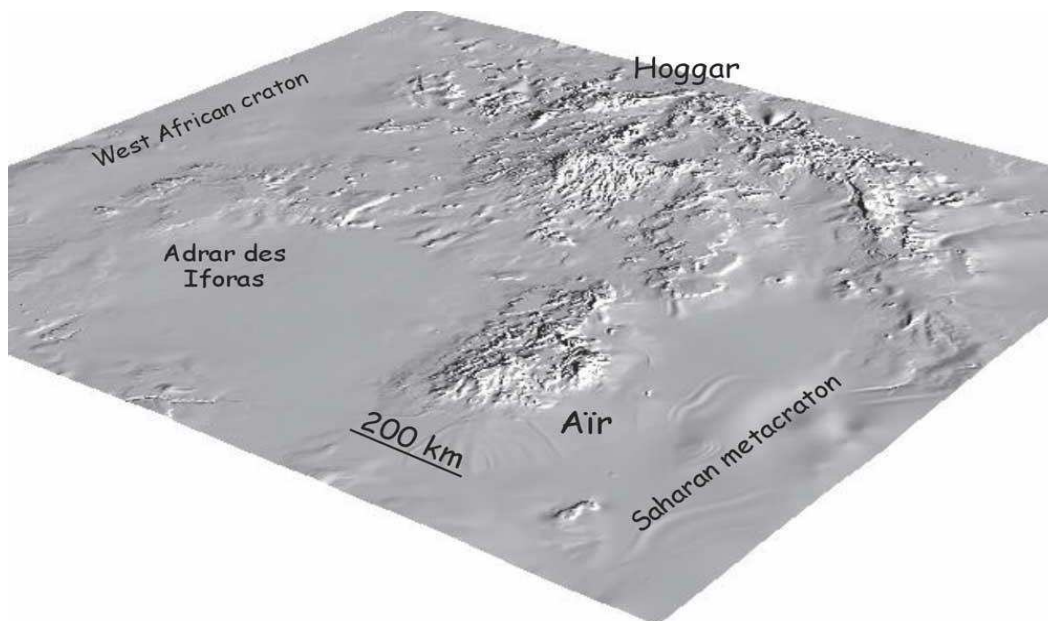


Figure III-2 : image montrant le bombement du Hoggar et de l’Air (tirée de Liégeois et al., 2005)

III-2-structure géologique du Hoggar

la structure géologique du Hoggar est caractérisée par de grands cisaillements subméridiens d'échelle continentale, résultats obtenus après l'établissement en 1977 par Bertrand et Caby et des géologues de la SONAREM de la première carte géologique du Hoggar à l'échelle 1/1.000.000 (Bertrand et Caby, 1978).

Les deux plus importants cisaillements sont l'accident 4°50' et 8°30', qui le séparent en trois grands domaines (**Figure III-3**). Qui sont de l'Est vers l'Ouest : le Hoggar oriental, C'est la partie la moins connue du Hoggar, le Hoggar central qu'est un exemple de région précambrienne polycyclique et le Hoggar occidental, appelé également la Chaîne Pharusienne (Panafricaine) qu'est séparée en deux parties par l'unité granulitique de l'In Ouzzal (UGIO), le rameau occidental et le rameau oriental. Ces rameaux datent du Protérozoïque supérieur-terminal.

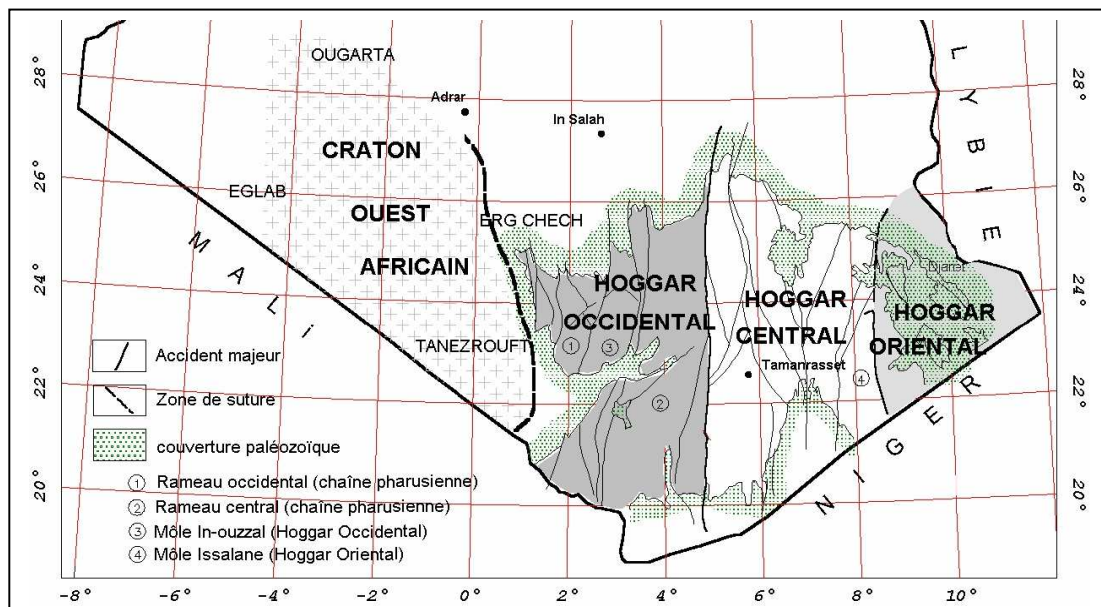


Figure III-3: Carte des principaux domaines structuraux du Hoggar. (D'après Caby et al., 1981).

La synthèse la plus récente de la géologie du hoggar, qui est basée sur les travaux effectués sur le massif de l’Air au Niger par Black et al.(1967) et sur ceux sur le massif de l’Adrar des Iforas au Mali par Black et al.(1979) et Liégeois et al.(1994), Black et al (1994), montre que le bouclier Touareg est en fait, constitué de 23 terranes (**Figure III-4**), allochtones présentant un allongement Nord-Sud, et dont la géologie est très contractée. ces terranes sont donnés dans le tableau suivant. (**Tableau III-1**).

Hoggar Occidental	Hoggar Central	Hoggar Oriental
Timetrine (Tim) Tilemsi (Ti) Kidal (Ki) Tassendjanet (Tas) U granulite Iforas (Ugé) In Ouzzal (Ou) Ahnet (Ah) Tirek (Tir) Tin Zaoutene (Za) In Teideni (It) Iskel (Isk)	Assodé-Issalane (As-Is) Tchilit (Tch) Tazat (Ta) Sérouenout (Se) Egéré-Aleksod (Eg-Al) Azrou-n-Fad (Az) Tefedest (Te) Laouni (La)	Barghot (Ba) Aouzegueur (Ao) Edembo (Ed) Djanet (Dj)

Tableau III-1 Les 23 terranes du Hoggar

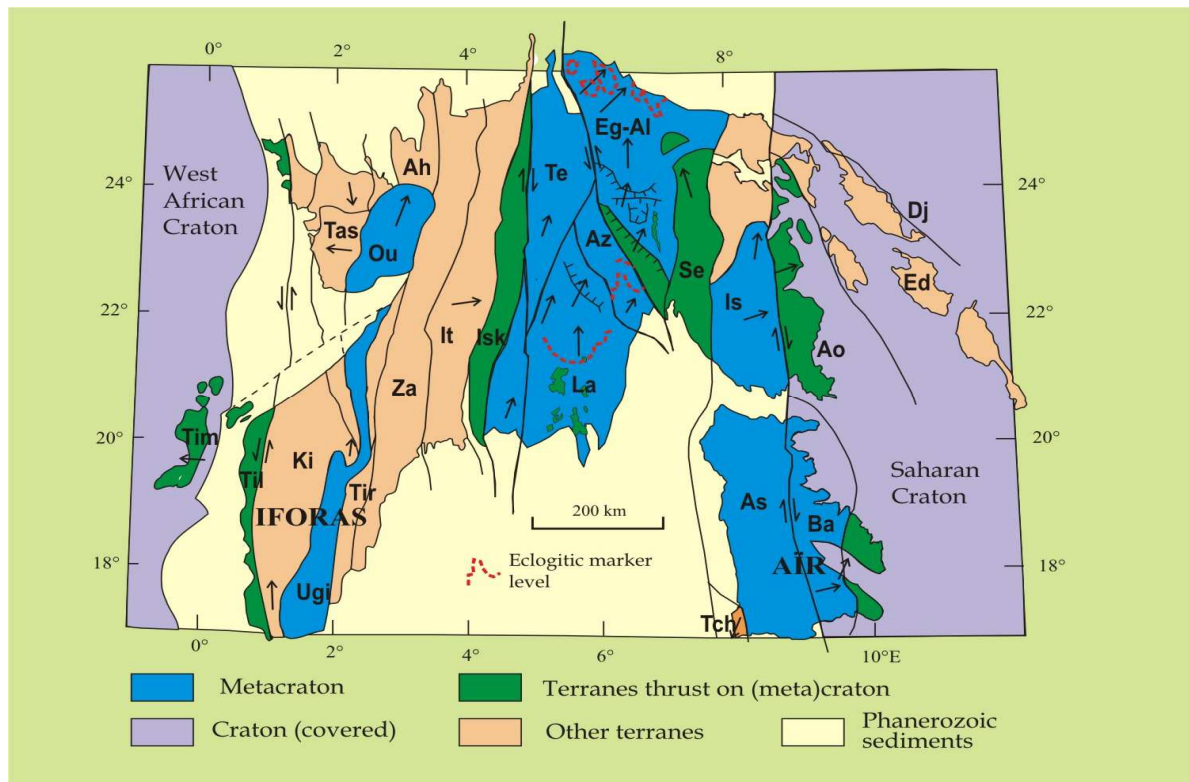


Figure III-4 Les 23 Terranes du Hoggar (D'après : Liégeois et al ; 2003).

III-3-la région d'étude

Notre région d'étude s'étend sur une superficie couvrant une partie du Hoggar centrale et du Hoggar Occidental. Elle est située entre les longitudes 4°30' et 5°15' Est, et les latitudes 22°45' et 23°00' Nord (Figure III-5). L'accident 4°50' dont l'étude est l'un des objectifs du présent travail, est située dans l'extrémité Est de notre région d'étude.

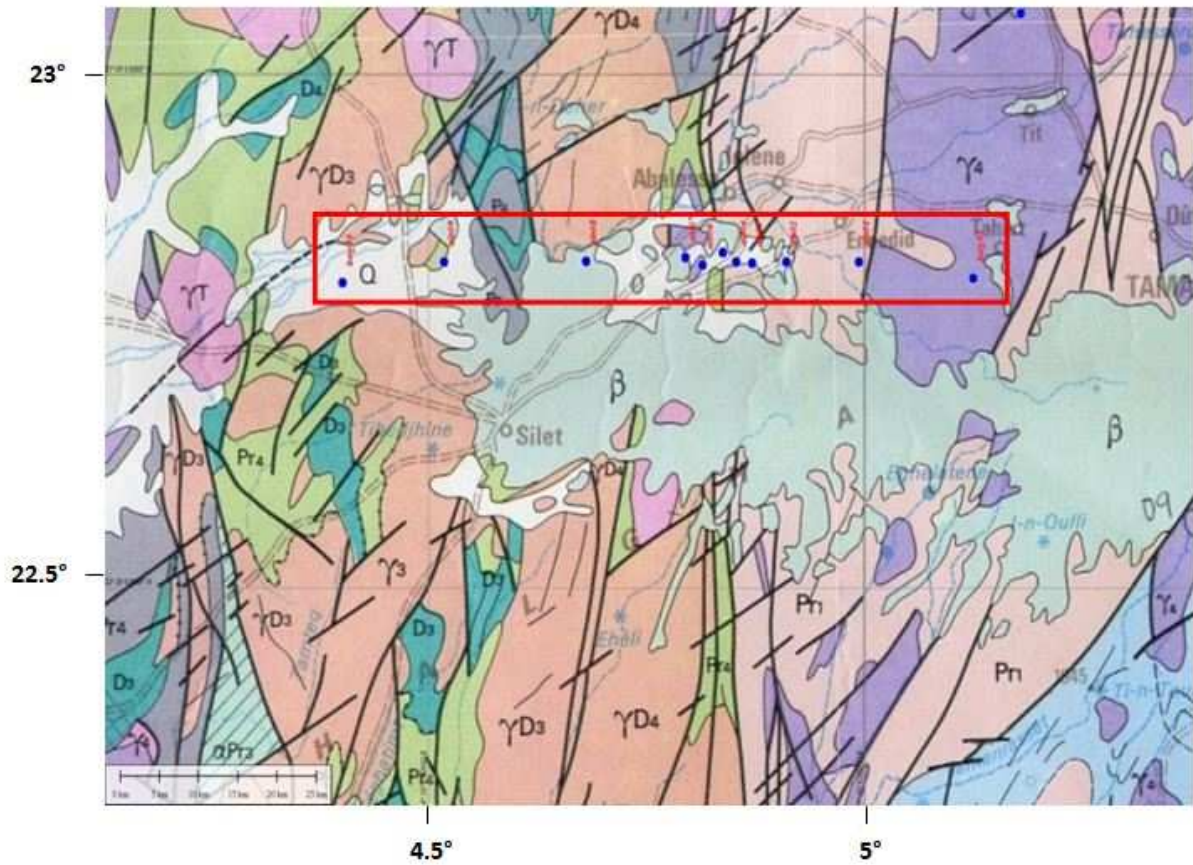


Figure III-5 carte géologique de la région d'étude (le rectangle montre la localisation des sondages MT utilisés)

Chapitre IV

IV -1-Implémentation de la méthode du tenseur de phase sous Fortran

L'objectif principale de la présente étude est l'analyse de la phase du tenseur d'impédance MT tout en utilisant la méthode de Caldwell(2004), suivie d'une comparaison entre les résultats obtenus par cette méthode et celles des méthodes classiques (Bahr 1988 et 1991, Groom-Bailey 1989 et 1991).

Pour ce faire, nous avons établi un programme informatique utilisant l'organigramme donné ci-dessous (figure (IV-1)).

Le programme calcule le tenseur de phase magnétotellurique ainsi que ses différents paramètres. Il est rédigé en fortran 90 et compilé sous Windows. Il prend comme entrée (input) les valeurs des champs électromagnétiques ou le tenseur d'impédance observés (figure (IV-2) et (figure (IV-3))). les paramètres de sorties (outputs) sont l'angle de Skew (β) qui permet de faire une estimation de la dimensionnalité de la structure régionale , l'angle (α) qui donne l'inclinaison de la direction structurale dans le cas d'une structure régionale 2-D , et les deux valeurs principales du tenseur de phase Φ_{\min} et Φ_{\max} qui représentent respectivement le petit et le grand axe de l'ellipse du tenseur ,quand à l'angle Θ ($\Theta=\alpha-\beta$) il représente l'angle d'inclinaison de l'ellipse du tenseur de phase par rapport au système d'axe qui n'est d'autre que la direction préférentielle des courants d'induction(figure (IV-4)).

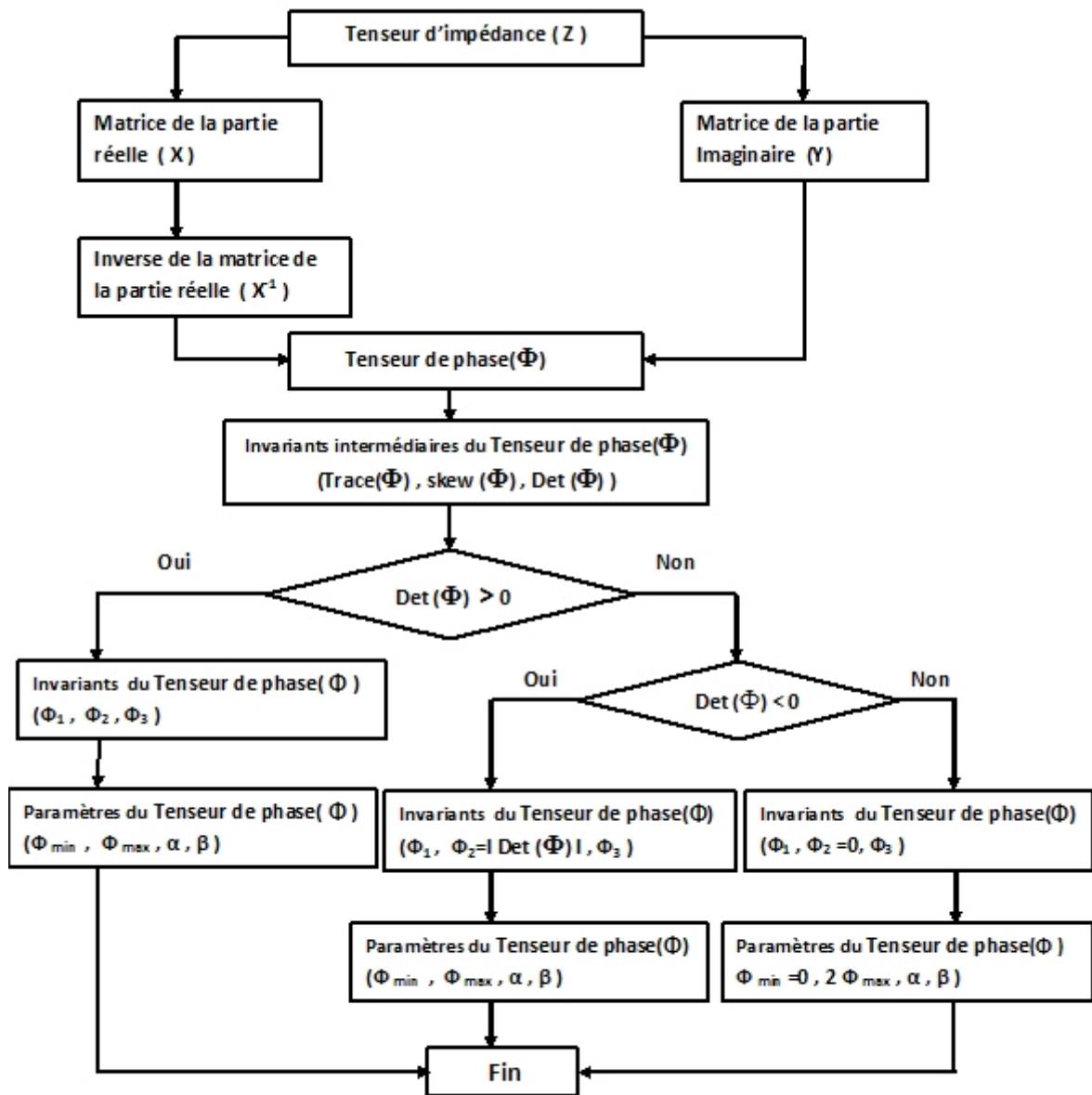


Figure IV-1: Présentation sous forme d'organigramme de la méthode de Caldwell(2004)

```

*****
ce programme permet de calculer le tenseur de phase MT
et ses differentes parametres pour un sondage MT :
-----
These de Magister
par BOUKAR Abdelghafour,2012
*****

Donner le nombre des frequences ::
N = ?
    
```

Figure IV-2: Exemple montrant l'exécutable du programme qui demande le nombre de sondage, lesquelles, Nous voulons calculer les tenseurs de phases et leurs paramètres correspondantes.

Fichier	Edition	Format	Affichage	?
22.81777778	4.993055556	4.73323E-01	1.40565E+00	3.48382E+00
22.81805556	4.910277778	3.66084E-01	3.98445E+00	2.60111E+00
22.81638889	4.870833333	1.51213E+00	1.81660E+00	2.81670E+00
22.81777778	4.8525	1.34112E+00	3.19023E+00	3.69686E+00
22.82666667	4.837222222	1.99839E+00	2.33932E+00	6.63956E+00
22.815	4.814166667	3.34751E+00	2.13635E+00	7.95296E+00
22.82194444	4.794444444	1.77112E+00	2.28222E+00	1.38992E+01
22.81833333	4.680555556	5.18010E+00	5.04894E+00	9.28594E+00
22.81777778	4.5175	1.04567E+00	6.50809E-01	5.21729E+00
22.79763889	4.401166667	2.32368E+00	9.96694E-01	2.43571E+01
				4.15726E+00
				-1.25458E+02
				3.76898E+01
				-1.18929E+02
				3.30130E+01
				-1.20721E+02
				5.61735E+01
				-1.19047E+02
				2.98929E+00
				-1.16687E+02
				4.54515E+01
				-1.21096E+02
				4.32957E+01
				-1.21791E+02
				3.94038E+01
				-1.22054E+02
				3.18929E+01
				-1.22787E+02
				3.48242E+01
				-1.23589E+02
				1.52801E+01
				-1.24166E+02
				5.74780E+00

Figure IV-3: Exemple d'un fichier d'entre dans lequel chaque ligne représente un sondage, et les colonnes représentent respectivement la latitude, la longitude du sondage, $|Z_{xx}|$, phase (Z_{xx}), $|Z_{xy}|$, phase (Z_{xy}), $|Z_{yx}|$, phase (Z_{yx}), $|Z_{yy}|$, phase (Z_{yy})

Index	Longitude	Latitude	Z _{xx}	Z _{xy}	Z _{yx}	Z _{yy}	Φ _{xx}	Φ _{xy}	Φ _{yx}	Φ _{yy}
1	4.9930550000	22.8177800000	.29	-.38	.64	1.25	3.13	1.52	-.01	.52
2	4.9102780000	22.8180600000	.28	-.24	-3.56	-1.78	.59	-2.53	1.55	-.61
3	4.8708330000	22.8163900000	1.34	-.69	-1.42	1.14	2.66	.92	-.45	.07
4	4.8525000000	22.8177800000	.98	-.92	-1.75	2.67	-3.33	1.60	.16	1.54
5	4.8372220000	22.8266700000	-.48	1.94	-1.60	1.70	-.96	-6.57	1.71	-1.40
6	4.8141670000	22.8150000000	-3.30	.57	-1.63	-1.38	-5.92	-5.31	-.38	2.86
7	4.7944450000	22.8219500000	1.69	-.54	2.28	.14	-12.40	-6.27	3.95	2.04
8	4.6805550000	22.8183300000	2.93	-4.27	-1.01	4.95	-8.96	2.43	-2.83	-.77
9	4.5175000000	22.8177800000	.01	-1.05	.06	.65	-2.52	4.57	-1.35	.61
10	4.4011660000	22.7976400000	2.27	.47	1.00	-.01	1.78	24.29	3.58	-2.12

Figure IV-4 : Exemple d'un fichier de sortie dans lequel chaque ligne représente un sondage, et les colonnes représentent respectivement ; l'indice, la longitude et la latitude du sondage, ainsi que tous les paramètres tels que les impédances (Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} , Z_{yy}), les phases, (Φ_{xx} , Φ_{xy} , Φ_{yx} , Φ_{yy}) et les paramètres de l'ellipse , Φ_{max} , Φ_{min} etc.

IV-2-Modélisation

IV-2-1-le modèle synthétique utilisé

Afin de tester la fiabilité du programme, et montrer les propriétés du tenseur de phase ; nous avons construit un modèle synthétique (**Figure IV-5**), représenté par une parallélépipède de résistivité de **100 Ωm** et de dimensions (**100 X 1 X 14 Km³**), enterré à une distance de **1 Km** au-dessous de la surface dans un demi espace de résistivité de **10 000 Ωm** et de dimensions de (**100 X 100 X 15 Km³**), surmontant un demi espace de résistivité égale à **2000 Ωm**. nous avons 11 profiles dirigés suivant l'axe des (Y) avec une distance inter-profile égale à **10 Km**, et une distance inter-station de mesure égale **10Km**.

En utilisant un champ électrique primaire parallèle à l'axe des (X) (mode TE), et pour (**05**) fréquences différentes (Tableau IV-1)(mêmes fréquences utilisées dans le cas réel), nous avons calculé les champs électromagnétiques mesurés en surface.

Le calcul des champs électromagnétiques a été fait en utilisant le programme écrit par Tabbagh. Ce programme utilise la méthode des moments, définie à partir des équations intégrales et qu'il a été choisie pour sa représentation synthétique du comportement des

structures 3D (Harrington, 1968 ; Raiche, 1974 ; Hohmann, 1975 ; Ting et Homann, 1981 ; Wannamaker et al, 1984a et 1984b ; Tabbagh 1985 ; Doherty, 1988 ; Wannamaker 1991 ; Xiong, 1992).(Djeddi,1999).

Par la suite, nous avons utilisé ces champs comme des données d'entrée (input), pour notre programme.

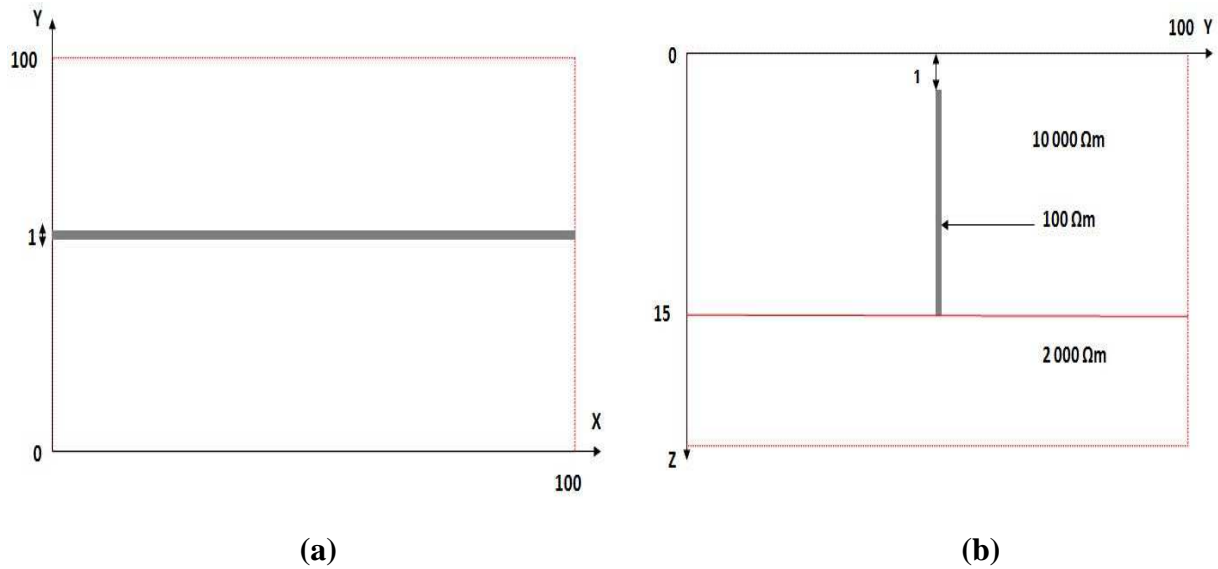


Figure IV-5 : le modèle synthétique utilisée, [(a) vu dans le plan (XY)], [(b) vu dans le plan (YZ)]

Fréquence (Hz)	Période (s)	Résistivité (Ωm)	Skin depth (Km)
0.001	1000	10000	1590.63
0.00198	529.1	10000	1157
0.0159	62.9	10000	398.93
0.1	10	10000	159.06
0.127	7.8	10000	140.48

Tableau IV-1 les fréquences utilisées et leurs profondeurs correspondantes (le skin depth est calculé en utilisant la formule (I-14))

IV-2-2-Application sur les données du modèle

En employant, notre programme nous avons calculé les tenseurs d'impédances, tout en utilisant les formules données par Vozoff (Vozoff,K.,1972), qui sont :

$$Z_{xx} = |(E_x A^*) \cdot (H_y B^*) - (E_x B^*) \cdot (H_y A^*)| / |(H_x A^*) \cdot (H_y B^*) - (H_x B^*) \cdot (H_y A^*)|$$

$$Z_{xy} = |(E_x A^*) \cdot (H_x B^*) - (E_x B^*) \cdot (H_x A^*)| / |(H_y A^*) \cdot (H_x B^*) - (H_y B^*) \cdot (H_x A^*)|$$

$$Z_{yx} = |(E_y A^*) \cdot (H_y B^*) - (E_y B^*) \cdot (H_y A^*)| / |(H_x A^*) \cdot (H_y B^*) - (H_x B^*) \cdot (H_y A^*)|$$

$$Z_{yy} = |(E_y A^*) \cdot (H_x B^*) - (E_y B^*) \cdot (H_x A^*)| / |(H_y A^*) \cdot (H_x B^*) - (H_y B^*) \cdot (H_x A^*)|$$

Avec:

E_x et E_y sont les composantes horizontales du champ électrique

H_x et H_y sont les composantes horizontales du champ magnétique

A^* et B^* sont respectivement le complexe conjugué de H_x et H_y

Par la suite nous avons calculé pour les cinq fréquences choisies, le tenseur de phase ainsi que ces différents paramètres ; seulement pour les stations dont le calcul de tenseur d'impédance est possible ; car pour pouvoir calculer les composantes ce dernier (Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} et Z_{yy}) il faut que le dénominateur de celles-ci soit différent de zéro.

Les résultats montrent des valeurs très grands de Φ_{\max} et pour les représenter nous les avons multipliés par un facteur d'échelle égale a **0.01**, et les distances par un facteur égale à **0.1**.

La cartographie de grands axes du tenseur de phase indiquant les directions préférées par les courants d'induction pour les cinq fréquences, a donné les résultats montrés dans la Figure IV -6.

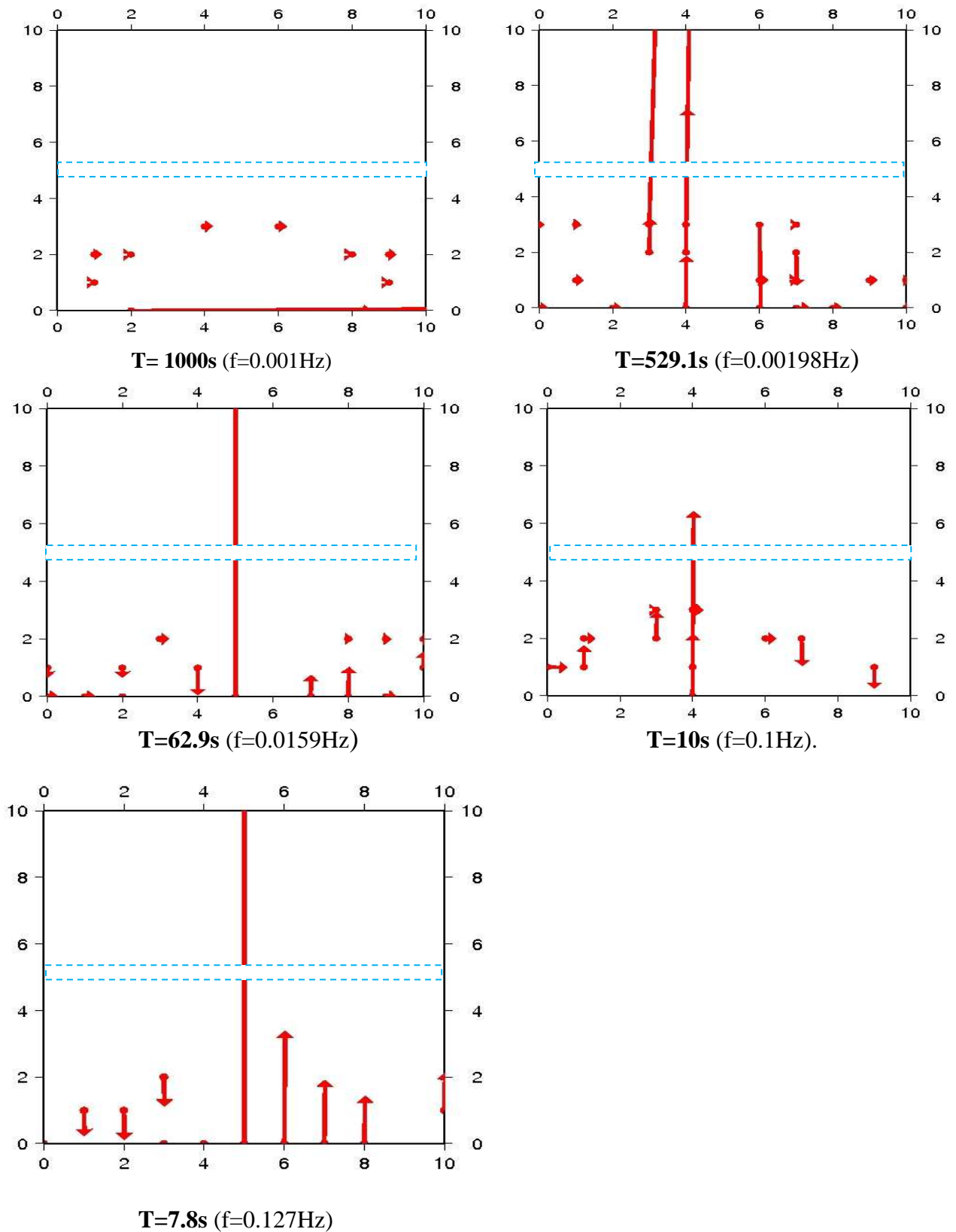


Figure IV -6 : résultats de la modélisation correspondant aux différentes profondeurs choisies. Les vecteurs représentent les grands axes de l'ellipse du tenseur de phase et le rectangle montre la structure enterrée.

IV-2-2-Analyse des résultats obtenus

En analysant les résultats obtenus (donnés en annexe), nous constatons que l'angle de skew β présente des valeurs, dont la valeur moyenne est égale à 44° qu'on peut la considérer comme étant une valeur très grande, donc théoriquement cette valeur est interprétée par la présence d'une structure tridimensionnelle. Quant aux valeurs de Φ_{\min} elles sont toujours nulles, ce qui confirme qu'on est en face d'une structure 3-D, car d'après Caldwell dans ce cas le déterminant du tenseur et le petit axe de l'ellipse du tenseur sont toujours nuls et l'ellipse du tenseur se réduit à une droite dont la longueur est égale à $2\Phi_{\max}$.

Nous remarquons, que pour les profondeurs correspondant aux périodes ($T=7.8s$, $T=10s$, $T=62.9s$, et $T=529.1s$) que les grands axes de l'ellipse du tenseur de phase sont perpendiculaires à la direction d'allongement de la structure enterrée, par contre pour la profondeur correspondant à la période de $T=1000s$, nous constatons qu'il y a un certain alignement suivant la direction structurale.

IV-3-Application sur les données réelles

IV-3-1-les données Magnétotelluriques utilisées

Dans ce travail, nous avons utilisé des données Magnétotelluriques de neuf sondages (**ab01** à **ab09**), collectées lors de la campagne magnétotellurique **2010** dans la région du Hoggar, faite conjointement par le CRAAG et le laboratoire de Géophysique ainsi que un sondage d'une campagne antérieure.

Les sondages sont alignés suivant un profil Est –Ouest. Les coordonnées des sondages (Tableau IV-2), ainsi que leur répartition spatiale (Figure IV-7) sont données ci-après.

Nom du sondage	Latitude	Longitude
ab01	22:49:4	4: 59: 35
ab02	22:49:5	4:54:37
ab03	22:48:59	4:52:15
ab04	22:49:4	4:51:9
ab05	22:49:36	4:50:14
ab06	22:48:54	4:48:51
ab07	22:49:19	4:47: 40
ab08	22:49: 6	4:40:50
ab09	22:49:4	4:31: 3
hog55	22:47: 51,5	4:24:4,2

Tableau IV -2 coordonnées des sondages Magnétotelluriques.

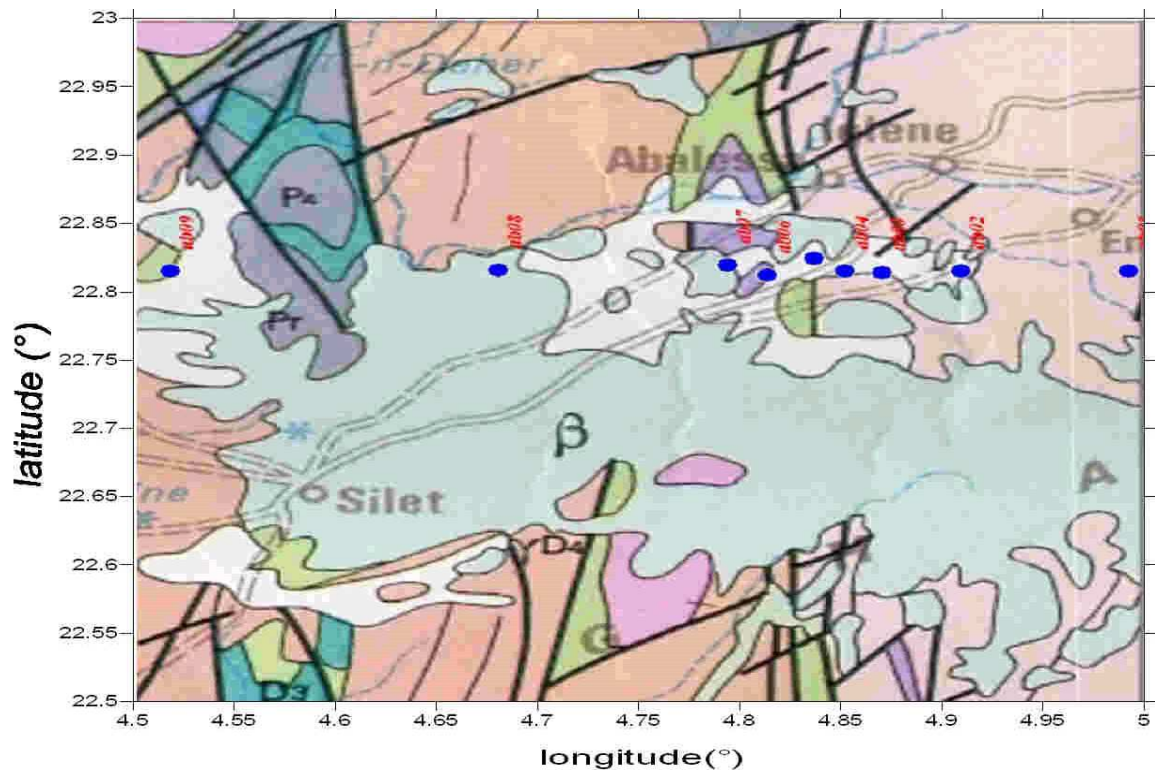


Figure IV -7 : Situation des sondages MT sur un fond géologique de la région d'étude.

IV-3-2-Application

En utilisant le programme, nous avons calculé pour l'ensemble des sondages magnétotelluriques et pour les différentes profondeurs les tenseurs de phase correspondants, ainsi que leurs différents paramètres. Les résultats du calcul sont donnés en annexe, dont un exemple est donné ci-après (Tableau IV-5).

N° de sondage	longitude(°)	latitude(°)	Φ_{xx}	Φ_{xy}	Φ_{yx}	Φ_{yy}	Φ_{min}	Φ_{max}	α (°)	β (°)	Θ (°)
1	4,993055	22,81778	4,88	-1,4	0,41	0,85	0,93	5,08	-6,97	-8,76	1,79
2	4,910278	22,81806	-0,39	0,08	-0,01	-0,64	0,38	0,64	7,04	-2,53	9,57
3	4,870833	22,81639	0,05	-0,27	-0,54	-1,52	0,17	1,32	-13,66	-5,12	-8,53
4	4,8525	22,81778	0,89	-2,34	-4,2	3,49	2,38	2,38	34,15	11,5	22,65
5	4,837222	22,82667	1,64	2,11	0,63	-0,38	0,97	0,97	26,71	24,77	1,94
6	4,814167	22,815	-3,06	3,03	-4,94	4,47	0,16	7,93	7,12	39,99	-32,9
7	4,794445	22,82195	-1,45	3,65	1,64	-4,94	0,18	6,52	28,32	-8,73	37,05
8	4,680555	22,81833	-0,88	-0,37	0,65	0,99	0,51	0,51	-4,28	-41,93	37,65
9	4,5175	22,81778	-1,01	-0,4	0,07	-0,05	0,08	1,09	9,36	11,93	-2,57
10	4,401166	22,79764	-1,49	0,61	-0,76	0,89	0,75	0,75	1,79	-33,2	34,99

Tableau IV-5 Exemple de résultats de calcul correspondant à la fréquence $f=0.00198$ Hz (T=529.1s)

-Les grands axes de l'ellipse du tenseur de phase (Φ_{max})

Nous avons choisi (08) fréquences (Tableau IV-2) pour représenter les résultats de grands axes du tenseur de phase indiquant les directions préférentielles du courant d'induction.

Les fréquences sont choisies de telle sorte, pour couvrir les différentes gammes de profondeur les résultats sont donnés en annexe, dont un exemple est donné dans la figure IV-8.

N°	Période (s)	Fréquence correspondante (Hz)
1	529.1	0.00198
2	62.9	0.0159
3	7.8	0.127
4	0.9804	1.02
5	0.1235	8.1
6	0.0303	33
7	0.0152	66
8	0.0019	530

Tableau IV-2 les fréquences utilisées pour le calcul du tenseur de phase

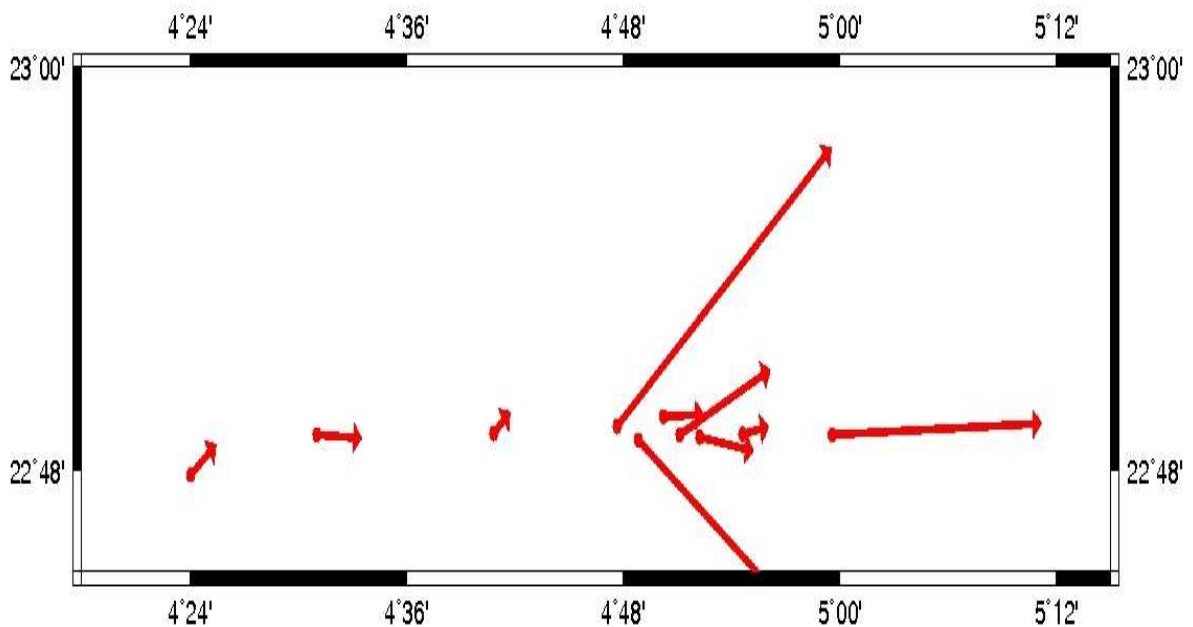


Figure IV-8 : Grands axes de l'ellipse du tenseur de phases correspondants à la période $T=529.1$ s ($f=0.00198$ Hz).

L'angle de skew « β »

Quant à la représentation de l'angle de skew « β » qui permet d'avoir une idée sur la géométrie de la structure régionale, nous avons schématisé sa variation en fonction de la profondeur (période) pour chacun des sondages (figure IV-9).

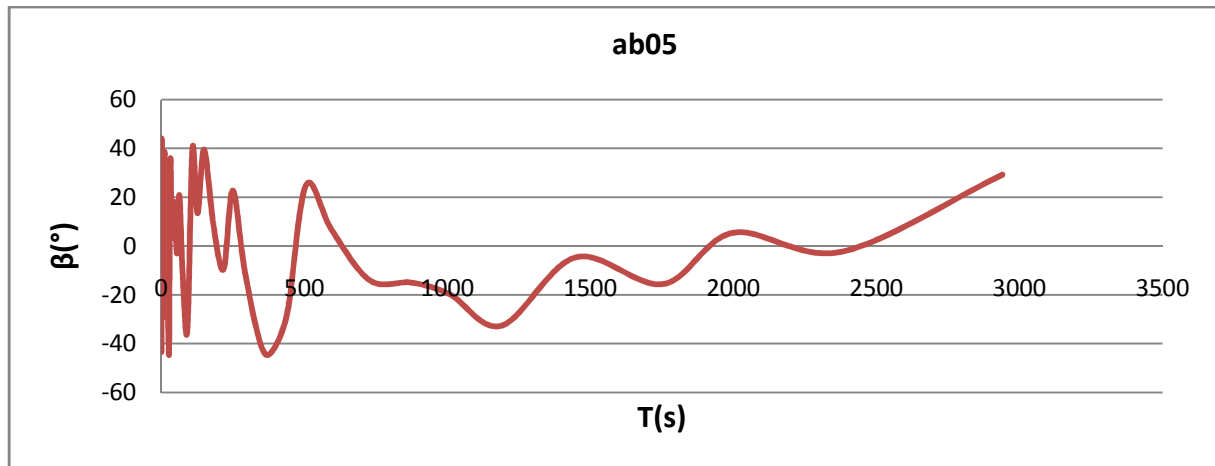


Figure IV-9 Exemple de valeurs de l'angle de skew β (°) en fonction de la profondeur correspondant au sondage **ab05**.

-L'angle (α)

Cet angle donne la direction du Strike dans le cas d'une structure régionale 2-D, alors en basant sur les valeurs de l'angle de skew « β », nous sommes intéressés aux gammes de profondeur, pour lesquelles la structure géologique régionale présente un comportement 2-D. En effet, pour bien voir le comportement de cet angle, nous avons choisi la représentation en rosace qui constitue l'histogramme des angles correspondant à une bande de fréquence donnée, représentant l'évolution du Strike moyen avec l'augmentation de la période (Figure IV-10).

Dans les différentes représentations en rosace, nous avons donné la direction structurale (en bleu), avec une indétermination de 90° (en rouge), c.-à-d. que la première direction (la direction du Strike) est la direction correspondante au mode TE (mode dans lequel le champ électrique est parallèle à la direction structurale), quand à la deuxième direction, c'est la direction correspondante au mode TM (mode dans lequel le champ magnétique est parallèle à la direction structurale).

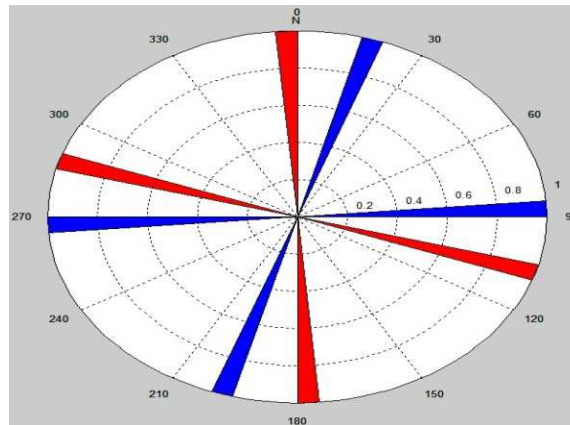


Figure IV-10: Représentation en rosace des angles du Strike déterminés par la méthode de Caldwell(2004), de la bande (2000s-2600s) pour le sondage **ab09**

IV-3-3-Analyse des résultats obtenus

-Les grands axes de l'ellipse du tenseur de phase (Φ_{\max})

La cartographie de grands axes du tenseur de phase en fonction de la profondeur, pour les (08) fréquences choisi ainsi que pour tous les sondages à donnée les résultats suivantes (figure IV-11).

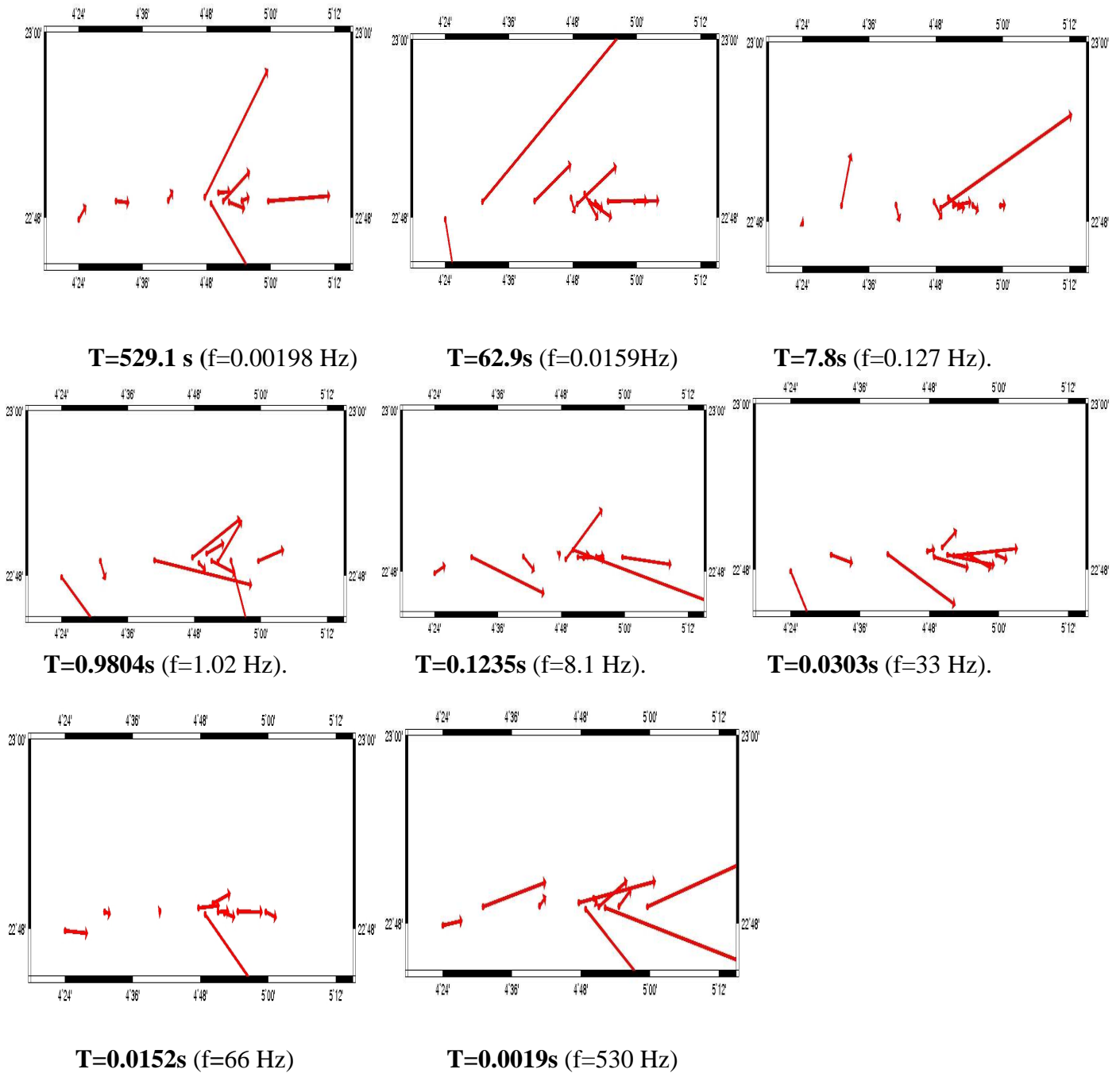


Figure IV-11: Grands axes de l'ellipse du tenseur de phases correspondants aux (08) fréquences choisis

Théoriquement, lorsqu'il s'agit d'une structure régionale 2-D, la direction des grands axes (Φ_{max}) de l'ellipse du tenseur de phase, coïncide parfaitement avec la direction de

plongement de la structure régionale, mais quand il s'agit d'une structure régionale 3-D cette direction n'est d'autre que la direction préférentielle du courant d'induction. Alors, en analysant, les résultats montrés en haut nous constatons que ces grands axes de l'ellipse sont toujours dirigés dans la direction Est-Ouest.

Afin de mieux voir le comportement de l'angle de skew « β » et celle de l'angle (α), nous avons analysé les résultats obtenus, sondage par sondage.les résultats sont montrés dans les figures de IV-12 à IV-21

Le sondage « ab01 »

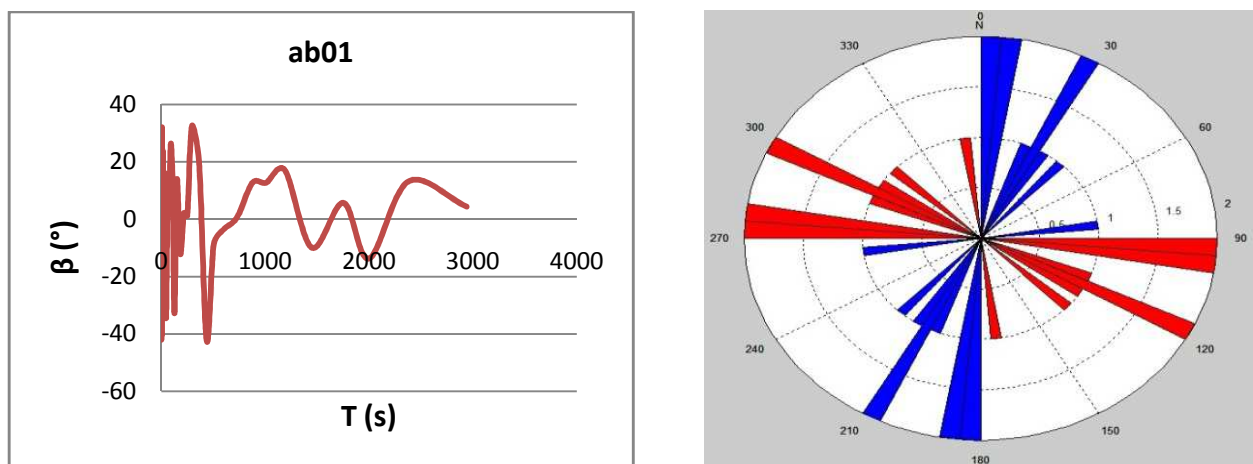


Figure IV-11: Les résultats correspondants au sondage « ab01 », (A gauche) la courbe donnant la variation de l'angle de skew en fonction de la période. Nous remarquons que pour les grandes périodes, plus exactement les périodes qui sont supérieures à 500 s, que les valeurs de l'angle de skew ne dépasse guère la valeur 20° ce qu'est expliqué par la présence d'une structure régionale uni ou bidimensionnelle. Mais quant aux petites périodes plus exactement les périodes qui sont inférieure à 500 s, les valeurs de « β » sont très variables et très grandes, donc théoriquement nous pouvons rien dire concernant la dimensionnalité de la structure régionale. (A droite) Représentation en rosace des angles du Strike, déterminés par la méthode de Caldwell(2004) de la bande (500s-2900s).En observant cette représentation nous pouvons dire qu'on a deux directions structurales dont les valeurs sont 5° et 20° .

Le sondage « ab02 »

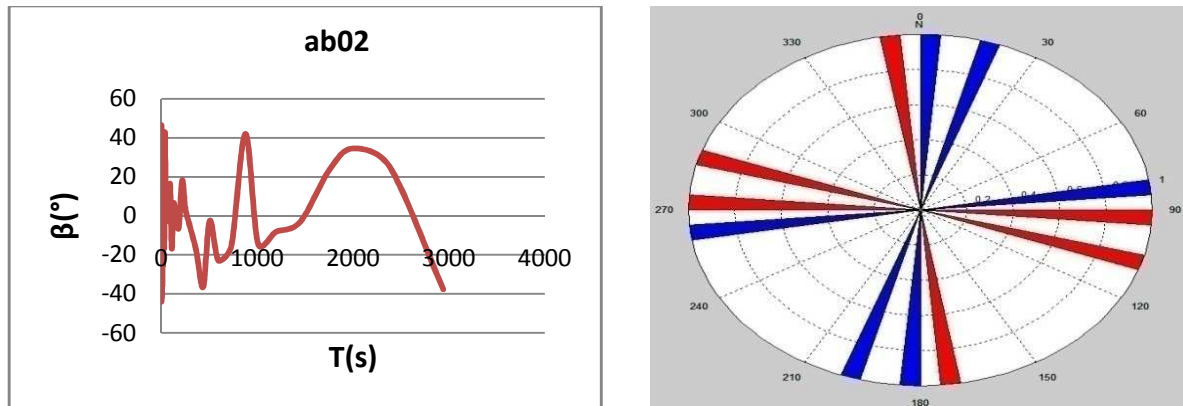


Figure IV-12: Les résultats correspondants au sondage « ab02 », (A gauche) variation de l'angle de skew β (°), en fonction de la profondeur .Nous avons des valeurs de β qui sont très petites pour les périodes comprises entre 1000s et 1500s, indiquant la présence d'une structure uni ou bidimensionnelle. Au delà de cet intervalle les valeurs sont chahutées et ne présentent aucune corrélation avec la dimensionnalité de la structure régionale.(A droite) Représentation en rosace des angles du Strike, déterminés par la méthode de Caldwell(2004) de la bande (1000s-1500s) qui montre l'existence de tris directions structurales dont les valeurs sont 8°,15° et 85°.

Le sondage « ab03 »

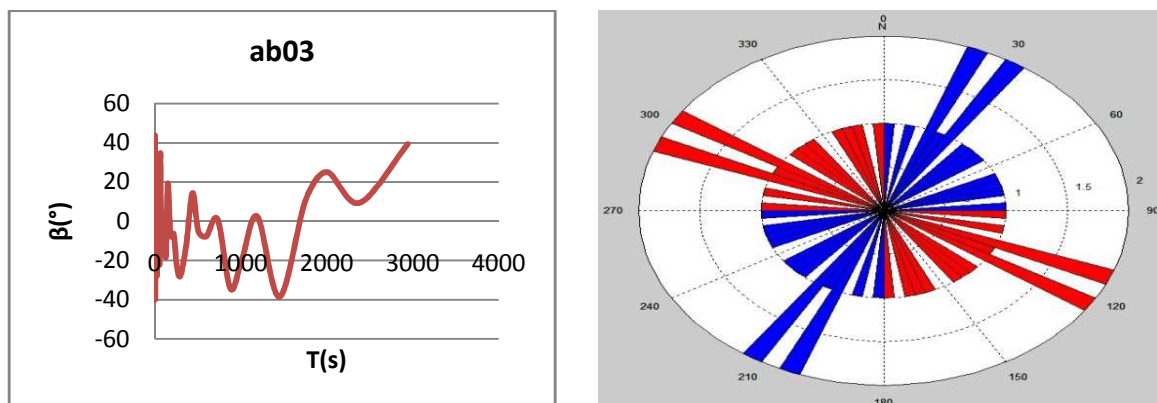


Figure IV-13: Les résultats correspondants au sondage « **ab03** », (A gauche) la courbe qui donne la variation des valeurs de l'angle de skew β ($^{\circ}$) en fonction de la profondeur. Nous remarquons que pour les périodes comprises entre 200s et 2000s, que c'est l'effet d'une structure géologique régionale uni ou bidimensionnelle qu'est prépondérant. (A droite) Représentation en rosace des angles du Strike, déterminés par la méthode de Caldwell(2004) de la bande (200s-2000s) qui montre l'existence de deux directions structurales qui sont 25° et 35° .

Le sondage « **ab04** »

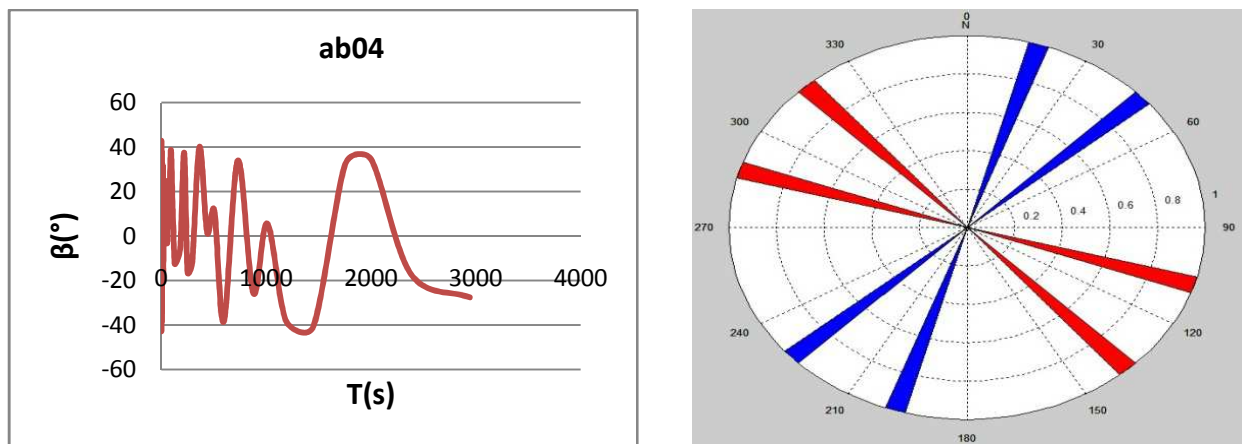


Figure IV-14: Les résultats correspondants au sondage « **ab04** », (A gauche) la courbe de la variation de l'angle de skew β ($^{\circ}$) en fonction de la profondeur correspondant au sondage **ab04**. Nous remarquons que les valeurs de l'angle de skew ne présentent aucune corrélation avec la dimensionnalité de la structure régionale, sauf pour les périodes comprises entre 900s et 1100s où, l'angle de skew présente des valeurs, dont la valeur max ne dépasse pas 20° . (A droite) Représentation en rosace des angles du Strike, déterminés par la méthode de Caldwell(2004) de la bande (900s-1100s) qui montre la présence de deux directions structurales qui sont 20° et 45° .

Le sondage « ab05 »

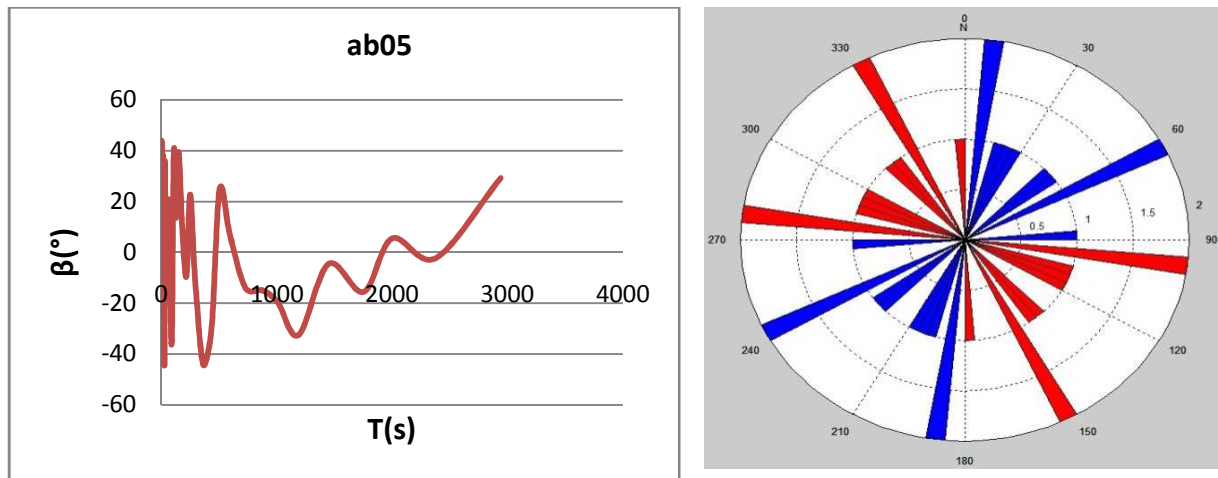


Figure IV-15: Les résultats correspondants au sondage « ab05 », (A gauche) la corbe qui montre comment l'angle de skew varie en fonction de la profondeur. En observant ces valeurs nous constatons que pour les périodes supérieures à 500s que l'effet d'une structure régionale 1-D ou 2-D qu'est prépondérant. (A droite) Représentation en rosace des angles du Strike déterminés par la méthode de Caldwell(2004), de la bande (500s-2900s) qui montre l'existence de deux directions structurales dont les valeurs sont très différentes l'une à l'autre, qui est la 5° et la 65°.

Le sondage « ab06 »

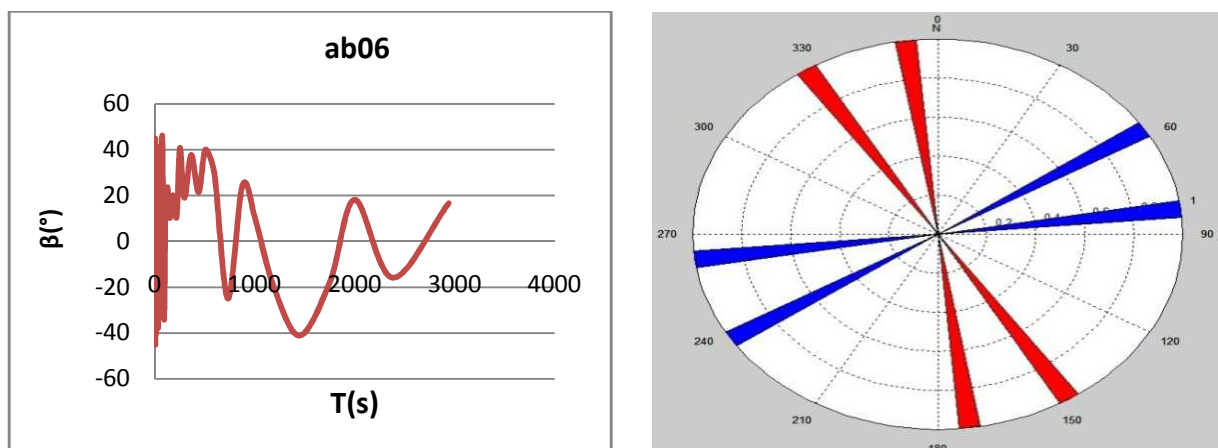


Figure IV-16: Les résultats correspondants au sondage « ab06 », (A gauche) variation des valeurs de l'angle de skew β (°) en fonction de la profondeur montrant l'effet d'une structure régionale 1-D ou 2-D pour les périodes qui sont supérieures à 1800s. (A droite) Représentation

en rosace des angles du Strike, déterminés par la méthode de Caldwell(2004) de la bande (1800s-2900s) indiquant l'existence de deux directions structurales dont les valeurs sont 59° et 82°.

Le sondage « ab07 »

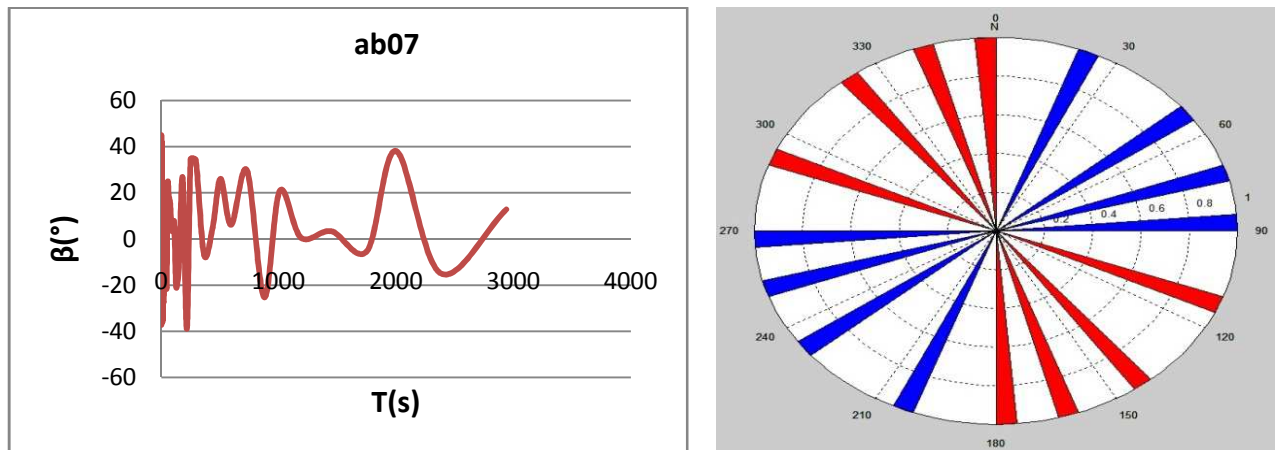


Figure IV-17: Les résultats correspondants au sondage « ab07 », (A gauche) valeurs de l'angle de skew β (°). Nous pouvons dire qu'on a une structure régionale 1-D ou 2-D pour les périodes comprises entre 1000s et 1800s, idem pour les périodes qui sont supérieurs à 2300s. (A droite) Représentation en rosace des angles du Strike, déterminés par la méthode de Caldwell(2004) de la bande (1000s-1800s) indiquant la présence de quatre directions structurales sont envisagées on a 28°, 50°, 72° et 90°.

Le sondage « ab08 »

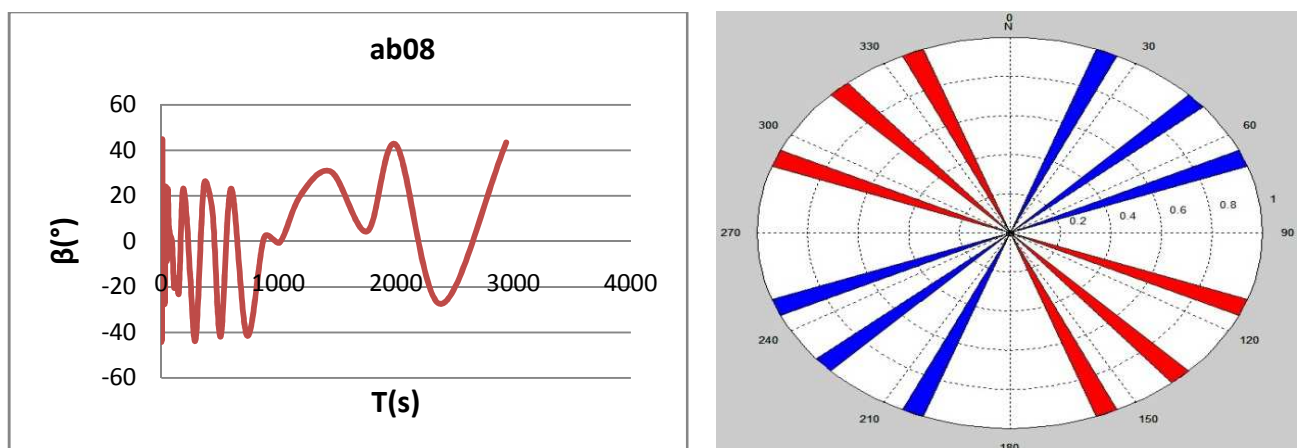


Figure IV-18: Les résultats correspondants au sondage « **ab08** », (A gauche) valeurs de l'angle de skew β (°) en fonction de la profondeur correspondant au sondage **ab08**. Nous constatons que ces valeurs ne présentent aucune corrélation avec la géométrie de la structure régionale, sauf les périodes comprises entre 900s et 1300s où, l'angle de skew présente des valeurs, dont la valeur max ne dépasse pas 20°. (A droite) Représentation en rosace des angles du Strike, déterminés par la méthode de Caldwell(2004) de la bande (900s-1300s) pour le sondage **ab08**, en observant ces résultats on peut dire qu'il y a trois directions structurales qui sont plus au moins NE-SW, on a 25°, 48° et 68°.

Le sondage « **ab09** »

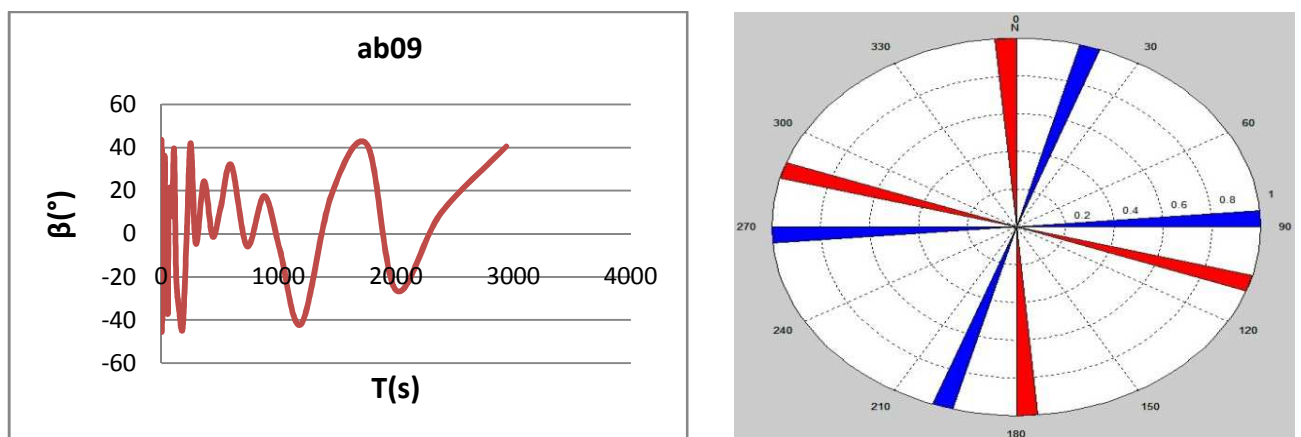


Figure IV-19: Les résultats correspondants au sondage « **ab09** », (A gauche) valeurs de l'angle de skew β (°) en fonction de la profondeur correspondant au sondage **ab09**. on a l'effet d'une structure régionale 1-D ou 2-D qu'est prépondérante pour les périodes comprises entre 2000s et 2600s. (A droite) Représentation en rosace des angles du Strike déterminés par la méthode de Caldwell(2004) de la bande (2000s-2600s) pour le sondage **ab09** qui est le sondage le plus proche de l'accident 4°50, nous avons deux directions structurales dont une est plus au moins Nord-Sud (18°), et l'autre est quasiment Est-Ouest (90°).

Le sondage « hog55 »

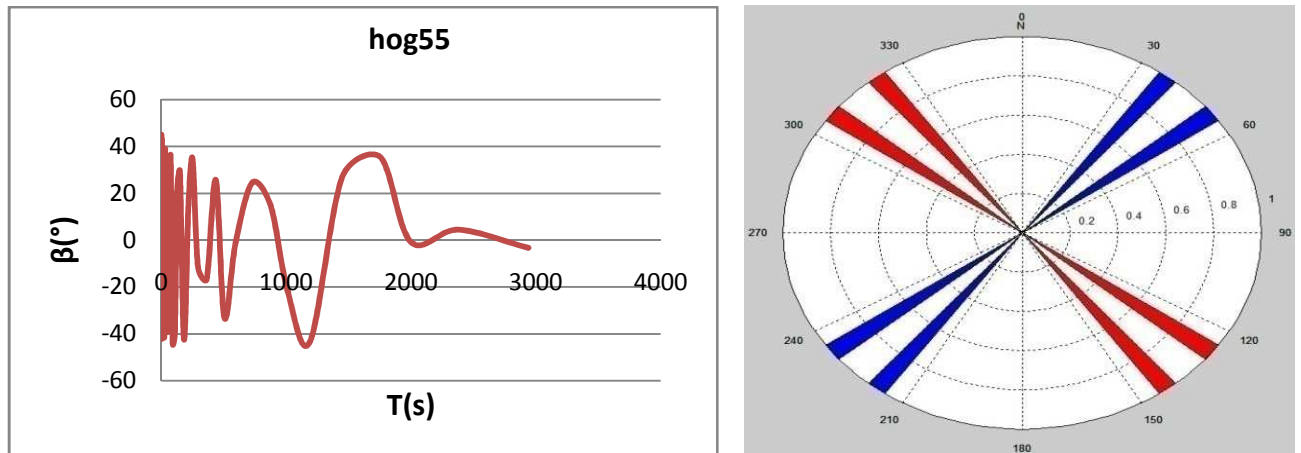


Figure IV-20: Les résultats correspondants au sondage « **hog55** », (**A gauche**) valeurs de l'angle de skew β (°) en fonction de la profondeur, correspondant au sondage **hog55**. La courbe indique le comportement d'une structure régionale 1-D ou 2-D, pour les périodes qui sont supérieures à 2000s. (**A droite**) Représentation en rosace des angles du Strike, déterminés par la méthode de Caldwell(2004) de la bande (**2000s-2900s**) pour le sondage **hog55**. Deux directions structurales sont envisagées, on a la 38° et la 55°.

Donc, nous pouvons dire que les valeurs de l'angle (α) sont carrément situées dans le premier quadrant c.-à-d. entre [0° et 90°], ce qui confirme l'existence d'une structure régionale bidimensionnelle, dont le Strike est donné par la direction NE-SW. Mais quant à l'existence de plusieurs directions structurales pour le même sondage, cela est expliquée par la présence d'une autre structure géologique (accident), c.-à-d. qu'on a autant de directions structurales que des accidents géologiques. En plus de ça en regardant la carte géologique de la région d'étude on voit très bien qu'il y a une certaine corrélation entre les accidents géologiques données par cette carte et les valeurs de (α) commentées ci-dessus.

Chapitre V

V-1-analyse du tenseur d'impédance par la méthode de Bahr (1988 et 1991)**V-1-1-Application :**

La méthode de Bahr basée sur le Skew de Swift (K) et les trois paramètres de Bahr, le skew régionale (η), la différence de phase (μ) et le paramètre de bidimensionalité (Σ), permet de faire une analyse du tenseur d'impédance observé, afin de déterminer la géométrie de la structure régionale, ainsi que l'existence ou non d'une structure locale qui induirait une distorsion de la réponse Magnétotellurique. Les valeurs seuils dans le cas théorique en absence de bruit et celles proposées par Bahr(1991), Marti et al. (2005), et celle de la présente étude tout en considérant un comportement gaussien du bruit, sont données dans le tableau suivante (Tableau V-1).

Valeur seuil	η_0	K_0	μ_0	Σ_0
Théorique (sans bruit)	0	0	0	0
Bahr(1991)	0.30	0.10	0.05	0.10
Marti et al. (2005)	0.12	0.06	0.34	0.01
La présente étude	0.30	0.02	0.20	0.01

Tableau V-1 Valeurs seuils théoriques (sans bruit), ainsi que celles proposées par Bahr (1991) pour les quatre indicateurs de dimensionnalité (Bouزيد, 2010).

Dans le but de faire une analyse du tenseur d'impédance observé par cette méthode, nous avons calculé pour chaque sondage MT les quatre indicateurs de dimensionnalité. Pour chacun de nos sondages et toutes les fréquences. A cet effet nous avons utilisé un programme MATLAB écrit par Bouزيد (Bouزيد, 2010). Le programme calcule les quatre indicateurs de dimensionnalité, et permet une schématisation de leur variation en fonction de la période. Les résultats sont donnés en annexe dont un exemple est donné ci-après (figure V-1).

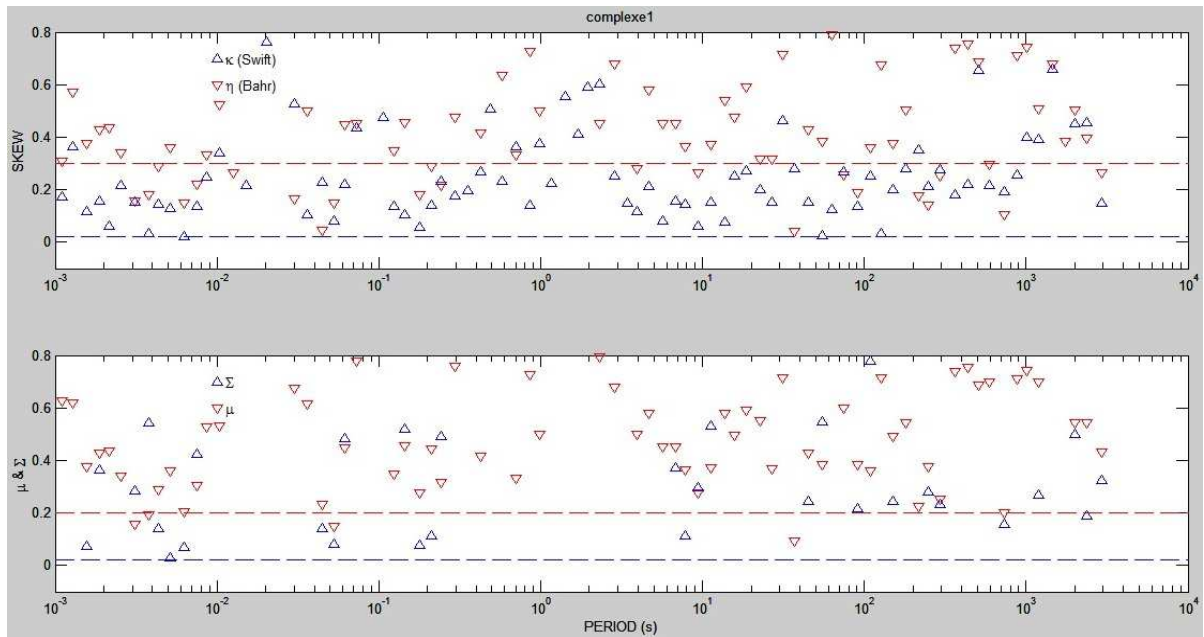


Figure V-1 : les quatre indicateurs de dimensionnalité correspondants au sondage **ab01** le Skew de Swift (K), le skew régionale (η) (**en haut**), La différence de phase (μ), paramètre de bi-dimensionnalité (Σ)(**en bas**).

V-1-2-Analyse et interprétation des résultats :

En utilisant l’organigramme de la méthode de Bahr donné dans la Figure V-2, et en analysant les différentes valeurs de quatre invariants rotationnels indicateurs de dimensionnalité, pour l’ensemble de sondages, nous pouvons dire que :

Les valeurs de Skew régional « η » sont distribuées de part et d’autre de la valeur seuil ($\eta=0.30$), ce qui présente une certaine ambiguïté dans la détermination de la dimensionnalité de la structure régionale, donc nous pouvons rien dire est ce qu’il s’agit d’une structure régionale 3-D ou pas. Concernant les valeurs de Skew de Swift « K » elles sont toujours supérieur de leur valeur seuil ($K=0.02$), ce qu’est traduit théoriquement par la présence de distorsion (l’existence des hétérogénéités superficielles),c.-à-d. que nous avons une structure régionale uni ou bidimensionnelle superposée à une structure superficielle tridimensionnelle, donc pour savoir est ce qu’il s’agit d’une structure régionale unidimensionnelle ou bien

bidimensionnelle on doit voir comment sont les valeurs de la différence de phase « μ », alors en les observant de ce dernier nous constatons qu'elles sont toutes supérieures à leur valeur seuil ($\mu=0.20$) à cet effet nous pouvons dire qu'il s'agit d'une structure régionale bidimensionnelle.

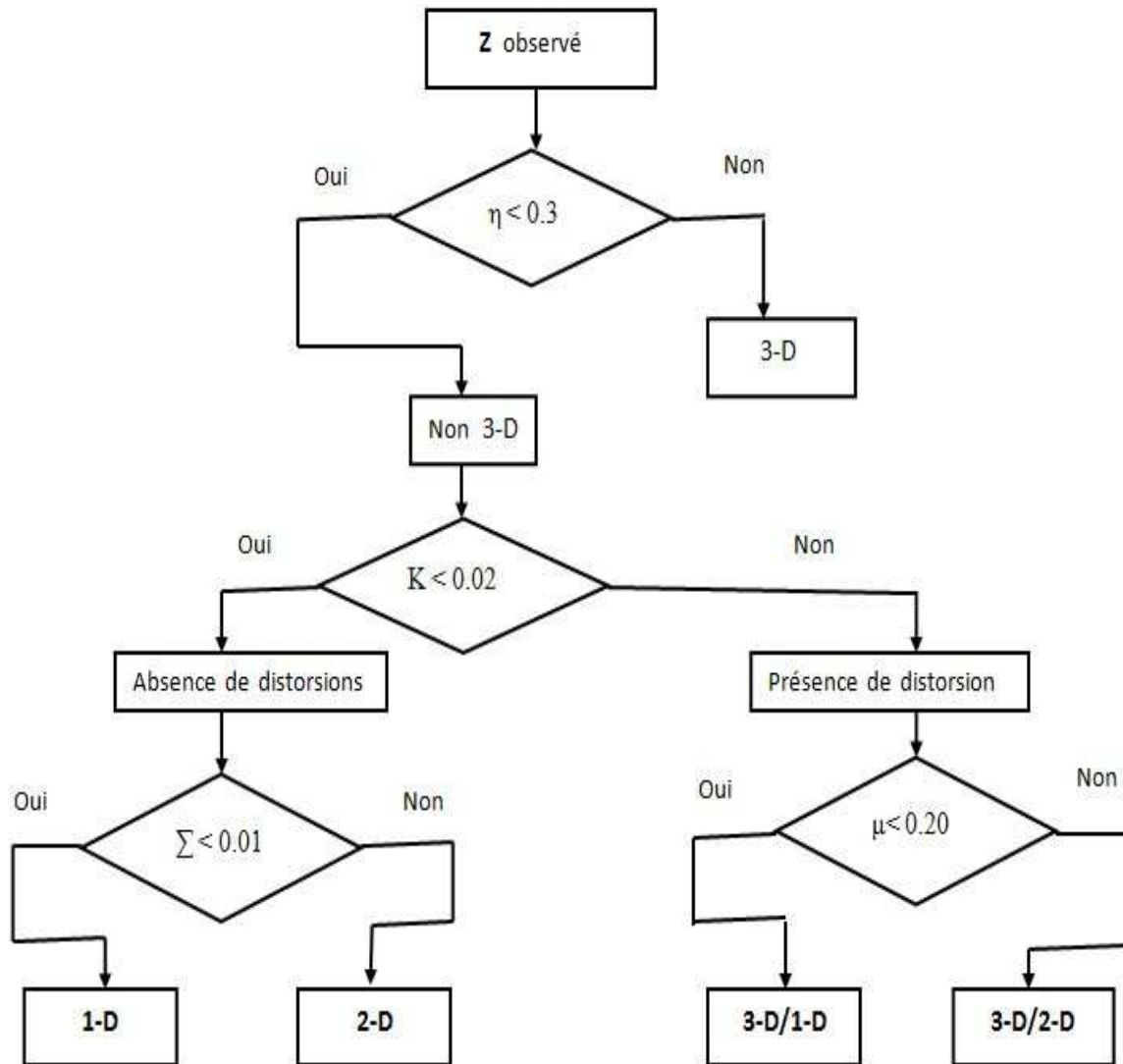


Figure V-2 : présentation sous forme d'organigramme de la méthode de Bahr (Bouziid, 2010)

V-2-Analyse du tenseur d'impédance par la méthode de Groom-Bailey (1989 et 1991).

V-2-1-Application :

Dans cette partie nous avons employé l'approche de Groom-Bailey (1989 et 1991), pour la détermination de la direction structurale, cette méthode est considérée comme étant moins sensible à la présence de bruits dans les mesures. De plus elle permet de faire une estimation plus robuste de l'angle du strike, car elle utilise la méthode des moindres carrés, tout en supposant un comportement gaussien pour le bruit.

Les angles du Strike sont calculés pour toutes les fréquences et pour l'ensemble des sondages, les résultats sont montrés dans des diagrammes en rosace, représentation assez naturelle et intuitive s'agissant de montrer des directions structurales. Afin de faire une comparaison entre les résultats obtenus par cette méthode et celle de la méthode de Caldwell (2004), nous avons gardé les mêmes bandes de fréquences pour lesquelles la structure régionale montre un comportement 2-D, les résultats sont donnés en annexe, dont un exemple est donné ci-dessous (Figure V-3).

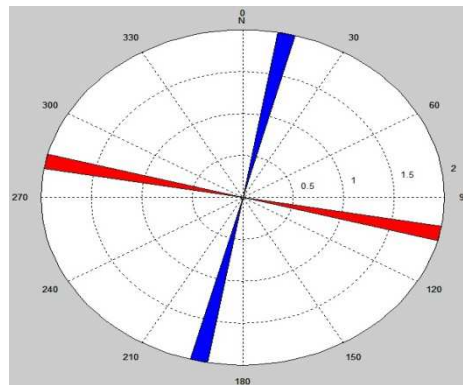


Figure V-3 : Exemple de la représentation en rosace des angles du Strike déterminés par la méthode de Groom-Bailey, de la bande (1800s-2900s) pour le sondage **ab06**.

V-2-2-Analyse et interprétation des résultats :

Les différentes représentations en rosace, qui représentent l'angle du Strike obtenus par la méthode de Groom-Bailey (1989 et 1991), pour l'ensemble des sondages.

Correspondant aux intervalles pour lesquelles la structure géologique régionale présente un comportement 2-D sont montés dans la figure V-4.

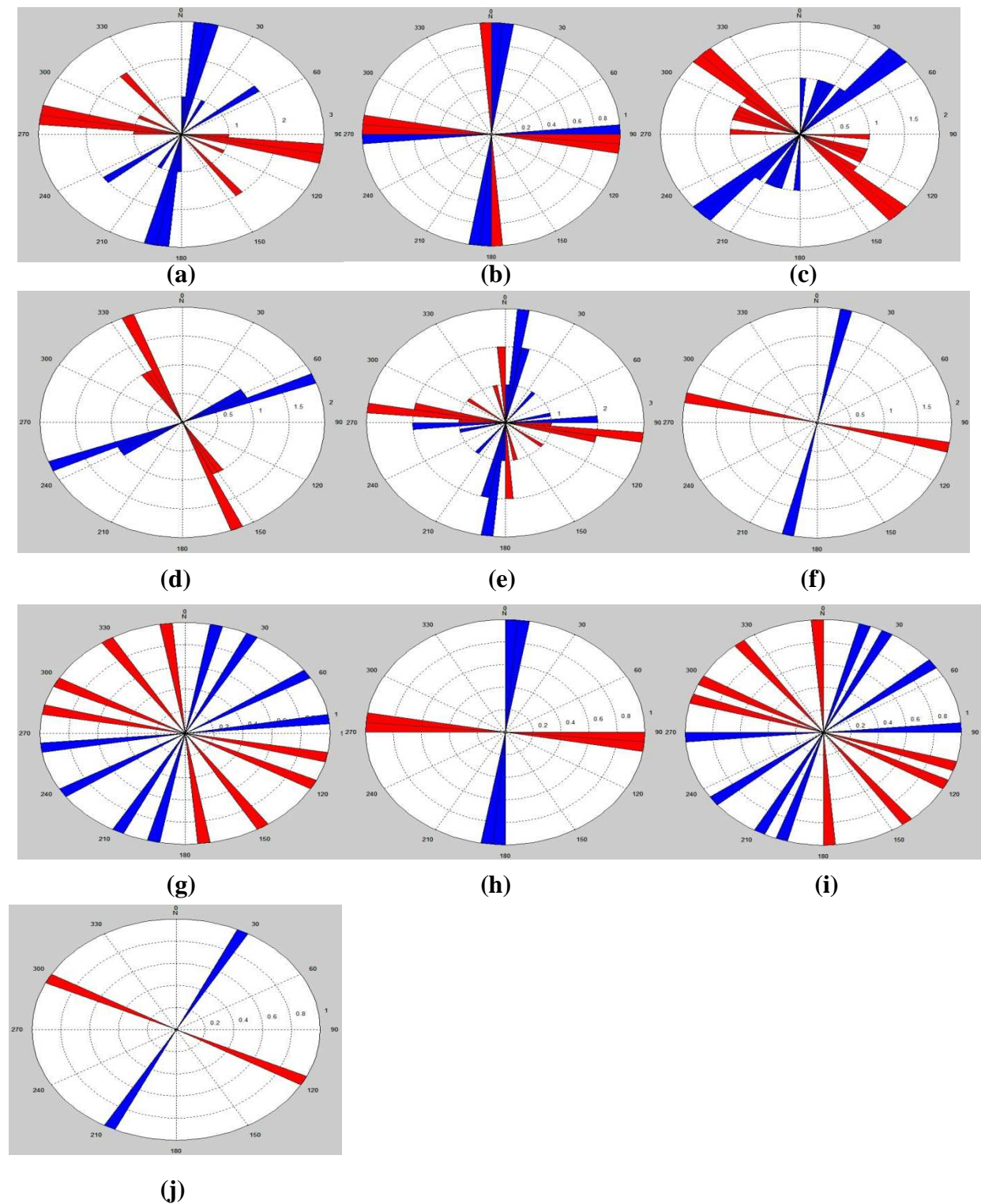


Figure V-4: Représentation en rosace des angles du Strike déterminés par la méthode de Groom-Bailey,(a) de la bande (500s-1200s) pour le sondage ab01,(b) de la bande (1000s-

1500s) pour le sondage **ab02**, (c) de la bande (200s-2000s) pour le sondage **ab03**, (d) de la bande (30s-60s) pour le sondage **ab04** ,(e) de la bande (500s-2900s) pour le sondage **ab05**, (f) de la bande (1800s-2900s) pour le sondage **ab06** ,(g) de la bande (1000s-1800s) pour le sondage **ab07** ,(h) de la bande (900s-1300s) pour le sondage **ab08**, (i) de la bande (100s-200s) pour le sondage **ab09**, (j) de la bande (2000s-2900s) pour le sondage **hog55**.

- **pour le sondage « ab01 »** : Nous avons une direction structurale dont la valeur est égale à 20°.
- **pour le sondage « ab02 »**: Nous avons deux directions structurales dont les valeurs sont 8° et 85°.
- **pour le sondage « ab03 »**: la structure régionale présente deux directions structurales qui sont 25° et 45°.
- **pour le sondage « ab04 »**: la structure régionale présente une direction structurale égale à 65°.
- **pour le sondage « ab05 »**: Il y a deux directions structurales dont les valeurs sont très différentes l'une à l'autre, on a une direction qui est plus au moins N-S, égale à 5°, quand à la deuxième direction, elle est quasiment E-W, qu'est égale à 85°.
- **pour le sondage « ab06 »**: Il y a une direction structurale dont la valeur est égale à 12°.
- **pour le sondage « ab07 »**: quatre directions structurales sont envisagées on a 15°, 28°, 62° et 81°.
- **pour le sondage « ab08 »**: Il y a une direction structurale qui est égale à 5°.
- **pour le sondage « ab09 »**: Qui est le sondage le plus proche de l'accident 4°50, nous avons quatre directions structurales qui sont 18°, 28°, 51° et 87°.
- **pour le sondage « hog55 »**: la structure régionale a une direction structurale égale à 28°.

Donc, en analysant toutes ces valeurs, on peut dire que nous avons une structure régionale 2-D, dont le Strike est dirigé dans la direction NE-SW.

V-3-Comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes d'analyse :

-La dimensionnalité de la structure régionale

Les résultats obtenus par la méthode de Bahr (1988 et 1991), montrent qu'il s'agit d'une structure régionale 2-D, et cela pour l'ensemble des sondages, et pour toutes les profondeurs tandis que les résultats obtenus par la méthode de Caldwell(2004), montrent ceci, seulement pour certaines profondeurs, mais le comportement d'une structure régionale 2-D reste le plus prépondérant. En principe les deux approches doivent donner Les mêmes résultats , car les deux sont basées sur l'analyse des paramètres calculés à partir de la phase du tenseur d'impédance sauf le skew de swif(K) pour la méthode de Bahr qui est calculé à partir des composantes du tenseur d'impédance MT. En effet, nous pouvons dire qu'il s'agit d'une structure régionale bidimensionnelle.

-L'angle du Strike

Afin de bien comparer les résultats obtenus par la méthode de Groom-Bailey (1989 et 1991), et celles obtenus par la méthode de Caldwell(2004), nous avons mis cote à cote et sondage par sondage les diagrammes, en rosace de l'angle du Strike, pour l'ensemble des sondages, les résultats sont montrés dans les figures de V-5 à V-14.

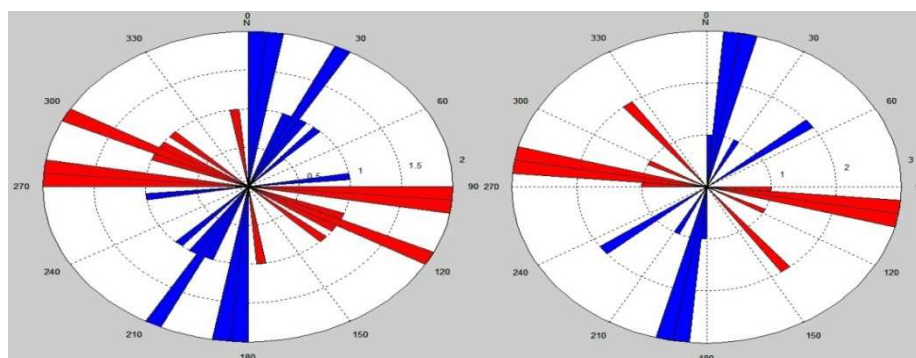


Figure V-5: les angles du Strike déterminés par la méthode de Caldwell(2004), (**à gauche**), et celles obtenus par la méthode de Groom-Bailey (1989 et 1991), (**à droite**), correspondants au sondage **ab01**.

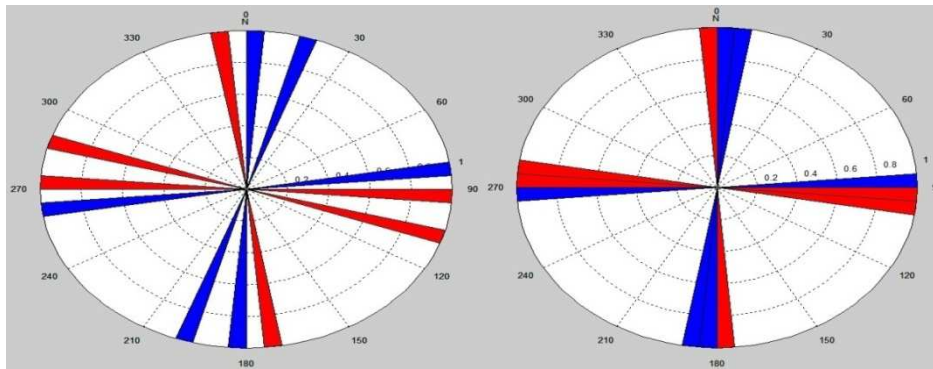


Figure V-6: les angles du Strike déterminés par la méthode de Caldwell(2004) (à gauche), et celles obtenus par la méthode de Groom-Bailey (1989 et 1991) (à droite), correspondants au sondage **ab02**.

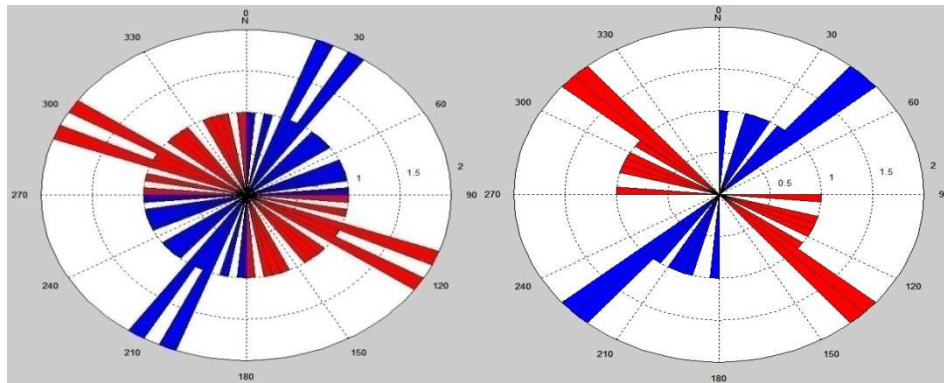


Figure V-7: les angles du Strike déterminés par la méthode de Caldwell(2004), (à gauche), et celles obtenus par la méthode de Groom-Bailey (1989 et 1991), (à droite), correspondants au sondage **ab03**.

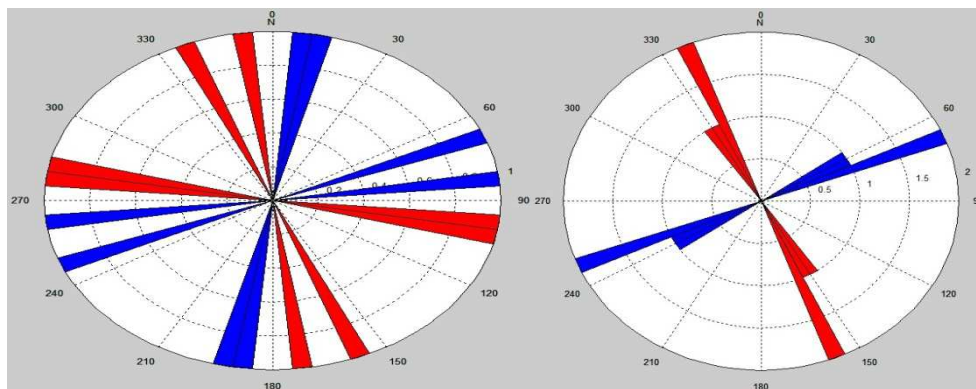


Figure V-8: les angles du Strike déterminés par la méthode de Caldwell(2004), (à gauche), et celles obtenus par la méthode de Groom-Bailey (1989 et 1991), (à droite), correspondants au sondage **ab04**.pour la bande (30s-60s).

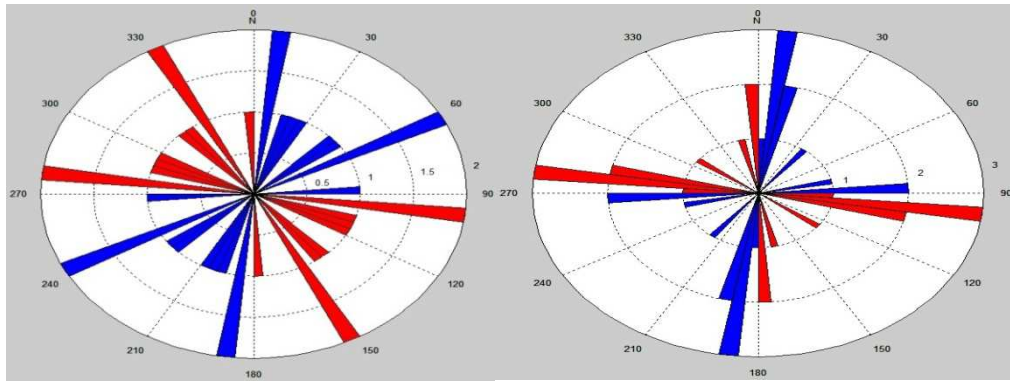


Figure V-9: les angles du Strike déterminés par la méthode de Caldwell(2004), (à gauche), et celles obtenus par la méthode de Groom-Bailey (1989 et 1991), (à droite), correspondants au sondage **ab05**.

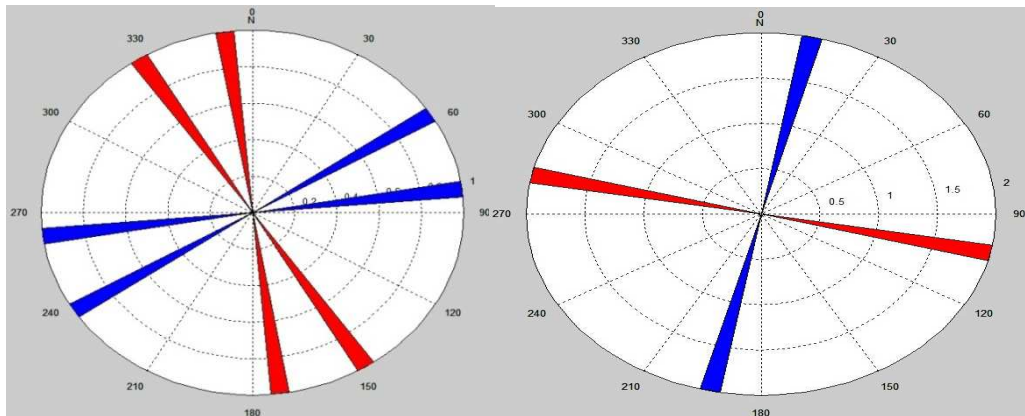


Figure V-10: les angles du Strike déterminés par la méthode de Caldwell(2004), (à gauche), et celles obtenus par la méthode de Groom-Bailey (1989 et 1991), (à droite), correspondants au sondage **ab06**.

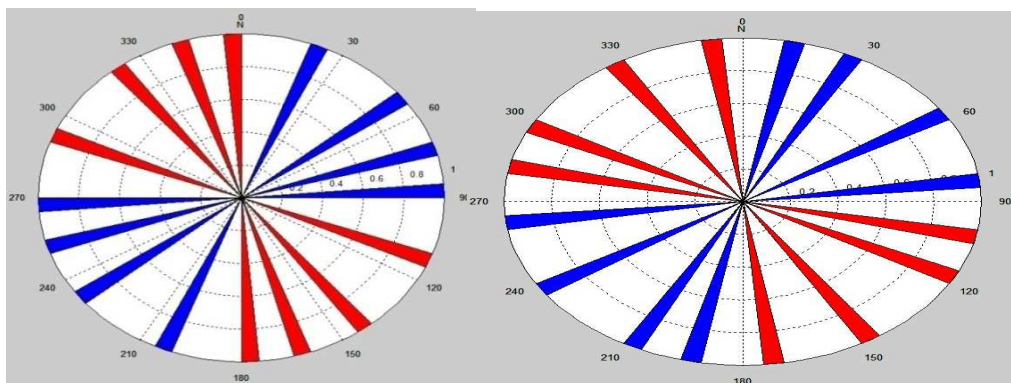


Figure V-11: les angles du Strike déterminés par la méthode de Caldwell(2004), (à gauche), et celles obtenus par la méthode de Groom-Bailey (1989 et 1991), (à droite), correspondants au sondage **ab07**.

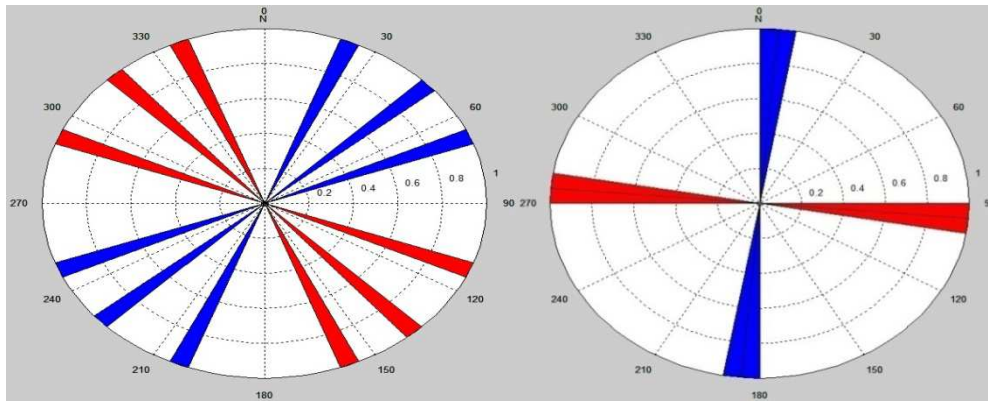


Figure V-12: les angles du Strike déterminés par la méthode de Caldwell(2004), (à gauche), et celles obtenus par la méthode de Groom-Bailey (1989 et 1991), (à droite), correspondants au sondage **ab08**.

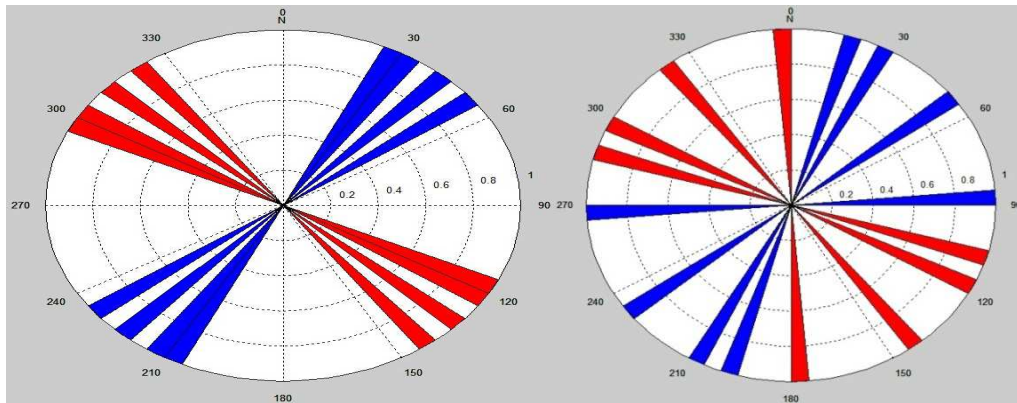


Figure V-13: les angles du Strike déterminés par la méthode de Caldwell(2004), (à gauche), et celles obtenus par la méthode de Groom-Bailey (1989 et 1991), (à droite), correspondants au sondage **ab09**

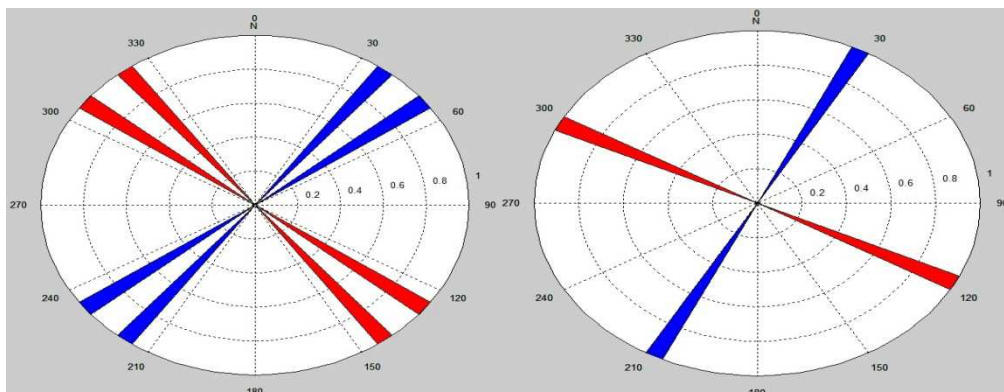


Figure V-14: les angles du Strike déterminés par la méthode de Caldwell(2004), (à gauche), et celles obtenus par la méthode de Groom-Bailey (1989 et 1991), (à droite), correspondants au sondage **hog55**.

En comparant, les différentes directions structurales, on peut dire que, pour les sondages **ab01**, **ab02**, **ab03**, **ab04**, **ab05**, **ab07** les deux méthodes ont donné les mêmes directions structurales qui sont respectivement **20°**, **8°**, **25°**, **65°**, **5°**, **28°**, ces angles du Strike sont considérés comme étant les vraies directions structurales. Alors quand aux sondages **ab06**, **ab08**, **ab09** et **hog55** les deux méthodes ont donné des directions structurales différentes.

Parmi les objectifs de la présente étude est l'apport de la méthode magnétotellurique à l'étude géologique et structurale du Hoggar en générale et à l'étude de l'accident géologique 4°50 en particulier, on peut dire là-dessus qu'au niveau de sondage **ab09**, considéré comme étant le sondage le plus proche de cet accident, que nous avons une structure régionale bidimensionnelle dont l'angle de Strike est dans la fourchette [20°-55°].

Conclusion

Conclusion

En conclusion, nous pouvons dire que le programme que nous avons mis au point ; peut apporter pas mal d'informations en terme d'analyse de la phase du tenseur d'impédance, et donc permet de faire une analyse minutieuse du tenseur d'impédance Magnétotellurique.

La méthode du tenseur de phase a donné des bons résultats sur le modèle synthétique, et sur les données réelles utilisées.

L'analyse des données magnétotelluriques de la région d'étude, par la méthode de Caldwell(2004) a permet de mettre en évidence l'existence d'une structure géologique régionale bidimensionnelle, ce qui est confirmé par les résultats obtenus par la méthode d'analyse de Bahr (1988 et 1991), cette structure régionale a une direction du Strike quasiment NE-SW, ce qui a été renforcé par les résultats obtenus par la méthode d'analyse de Groom-Bailey (1989 et 1991).

Au niveau da l'accident géologique 4°50, la structure géologique régionale manifeste un comportement géo-électrique bidimensionnel, avec une direction du Strike qu'est NE-SW.

Comme la méthode de Caldwell n'est pas sensible à la distorsion, c.-à-d. à l'existence des hétérogénéités superficielles, alors en termes de modélisation, on peut dire que cette méthode ne peut pas apporter beaucoup de chose, surtout pour modéliser la structure géologique régionale au niveau des courtes périodes ($T < 1s$), là où l'effet galvanique est dominant.

L'approche de (Groom & Bailey 1989,1991) et les autres approches similaires (zhang et al .1987 ; chakridi et al .1992 ;chave & smith 1994 ; smith 1995) d'analyse de distorsion permettent une estimation stable de la direction du strike à partir du tenseur d'impédance 2-D perturbé (qui contient du bruit) (Mc Meice & Jones (2001), quand à la méthode de Bahr (1988) et l'analyse par le tenseur de phase, la direction du strick peut être obtenue directement du tenseur d'impédance observé sans décomposition, c.-à-d. sans d'autres informations sur la structure du tenseur de distorsion.

Les méthodes électromagnétiques en générale, et la méthode magnétotellurique en particulier peut apporter, et améliore notre connaissance sur la structure géologique, ainsi que sur l'évolution tectonique et géodynamique de la région du Hoggar.

Bibliographies

Bibliographies

Bahr, K., 1988. Interpretation of the magnetotelluric tensor: regional induction and local telluric distortion, *J. Geophys.*, 62, 119-127.

Bahr, K., 1991. Geological noise in magnetotelluric data: a classification of distortion types, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 66, 24-38.

Bouziid, A., 2010, Apport des données magnétotelluriques à l'étude géodynamique du Hoggar, thèse de doctorat d'état, USTHB, Alger, Algérie.

Caldwell, T. G., Bibby, H. M. and Brown, C., 2004. The magnetotelluric phase tensor, *Geophys. J. Int.*, 158, 457-469.

Djeddi, M., 1999, nouvelles méthodes d'interprétation 3D des données électromagnétiques, thèse de doctorat d'état, USTHB, Alger, Algérie.

Groom, R. W. and Bahr, K., 1992. Corrections for near surface effects: decomposition of the magnetotelluric impedance tensor and scaling corrections for regional resistivities: a tutorial, *Surv. Geophys.*, 13, 341-379.

Groom, R. W. and Bailey, R. C., 1989. Decomposition of the magnetotelluric tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion, *J. Geophys. Res.*, 94, 1913-1925.

Groom, R.W. and Bailey, R. C., 1991. Analytical investigations of the effects of near surface three-dimensional galvanic scatterers on MT tensor decomposition, *Geophysics*, 56, 496-518.

Groom, R.W., Kurtz, R.D., Jones, A.G and Boerner, D.E., 1993, A quantitative methodology to extract regional magnetotelluric impedances and determine the dimension of the conductivity structure, *Geophys. J. Int.*, 115, 1095-1118.

R. Black, L. Latouche, J.P. Liegeois, R. Caby, J.M. Bertrand, Pan-African displaced terranes in the tuareg shield (central sahara), *Geology* 22(1994)641-644.

Bibliographies

R.Caby,J.Monie,Neoproterotic subductions and differential exhumation of western Hoggar(southwest Algeria):New structural,petrogeological and geochronological evidence,J.Afr.Earth sci.37(2003)269-293.

Vozoff, K., 1972, the magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins, Geophysics, 37,98-141.

Vozoff K.,Magnetotelluric method, (chap.8), in Electromagnetic methods in applied geophysics –applications Part B, Nabighian.