

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE
FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE DE LA GEOGRAPHIE ET DE
L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE



THESE DE MAGISTER
SPECIALITE : GEOPHYSIQUE

Présentée par : ABBES Khadidja

TRANSFORMATION DES DONNEES
ELECTROMAGNETIQUES DE
SUBSURFACE

Soutenue publiquement le : 13 décembre 2001 Devant le jury composé de :

M. HADJ BENHALLOU
M. DJEDDI Mohamed
M. BAKER Aziz Haydar
M. HAMOUDI Mohamed

Professeur/USTHB
Maître de conf./STHB
Professeur/USTHB
Maître de conf./USTHB

Président.
Directeur de Thèse.
Examineur.
Examineur.

Remerciement

Les moissons de l'esprit sont le fruit d'un labeur au quotidien, irrigué, de la sueur précieuse du travail et du courage de mener à terme une œuvre à laquelle ont croût et notre âme y adhéré.

Mais, comme le travail n'est que transmission dans le temps du savoir des uns aux autres, je ne puis que dire toute ma reconnaissance et mon respect à M. Djeddi, mon directeur de thèse, qui a, par ses conseils patients et éclairés, guidé mes pas sur le long chemin du Savoir.

Mes sentiments de gratitude et de reconnaissance vont à M. Baker qui a su par ses conseils, ses discussions franches et son expérience m'apporter une aide précieuse.

Je remercie, M. Hadj. Benhallou pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury et M. Hamoudi qui m'a également fait l'honneur de juger mon modeste travail. Je les en remercie grandement.

Sans pour autant oublier de remercier tous les enseignants de la faculté F.S.T.G.A.T ainsi que tout le personnel du centre de recherche appliquée au génie parasismique en particulier M. Laouimi et M. Bensalem pour leur soutien moral, leur compréhension et pour la confiance de laquelle ils m'ont investi et avec lesquels j'espère avoir un parcours riche et constructif.

Introduction.....	1
Chapitre I	
Méthode VLF	
I.1. Théorie élémentaire de l'électromagnétisme.....	3
I.1.1 Equations de Maxwell	3
I.1.2 Equations d'ondes.....	6
I.2. Méthode (VLF)	8
I.2.1. Introduction.....	8
I.2.2. Principe de la méthode VLF.....	10
I.2.3. Emetteurs VLF.....	12
I.2.4. Signal VLF et bruits.....	13
I.2.4.1. Les ondes électromagnétiques.....	13
I.2.4.2. Comment s'effectue la propagation des ondes VLF dans l'atmosphère ?.....	15
I.2.5. Facteurs affectant la propagation des ondes VLF.....	16
I.2.6. Bruit atmosphérique à très basse fréquence.....	17
Chapitre II	
Déconvolution d'Euler	
II.1. Effets statiques.....	20
II.2. Traitements applicables aux champs.....	20
II.3. Filtre de dérivation.....	20
II.4. La déconvolution d'Euler.....	22
II.4.1. Equation d'Euler.....	22
II.4.2. Application de la déconvolution d'Euler aux données synthétiques.....	24
II.4.2.1. Présentation du modèle.....	25
II.4.2.2. Application à la racine carré de la résistivité ($\sqrt{\rho}$).....	26
II.4.2.2.1. N inconnu.....	26
II.4.2.2.2. N connu.....	27
II.4.2.3. Application à l'inclinaison.....	29

II.4.2.3.1. N connu.....	29
II.4.2.3.2. N inconnu.....	31
II.4.3. Critère de sélection.....	32
II.4.4. Efficacité du critère en variant les dimensions.....	38
II.4.4.1. Paramètres du modèle.....	38
II.4.5. Calcul de l'extension vertical (ZL).....	42
II.4.5.1. Présentation du modèle.....	42
Chapitre III	
Pouvoir de résolution latéral	
III.1. Présentation des modèles.....	43
III.1.1. Cas de deux structures distantes.....	43
III.1.2. La réponse du corps épais.....	49
III.2. Limite de distinction entre un corps épais et deux corps distants.....	51
Chapitre IV	
Etude des corps inclinés	
IV.1. Application aux cas synthétiques.....	57
IV. 1.1. Calcul du pendage.....	61
IV.1.2. Variation de la réponse VLF-EM avec l'origine de la rotation..	66
IV.1.2. 1. Rotation par rapport au centre du corps.....	66
IV.1.2. 2. Rotation par rapport au toit du corps.....	66
IV.1.3. Application du filtre de dérivation.....	67
IV.1.3.1. Calcul des extensions dans le plan horizontal.....	67
IV.1.3.2. Calcul de l'extension verticale (ZLP).....	72
Conclusion.....	73
Bibliographie.....	75

Introduction

Encore récemment, les géologues étaient épouvantés par la géophysique. De part leur fibre naturaliste, ils ne croyaient pas à cette science hybride à la fois ouverte aux mathématiques et prétendant représenter le sous-sol. Mais les progrès enregistrés par cette discipline sont tels que plus personne n'oserait actuellement mettre en doute ses apports immenses, illimités et imposants pour l'exploration du subsurface.

L'aboutissement est remarquable dans divers domaines tels que le génie civil, la géotechnique, l'archéologie, l'hydraulique et encore d'autres, l'électromagnétisme, en plein développement et encore d'un coût assez réduit, s'est bien répondu, conduisant à la reconnaissance des terrains de faible profondeur.

Ce travail est une contribution à l'amélioration des techniques d'interprétations quantitatives des données électromagnétiques précisément ceux de la VLF-EM par l'application des nouvelles méthodes de traitement.

Il s'appuie essentiellement sur 04 chapitres :

Le cheminement passe le premier chapitre (I) par la théorie élémentaire de l'électromagnétisme basée sur les équations de Maxwell, les ondes électromagnétiques, leurs sources, les facteurs affectant la propagation des ondes, la méthode à très basse fréquence (VLF).

Dans les trois chapitres qui suivent, nous montrons les transformations susceptibles de mettre en évidence certains paramètres géométriques, la profondeur au toit, le pendage, la profondeur au toit ainsi que les dimensions des structures, en utilisant des méthodes de traitements, à savoir, la déconvolution d'Eleur et la méthode du filtre de dérivation et certains abaques.

La méthode de déconvolution d'Euler sera donc exposée dans le deuxième (II) chapitre. Cette méthode de traitement, principalement utilisée pour traiter des données magnétiques et gravimétriques, fait l'objet d'une nouvelle application vu qu'elle sera utilisée pour transformer des données électromagnétiques précisément les données VLF-EM en vue de localiser le centre des structures. Puisque, elle base sur l'équation d'homogénéité d'Euler où on voit apparaître les coordonnées au centre des structures et leur gradients du champ.

Le chapitre trois (III), nous avons évoqué les problèmes d'hétérogénéité ou le cas d'une succession latérale de couche qui peuvent, dans certain cas, fausser l'interpréteur. Nous avons essayé de remédier à ces problèmes en utilisant la technique du filtre de dérivation,.

Dans le dernier chapitre, nous avons essayé de restituer l'image d'un terrain qui comporte des structures inclinées, en utilisant à nouveau la méthode du filtre dérivé. Cette dernière sera appliquée aux données VLF-EM afin de déterminer, dans les trois directions, les dimensions des structures. Par ailleurs l'évaluation des pendages s'est fait à l'aide des abaques.

Nous terminerons cette étude par une conclusion.

I.1. Théorie élémentaire de l'électromagnétisme :

I.1.1 Equations de Maxwell :

Les équations de Maxwell constituent la base fondamentale de l'électromagnétisme, elles expliquent les phénomènes de propagation électromagnétique et montrent le caractère indissoluble des phénomènes électriques et magnétiques puisqu'elles relient le champ électrique \vec{E} et le champ magnétique \vec{B} par les relations suivantes :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{I.1})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

\vec{J} : vecteur densité de courant électrique (A/m^2).

\vec{E} : vecteur champ électrique (V/m).

\vec{B} : vecteur induction magnétique [**Tesla (T)**].

\vec{H} : vecteur champ magnétique (A/m).

\vec{D} : vecteur induction électrique (C/m^2).

L'équation (I.1) correspond à la formulation mathématique de la loi de Faraday, à savoir, qu'une variation temporelle du flux total à travers un contour fermé engendre une f.e.m induite (Fig. I.1). La seconde équation (I.2), loi d'Ampère, traduit qu'un champ électrique variable dans le temps est source de champ magnétique (Fig. I.2).

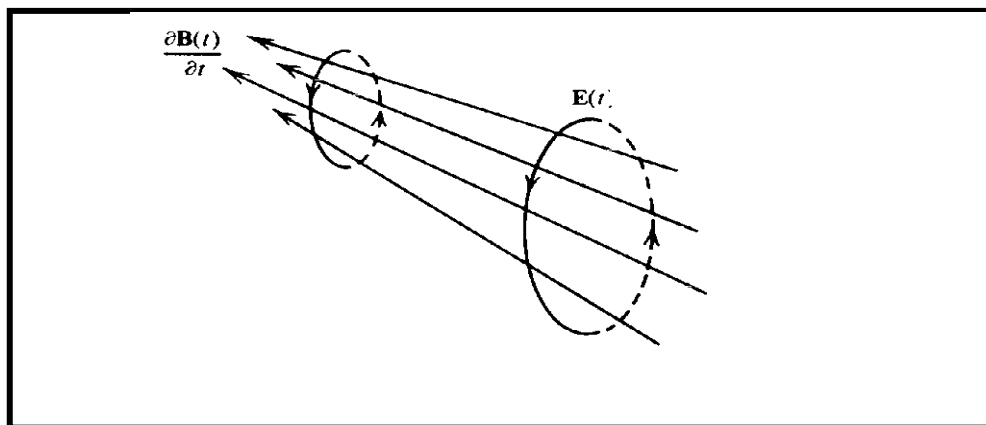


Fig.I.1. Champ électrique de l'équation (I.1).

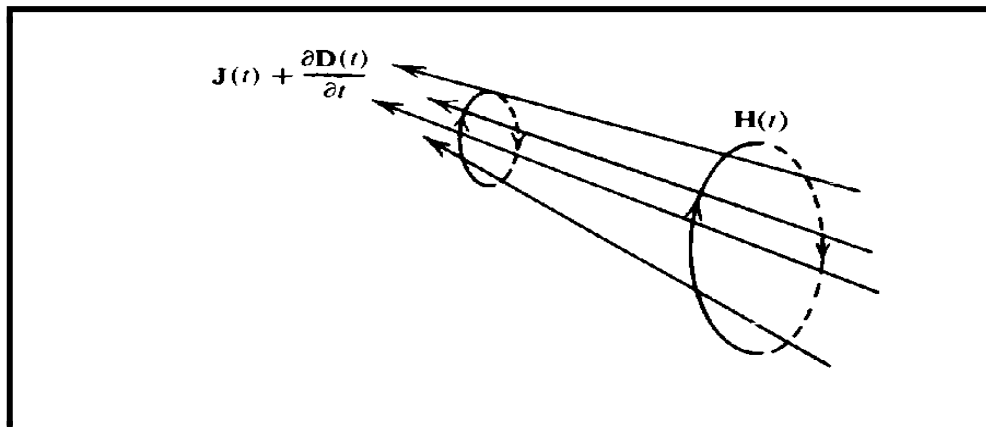


Fig.I.2 Champ magnétique de l'équation (I.2).

Sachant que, $\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{A} = 0$ et en prenant la divergence de (I.1), nous obtenons :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\vec{\nabla} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) = 0 \quad (\text{I.1.a}).$$

Généralement \vec{B} est fonction du temps, il s'ensuit que divergence de \vec{B} est indépendante du temps, de (I.1.a) nous écrivons alors :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{I.3}).$$

Et la divergence de (I.2) donne :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \vec{\nabla} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (\text{I.2.a}).$$

Nous savons également que la divergence de la densité de courant est équivalente à la densité de charge (Q).

De l'équation (I.2.a) nous aurons :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -\frac{\partial Q}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (\text{I.2.b})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \cdot \vec{D} - Q) = 0 \quad (\text{I.2.c})$$

D'où :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = Q \quad (\text{I.4})$$

Avec :

Q : densité de charge du milieu (C/m^3).

Dans un milieu homogène et isotrope $Q = 0$, nous avons :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{J} = \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (\text{I.5})$$

En outre des équations (I.4) et (I.5), donnant la relation entre le déplacement et le champ électrique, nous avons également (dans le vide) les relations suivantes :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad \vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (\text{I.6})$$

Où :

$$\epsilon_0 = 1/(36\pi \cdot 10^9) \text{ faraday/m.}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ henry/m.}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \quad \vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{I.7}).$$

avec :

μ : perméabilité magnétique du milieu.

ϵ : constante ou permittivité diélectrique du milieu.

σ : conductivité électrique du milieu.

I.1.2 Equations d'ondes :

Les équations de Maxwell conduisent à l'équation de propagation d'onde électromagnétique. Dans un milieu homogène et isotrope, les équations (I.1) et (I.2) peuvent se réduire à :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (\text{I.8})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = - \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} \quad (\text{I.9})$$

En appliquant le rotationnel à l'équation (I.8) et sachant que ;

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{A} = \vec{\nabla} \vec{\nabla} \cdot \vec{A} - \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \vec{A} \quad (\text{I.10}).$$

Nous aurons alors :

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{I.11})$$

Dans un milieu homogène et isotrope de conductivité σ , de perméabilité μ et de constante diélectrique ε , le vecteur champ électrique \vec{E} associé à la propagation d'une onde plane vérifie l'équation (I.11). Le champ d'induction magnétique \vec{B} vérifie également l'équation (I.11).

Les membres de droite de l'équation (I.11) est composé de deux termes, le premier est le terme de propagation, le second correspond à la diffusion.

Dans le cas des champs alternatifs, ondes électromagnétiques harmoniques, le champ électrique \vec{E} est une fonction harmonique du temps de forme $e^{i\omega t}$ donc :

$$\vec{E} = |\vec{E}|_{\max} e^{i\omega t}$$

Dans un milieu homogène et isotrope l'équation (I.11) devient :

$$\nabla^2 \vec{E} = i\sigma\mu\omega\vec{E} - \omega\varepsilon\mu\vec{E} \quad (\text{I.12})$$

I.2. Méthode (VLF) :

I.2.1. Introduction :

La fin du dix-neuvième siècle et le début du vingtième siècle vit apparaître l'une des très importantes et grandes découvertes scientifiques, qui consiste en la propagation des ondes électromagnétiques. Les ondes électromagnétiques ont largement contribué dans divers domaines tels que, la télécommunication, les systèmes de navigation, le radar, la télédétection et bien d'autres. Wait, était l'un des premiers à développer ses recherches sur la propagation des ondes électromagnétiques (d'après McNeil et Labson, 1991). La théorie de la propagation des ondes EM est basée sur les équations de MAXWELL, stipulées par James Clerk MAWXELL en 1891.

L'introduction des ondes EM pour l'exploration du sous-sol remonte aux années trente. Tandis que son introduction en géophysique date des années soixante, suite à l'observation de Paal, qui a prouvé que les ondes radio à très basses fréquences (VLF) peuvent être utilisées pour localiser des structures conductrices. Cela, a été d'un très grand effort pour l'exploration minière, en raison des développements qu'a connus la méthode et à la commercialisation d'un équipement initialement conçu à la mesure de champ au sol.

Le premier instrument de mesure VLF, permettant d'effectuer des levés de champ au sol fût mis sur le marché en 1964, grâce Paterson et Ronka . Présentement, d'autres équipements de mesure en aéroporté ont vu le jour et sont en exploitation.

Initialement, tout l'équipement de mesure VLF (au sol ou en aéroporté) était destiné à mesurer soit l'inclinaison, soit l'intensité des composantes verticale ou horizontale du champ magnétique. Ces grandeurs, mesurées, permettent la détection des contrastes de conductivités. En outre, une autre technique a été adoptée en 1968, par Collet et Becker (Collet et Becker, 1968 in (Djeddi, 1999)) appelée Radiohm ou VLF-MT, donnant naissance à un instrument qui mesure directement l'impédance dont la résistivité peut être dérivée. Contrairement à la méthode VLF-EM, la VLF-MT peut être utilisée pour cartographier des terrains même très résistants.

En 1974, TISTELY a introduit un émetteur VLF portatif, comme supplément aux émetteurs VLF usités. L'intérêt de ces émetteurs portatifs apparaît quand le champ émis par les émetteurs VLF usuels, n'est pas perpendiculaire à la direction de l'allongement des structures (McNeill and Labson, 1991).

Parmi, les instruments utilisés pour effectuer des levés au sol, nous citons ceux de chez Geonics, EM16 utilisé largement à travers le monde entier afin, de cartographier la résistivité des terrains. Récemment, de nouveaux appareils ont été fabriqués tels que, WADI de ABEM, OMNI VI de EDA, VLF-3 et VLF-4 de Scintrex et le VLF-2 de Phoenix.

L'information qualitative que fournissait la méthode VLF, est restée toujours valable en raison des avantages que présentait la méthode en terme d'instrumentation, tels que la facilité, la simplicité et la rapidité de manipulation et les prix réduits avec lesquels les levés se faisaient.

En outre, bien que les mesures effectuées par cette méthode ne correspondent pas à une évaluation directe des paramètres des terrains (conductivité, position et dimensions etc..) on peut dire que la méthode VLF est passée de l'ère "*interprétation qualitative*" vers l'ère de "*interprétation quantitative*", grâce au développement de nouvelles techniques de traitement qui permettent d'affiner et d'enrichir l'interprétation.

I.2.2. Principe de la méthode VLF :

la méthode VLF fait partie des méthodes de prospection électromagnétiques qui mesurent un champ résultant de la combinaison des directions d'un champ primaire et d'un ou plusieurs champs secondaires. En effet, la grandeur mesurée, en méthode VLF, est l'angle d'inclinaison plus précisément l'angle d'inclinaison de la bobine réceptrice par rapport à horizontale. D'autant plus que, le champ primaire, utilisé, est approximativement horizontal.

Les récepteurs VLF détectent des signaux correspondant à l'inclinaison (composante en phase) et la composant en quadrature à l'aide de deux bobines perpendiculaires.

Le propagation du champ primaire dans un sous-sol renfermant un corps conducteur, induit des courants tourbillonnaire, dans ce dernier, produisant ainsi un champ secondaire. Le champ résultant est elliptiquement polarisé (le champ primaire diffère du champ secondaire aussi bien en amplitude qu'en phase) puisque il décrit, dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation, une ellipse appelée ellipse de polarisation (Fig. I.3).

En VLF l'inclinaison de l'ellipse (θ), correspond à l'angle formé par le grand axe de l'ellipse (a) et l'axe horizontal (x) tel qu'il est montré par figure (I.3), est approximativement égale à la composante réelle du rapport H_z/H_x et elle appelée aussi composante en phase et concernant l'excentricité correspond à la composante imaginaire du rapport H_z/H_x et l'équation de l'angle d'inclinaison est donnée (d'après Smith et Ward (1974) dans (McNeill and Labson, 1991)) par :

$$\tan(2\theta) = \frac{2(H_z/H_x)\cos\phi}{1 - (H_z/H_x)^2} \quad (\text{I.13})$$

et l'excentricité est donnée par :

$$\varepsilon = \frac{b}{a} = \frac{H_z H_x \sin\phi}{|H_z e^{i\phi} \sin\theta + H_x \cos\theta|^2} \quad (\text{I.14})$$

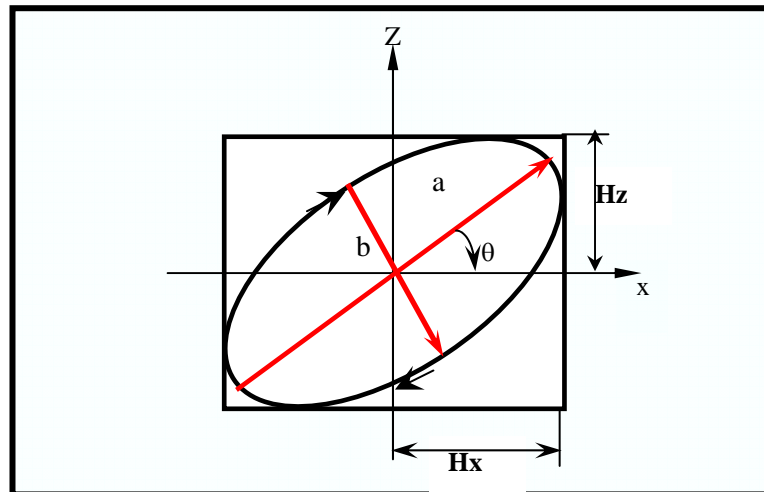


Fig. I.3. Ellipse de polarisation.

I.2.3. Emetteurs VLF :

La méthode VLF se classe dans la catégorie des méthodes actives puisque, la source principale du champ EM est artificielle. En effet, le signal émis est produit par de puissants émetteurs fonctionnant à très basse fréquence 15 à 30 kHz, très éloignés des sites de mesure.

L'émetteur, est une antenne ouverte sur l'espace dans lequel, rayonne de l'énergie produisant ainsi, en un point M de l'espace deux champs orthogonaux, l'un électrique l'autre magnétique.

Le premier émetteur VLF a été conçu entre 1910 et 1912, par les américains, dont la destination première était militaire (contact avec les sous-marins).

Les principaux émetteurs VLF sont en nombre de 11, repartis à travers le monde comme suit ;

- Ceux du continent américain sont NAA, NLK, NSS, NAU et NPM.
- Les stations du continent Européen sont BGR, UMS, JXZ et FUO.
- L'émetteur NWC revient aux Australiens.
- Le NDT de l'Asie se situe au Japon, précisément à Yosami.

L'émetteur ou l'antenne ne peut pas avoir n'importe quelle longueur. Lorsque l'antenne est verticale, reliée à la terre, le sol agit comme réflecteur et l'antenne entre en résonance pour une longueur d'onde égale à 4 fois sa longueur (antenne quart d'onde). En réalité, la longueur réelle de l'antenne est plus grande de 5% environ. Les émetteurs VLF tendent à être de grandes structures, compliquées et chères.

En VLF, puisque la longueur d'onde est d'environ 15 Km., les antennes d'émissions monopolaires sont électriquement très courtes (même avec une hauteur de 300 m). De ce fait l'introduction d'un autre fil au sommet de l'antenne est indispensable, afin d'augmenter la capacité d'alimentation. La puissance rayonnée est donnée par la relation suivante :

$$P = 7 \cdot 10^{-13} V^2 C^2 h_e^2 f^4 \quad (\text{I.14})$$

Avec ;

V : la tension à travers l'antenne.

C : capacité de l'antenne.

h_e : hauteur efficace (approximativement égale à la hauteur réelle de l'antenne).

A ses débuts, la méthode VLF présentait un inconvénient majeur de maîtrise d'émission qui pouvait cesser, sans prévenir, en fonction des pays possédant les puissants émetteurs. A présent ce problème n'existe plus et les émetteurs sont devenus plus pratiques, puisque ils travaillent avec un type de fréquence qui assure continuellement l'émission.

I.2.4. Signal VLF et bruits :

I.2.4.1. Les ondes électromagnétiques :

La liaison entre l'émetteur et le récepteur s'établit grâce à la propagation des ondes rayonnées par une antenne, elle-même excitée par un courant à haute fréquence. L'onde est une perturbation qui affecte un milieu initialement au repos, la propagation de cette onde se traduit par une modification périodique du milieu.

En un point de l'espace soumis à l'action d'une onde électromagnétique, règnent à la fois, un champ électrique E et un autre magnétique B . Ces deux champs sont inséparables, c'est pourquoi, on parle de champ électromagnétique, comme le montre la figure I.1.

La forme des ondes générées par l'antenne peuvent être soit planes (zones lointaines) soit sphériques (à proximité de l'antenne), la vitesse de propagation de l'onde dans l'espace est d'environ 300.000 km/s.

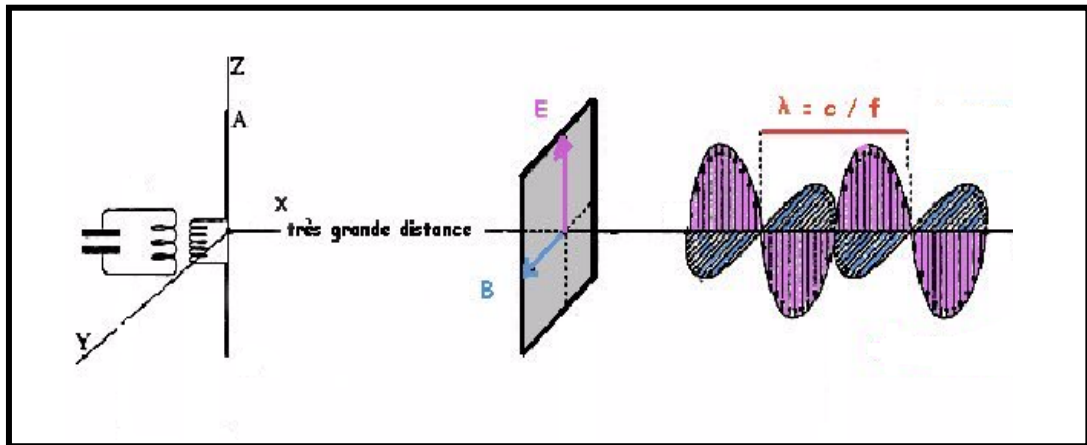


Fig. I.4. Propagation d'onde et composantes du champ électromagnétiques.

On définit une onde par sa fréquence (f) ou par sa longueur d'onde (λ). Ces deux grandeurs sont liées entre elles par la relation :

$$\lambda = C/f \quad (\text{I.15})$$

Où :

λ : la longueur de l'onde.

C : vitesse de propagation.

f : la fréquence.

I.2.4.2. Comment s'effectue la propagation des ondes VLF dans l'atmosphère ?

Si on considère que, dans une atmosphère uniforme la propagation des ondes s'effectue en ligne droite, puisque la surface de la terre étant approximativement sphérique, comment la détection des ondes est-elle permise sur de longues distances? sachant que les ondes peuvent parcourir des distances qui dépassent les 10.000 Km.

Le récepteur (Fig. I.5) reçoit essentiellement :

- Soit des ondes directes provenant de l'émetteur.
- Soit des ondes réfléchies.

On parle d'onde directe, quand la distance émetteur-récepteur n'est pas importante.

Par contre la réflexion intervient quand la distance émetteur-récepteur est importante.

A quoi est due la réflexion ? la réflexion est permise grâce aux électrons libres circulant dans l'ionosphère, ces électrons agissent comme une couche réfléchissante des ondes, comme le montre d'ailleurs la figure (I.5).

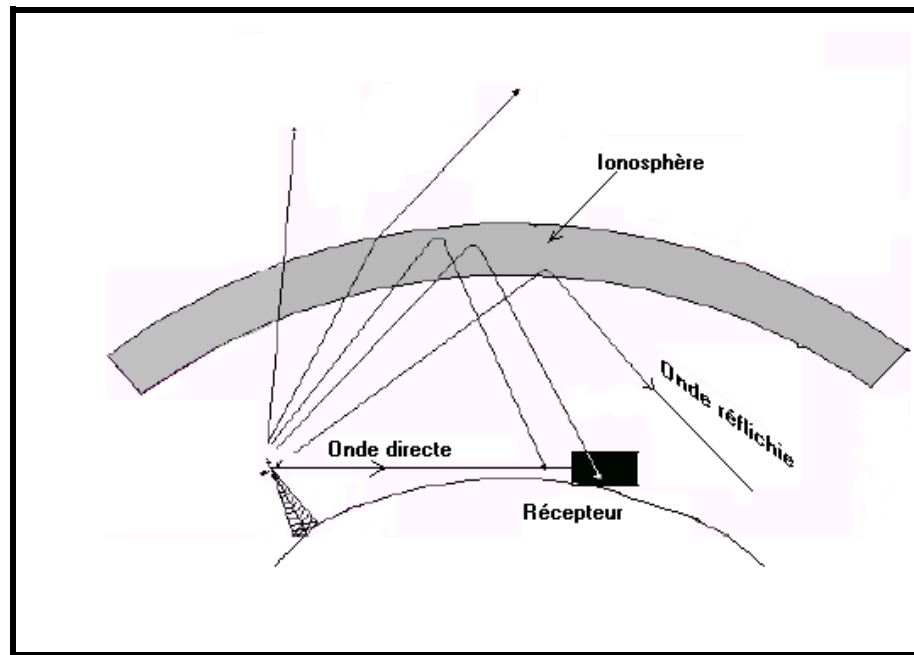


Fig. I.5. Réflexion des ondes par l'ionosphère.

1.2.5. Facteurs affectant la propagation des ondes VLF :

En traversant l'espace, l'onde subit de nombreuses perturbations. Dans l'atmosphère, les caractéristiques physiques de l'air entraînent de légères variations dans le mouvement ondulatoire lors de la propagation. En outre, les orages ou les perturbations électriques produisent également des irrégularités dans la propagation.

Le phénomène de propagation des ondes est un sujet très compliqué, puisque différents mécanismes le régissent. Entre les antennes d'émission et de réception il y a un ensemble d'obstacles. Les obstacles et les couches rencontrés vont, réfléchir, réfracter, diffracter, diffuser l'onde qui se propage. Ces effets vont provoquer l'atténuation qui fait affaiblir le champ initial. L'énergie de l'onde est donc atténuée avec la distance. En général, le taux d'atténuation est moins important la nuit qu'au cours de la journée (McNeill and Labson, 1991).

Des cartes en isoaleur d'intensité du champ électrique ont été tracées par Hauser et *al* (dans McNeill, 1991). Parmi les 11 émetteurs, nous avons choisi la station de Rughy (GBR) afin de montrer la répartition du signal émis par cette station, comme le montre d'ailleurs la figure (I.6). Les zones hachurées et délimitées par la courbe d'isoaleur 54 db correspondent aux régions où la détection des signaux peut être meilleure.

1.2.6. Bruit atmosphérique à très basse fréquence :

Le bruit constitue un problème important pour tous les récepteurs, chaque type de bruit se caractérise par une cause spécifique. Un filtrage ou un blindage insuffisant du récepteur peut être une cause de bruit qui se mélangera au signal utile. Ce bruit, généré par le récepteur lui même, limite la gamme de réception des signaux VLF. Ces bruits peuvent être éliminés par une conception et une construction correcte des appareils.

Dans un récepteur bien conçu la source principale de bruit n'est qu'externe à l'instrument, elle peut être due au fonctionnement d'un équipement électrique à proximité. Mais, le plus souvent, ils sont générés par les champs électromagnétiques émis par les éclairs (foudres) atmosphériques libérées localement ou à distance. Des ondes, dues à de telles perturbations atmosphériques, peuvent traverser des milliers de kilomètres en étant relativement peu atténuées. Puisque l'activité des orages change avec la situation géographique et avec le temps, par conséquent les bruits détectés.

L'activité des orages se concentrent généralement, dans les régions suivantes :

1. Amérique centrale.
2. L'Afrique centrale.
3. Le sud-est de l'Archipel asiatique.

Ajoutant à cela la variation diurnes (journalière) où l'activité des orages se déplace à travers la surface de la terre de l'est vers l'ouest suivant ainsi le passage de l'après-midi. Quand, l'interférence des radiations génère un flux de courant vertical, durant la libération d'une foudre

Les radiations à proximité d'un orage tend à être très aiguës (piquant). Reflétant ainsi l'influence d'une foudre libérée. La radiation d'un orage distant peut inclure l'effet d'autres orages et l'amplitude tend à avoir une distribution gaussienne.

Par conséquent, et vu tous les facteurs précédemment cités, il sera facile à admettre et à comprendre que la variation temporelle et spatiale du bruit est clairement évidente.

Il y a presque toujours des bruits et il a été montré que le comportement ébruité diminue lentement pendant la nuit à un minimum qui a lieu habituellement à environ 8h.00 (Fig. I.7 "a"), pour croître assez rapidement à un maximum à environ 16h.00 (Fig. I.7 "b"), avant de diminuer encore.

Il est recommander aux géophysiciens de faire des levés vers les premières heures de la matinée avant midi.

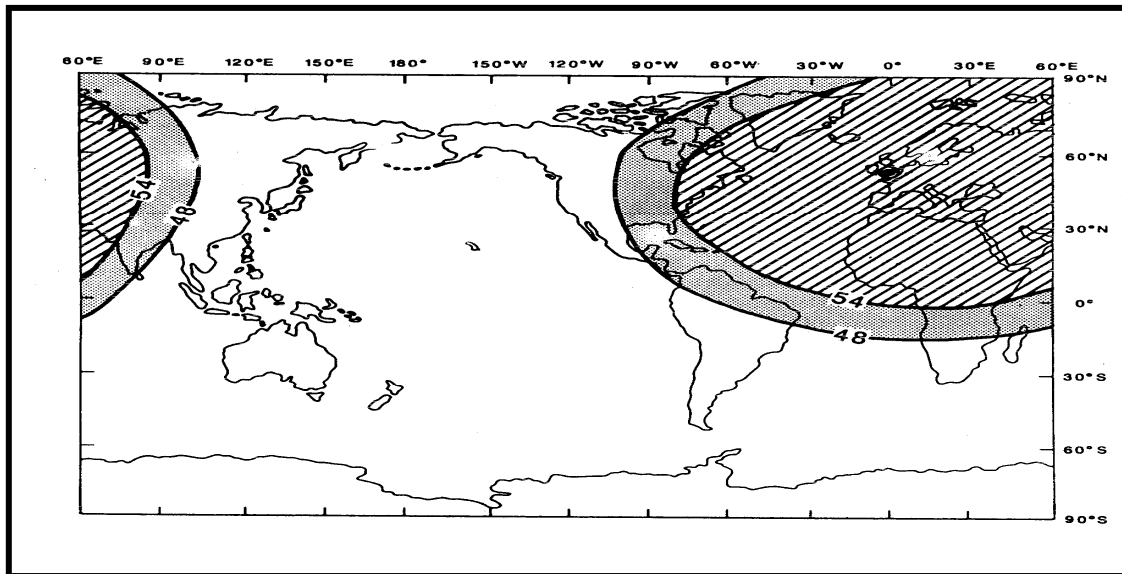


Fig. I.6. Réparation du signal émis par la station du Rugby (GBR)

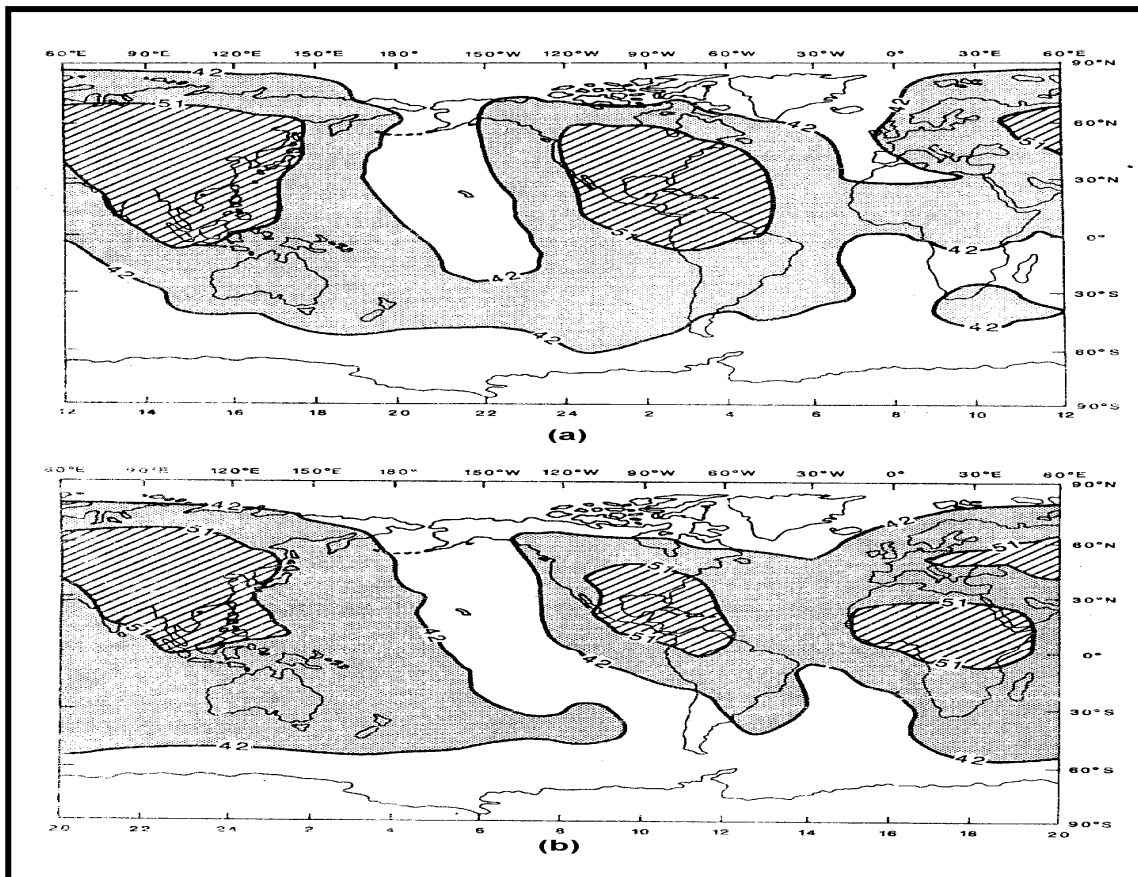


Fig. I.7. Variation du comportement ébruité au cours de la journée
(a) à environ 8h.00, (b) à 16h.00.

II.1. Effets statiques :

Le comportement statique apparaît dans le cas des structures 3D sur le champ magnétique secondaire puisque ce champ est indépendant de la fréquence et augmente avec l'allongement de la structure (Guérin, 1994 in Djeddi, 1999).

II.2. Traitements applicables aux champs :

L'existence d'effets statiques ou galvaniques importants conduit d'utiliser des types de traitements des données analogues à ceux utilisés dans les méthodes « potentiel » : gravimétrie et magnétisme (Gunn, 1975 ; Gérard, 1990 in Djeddi, 1999) et parmi ces traitements nous citons ;

- Prolongement vers le haut.
- Prolongement vers le bas.
- Verticalisation.
- Filtre de dérivation, étant donné que cette méthode sera utilisée dans les deux autres chapitres qui suivent nous avons jugé utile de la présentée.

II.3. Filtre de dérivation :

Soit f une fonction harmonique 2D dans un domaine \mathcal{D} . Soit \hat{f} , la transformée de Fourier de la fonction f , les relations suivantes que les transformées des dérivées $\delta f/\delta x$ et $\delta f/\delta y$ sont reliées à la fonction initiale par :

$$\text{TF}(\delta f/\delta x) = (-i2\pi u) \hat{f}. \quad (\text{II.1})$$

$$\text{TF}(\delta f/\delta y) = (-i2\pi v) \hat{f}. \quad (\text{II.2})$$

Où u et v sont les fréquences spectrales correspondants à x et y .

En posant, $G(u) = -i2\pi u$ et $G(v) = -i2\pi v$ et en utilisant la notation d'Euler, nous écrivons :

$$G(u) = 2\pi|u|e^{-i2\pi}. \quad (\text{II.3})$$

$$G(v) = 2\pi|v|e^{-i2\pi}. \quad (\text{II.4})$$

Les opérateurs $G(u)$ et $G(v)$ peuvent être considérés dans le domaine spectral comme des filtres linéaire. Ces équations montrent que les transformées des dérivées $\delta f/\delta x$ et $\delta f/\delta y$ sont déphasées de $\pi/2$, ce qui signifie que dans le domaine spectral chaque point maximum est transformé en valeur nulle et que chaque point d'inflexion est transformé en extremum (Djeddi, 1999).

a. Dérivée par rapport à X :

L'application du filtre dérivé dans la direction des X (direction du champ électrique E_x) sur la carte des données VLF-EM à deux extremas, se traduit par l'apparition de quatre extremas. La distance séparant deux extremas le long de la direction X, correspondra à l'extension du corps dans cette direction (XL).

b. Dérivée par rapport à Y :

L'application du filtre dérivé dans la direction des Y sur la carte des données VLF-EM, se traduit par l'apparition de trois extremums sur la carte dérivée-Y. La largeur à mi-hauteur du maximum sur la coupe, prise à partir de la carte dérivée-Y, parallèle à l'axe des Y et passant aux centres des trois extremas, nous donne la dimension du corps le long de l'axe Y (YL).

II.4. La déconvolution d'Euler :

La méthode de déconvolution d'Euler se base sur l'équation d'homogénéité d'Euler. Son utilisation en magnétisme et en gravimétrie revient au fait que les champs mesurés, dans ce cas, vérifient l'équation d'homogénéité. Hood (1965), a indiqué qu'il est possible d'utiliser cette équation pour caractériser la géométrie de la source. Slack et al (1967) et Brango (1984) ont eux aussi traité leurs données en se basant sur cette même équation (Roy and al, 2000). Ils ont essayé d'estimer simultanément la profondeur et l'indice structural des corps perturbateurs. Cependant, ceci rend des solutions instables. Thompson (1982) a développé une nouvelle méthode pour interpréter les anomalies 2D à partir de l'équation d'homogénéité d'Euler, en calculant leur profondeurs. Les sources 3D ont été étudiées dans le même contexte que celui de Thompson, par Reid et al (1990). Barbosa et al (1999) ont développé un nouveau critère qui dérive toujours de l'équation d'Euler mais, il diffère de celui de Thompson (1982).

II.4.1. Equation d'Euler :

On dit que la fonction $f(x,y,z)$ est une fonction homogène de degré n , par rapport aux variables x , y et z si l'on a pour tout t :

$$f(tx,tyt,z)=t^n f(x,y,z). \quad (\text{II.5})$$

Si f est homogène, elle satisfait donc l'équation suivante :

$$x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} + z \frac{\partial f}{\partial z} = n f \quad (\text{II.6})$$

l'équation (II.6) a reçu l'appellation : *équation d'homogénéité d'Euler*.

Supposons maintenant que l'on ait une fonction $f(x,y,z)$, de la forme :

$$f(x, y, z) = \frac{G}{r^N} \quad (\text{II.7})$$

où ; $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$,

G est une constante indépendante des coordonnées x, y et z,

N=1,2,....

Thompson (1982) a montré que dans le cas d'un point source situé au point de coordonnées x_0 , y_0 et z_0 , l'équation d'homogénéité d'Euler peut s'écrire sous la forme suivante :

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = -N \Delta T(x, y) \quad (\text{II.8})$$

Où :

$\Delta T(x, y)$: intensité du champ.

x, y et z : coordonnées du point de mesure.

x_0, y_0 et z_0 : coordonnées au centre de l'anomalie.

N : appelé indice structural, prenant des valeurs qui varie de **0** à **3**, il représente le type de la source et permet de caractériser au mieux l'anomalie.

Pour des mesures faites à la surface de la terre l'équation (1.a) se réduit à :

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial y} - z_0 \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = -N \Delta T(x, y) \quad (\text{II.10})$$

Les gradients dans les trois directions x , y et z de l'équation (II.2), peuvent être calculés en évaluant des valeurs de champ mesuré sur terrain ou calculé théoriquement. Par conséquent, les seules quantités inconnues dans cette équation sont x_0 , y_0 , z_0 et N . La résolution de l'équation (II.2) se fait pour les inconnues déjà citées, en calculant les dérivées dans au moins 04 points différents. Il en résulte donc, 04 équations linéaires à 04 inconnues. Il est possible de proposer, d'avance des valeurs pour N , on aura à cet effet 03 inconnues à calculer au lieu de 04.

Ainsi, pour une meilleure estimation des inconnues, Thompson (1982) a précisé qu'il est préférable d'acquérir un grand nombre de données. Nous aurons alors, un système d'équations surdéterminé à résoudre par la méthode des moindres carrées.

II.4.2. Application de la déconvolution d'Euler aux données synthétiques :

Sachant que la résistivité est donnée par la formule suivante:

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\mu\omega} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (\text{II.11})$$

de la formule (II.3), il est clair que la résistivité est fonction du carré du rapport E_x/H_y , $(E_x/H_y)^2$, on peut considérer donc que la racine carrée de la résistivité à la dimension d'un champ, et par conséquent il sera possible de lui appliquer la méthode de déconvolution d'Euler.

En effet, La méthode d'Euler a été appliquée, de deux manières:

- une fois, en considérant N connu,
- l'autre, en considérant N inconnu,

sur les deux paramètres :

- racine de la résistivité,
- et l'inclinaison.

Il faut noter que les paramètres du modèle, à savoir, les composantes du champ magnétique, électrique ainsi que la résistivité, ont été calculé à l'aide d'un programme de modélisation réalisé par Tabbagh , 1991.

II.4.2.1. Présentation du modèle :

Le modèle adopté pour cette étude est celui de figure (II.1). Il représente un terrain bicouche caractérisé par ρ_1 , h et ρ_2 . Dans la première couche, est incorporé un corps conducteur de dimensions X_L , Y_L et Z_L , de résistivité ρ_c . Ce corps se trouve centré en un point de coordonnées (10, 10, 3).

La couche sous-jacente est considérée comme étant infinie. Pour les calculs, le corps a été échantillonné en cellules de forme parallélépipédique (2x1x2), la fréquence choisie est 20 kHz et le champ électrique étant parallèle à l'axe des X, direction d'extension de la structure, (E_x).

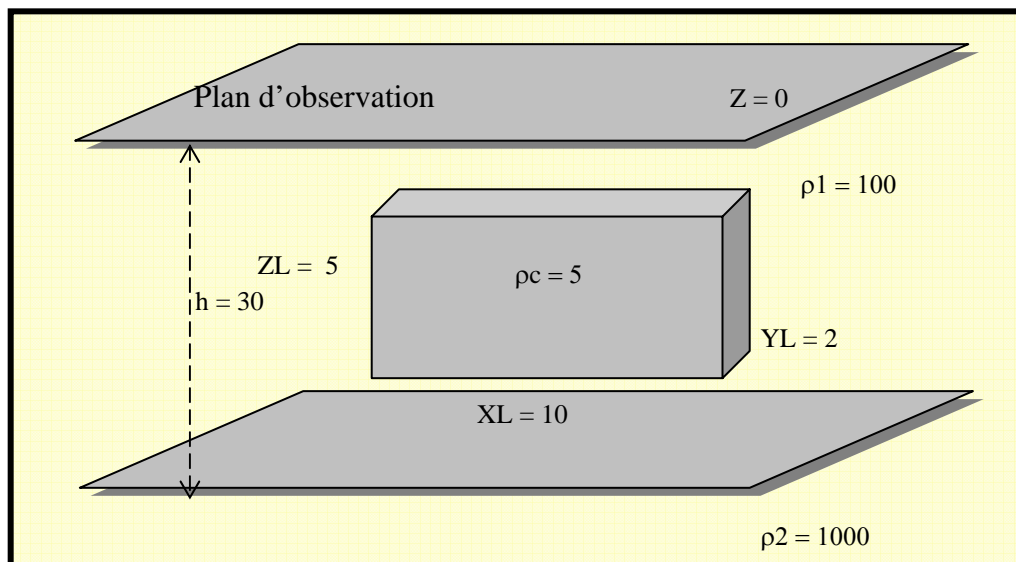


Fig. II.1 Présentation des paramètres du modèle.

II.4.2.2. Application à la racine carré de la résistivité ($\sqrt{\rho}$) :

II.4.2.2.1. N inconnu :

Les différentes solutions obtenues, correspondant aux 04 paramètres inconnus de l'équation d'homogénéité d'Euler. Ces paramètres représentent les coordonnées au centre de la structure et l'indice structural x_0 , y_0 , z_0 et N (Tableau II.1).

X0	Y0	Z0	N
10.00	10.00	.04	-.09
10.00	9.65	.97	-.30
10.00	10.00	1.11	-.37
10.00	10.35	.97	-.30
10.00	9.09	-.26	-.18
10.00	9.81	-.11	-.28
10.00	10.00	.12	-.34

Tableau II.1. Les coordonnées au centre et l'indice calculés en appliquant l'algorithme d'Euler aux données de $\sqrt{\rho}$, en considérant N inconnu.

En analysant le tableau ci-dessus, nous remarquons que les coordonnées de la structures dans le plan XY, c'est à dire les valeurs de **X0** et **Y0** convergent bien vers la position réelle de la structure dans ce même plan. Quant aux profondeurs obtenues, il n'y a pas lieu de les interpréter puisqu'elles correspondent à des valeurs d'indice négatives ($N < 0$), ces valeurs sont physiquement inacceptables.

II.4.2.2.2. N connu :

Sans oublier que notre objectif réside dans l'évaluation de la profondeur au centre des structures, nous avons appliqué donc, l'algorithme de déconvolution sur $\rho^{1/2}$ en fixant N d'avance, de sorte à varier la largeur de la fenêtre entre 3 et 21 et l'indice N de 0 et 3. Les résultats obtenus, sont regroupés dans un seul graphe (Fig.II.2).

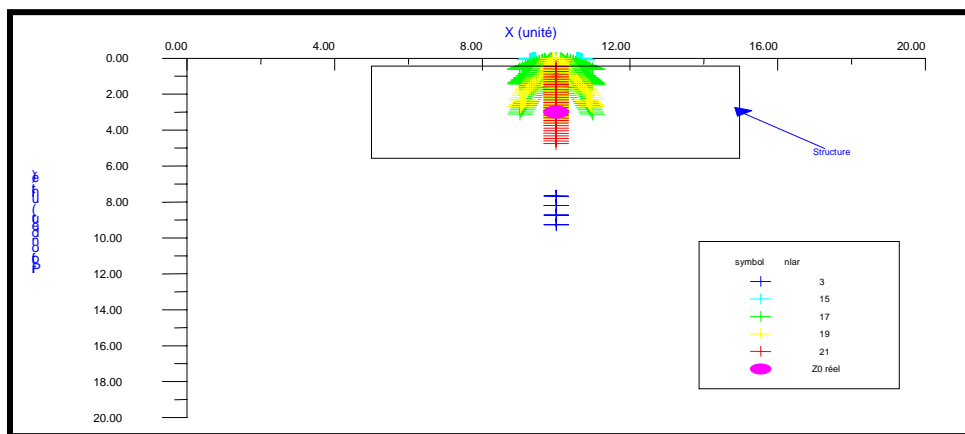


Fig.II.2. Profondeurs au centre estimées en variant la largeur de la fenêtre de 0 à 21 et l'indice de 0 à 3

Les résultats correspondant à la vraie profondeur, sont donnés par le tableau ci-dessous :

X0	Y 0	Z0	N	nlar
10	10	3.0369	1.8	21

Tableau II.2. La profondeur au centre (Z0) estimée est égale à la réelle pour N de 1.8 et nlar 21.

Sachant qu'après avoir effectué les différents calculs, une série de solutions représentant des profondeurs, est obtenue (Fig. II.2).

Par la suite et à partir de la série, nous aurons à sélectionner une et une seule valeur de profondeur qui se rapproche le plus de la vraie profondeur au centre, tel qu'il est donné par le tableau II.2.

Toutefois, un problème se pose, s'énonçant comme suit : comment aboutir au tableau 2 à partir de toute la série de valeur de la figure II.2?.

Pour remédier à cela, nous avons essayé de développer l'idée suivante : une bonne détermination de Z_0 est liée au bon choix de N , il suffit de faire correspondre à chaque forme (cube, parallélépipède etc.) une valeur d'indice N à condition qu'elle reste constante quelque soit la profondeur du corps, en procédant :

1. chercher une valeur de N caractérisant la forme du corps à une profondeur bien définie.
2. suivre le comportement de ce N en fonction de la profondeur du corps (si N reste le même quelque soit la profondeur du corps, nous dirons que cette forme est caractérisée par cet indice).

Les résultats seront présentés dans le paragraphe II.1.2.3.1 puisque, dans les deux cas, l'idée développée est la même.

II.4.2.3. Application à l'inclinaison :

Dans cette application, la même procédure de calcul que celle détaillée dans le paragraphe II.12.2.2, a été suivie, en utilisant la composante réelle du rapport H_z/H_y .

II.4.2.3.1. N connu :

La variation de N dans la gamme 0 – 3 et de la largeur de la fenêtre de 3 à 21, nous a permis de faire sortir les résultats du graphe ci-dessous :

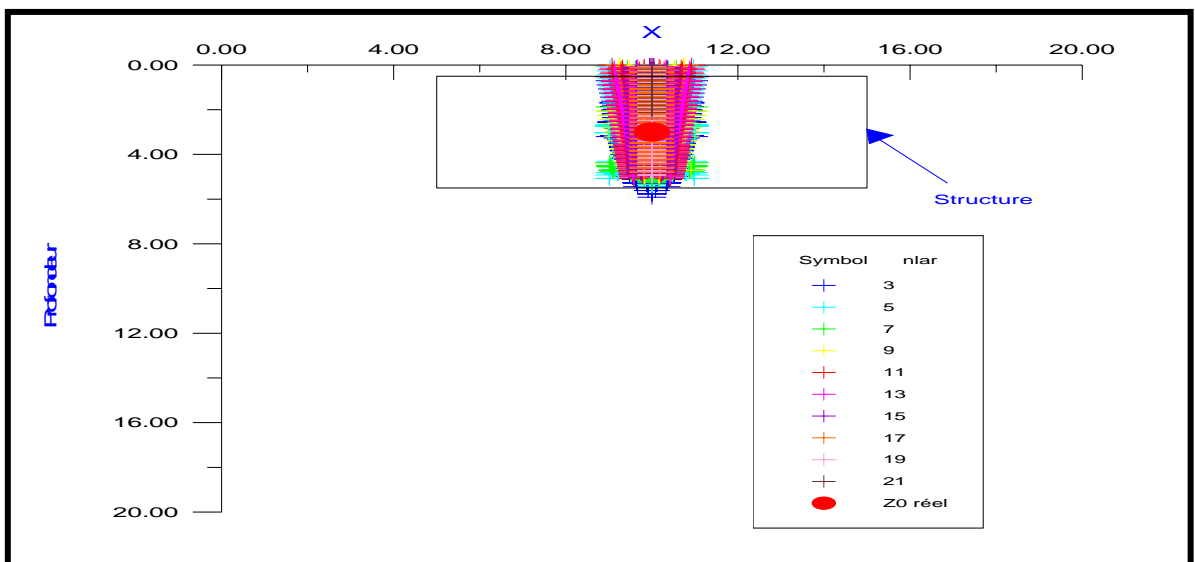


Fig.II.3. Profondeurs au centre estimées en appliquant la méthode d'Euler sur les données de l'inclinaison, avec N connu.

De toutes les solutions, présentées par le graphe (Fig. II.3), nous avons repris dans le tableau ci-dessous seulement celle qui se rapproche de la vraie profondeur.

X0	Y0	Z0	N	nlar
10.2818	10	3.0356	2	19

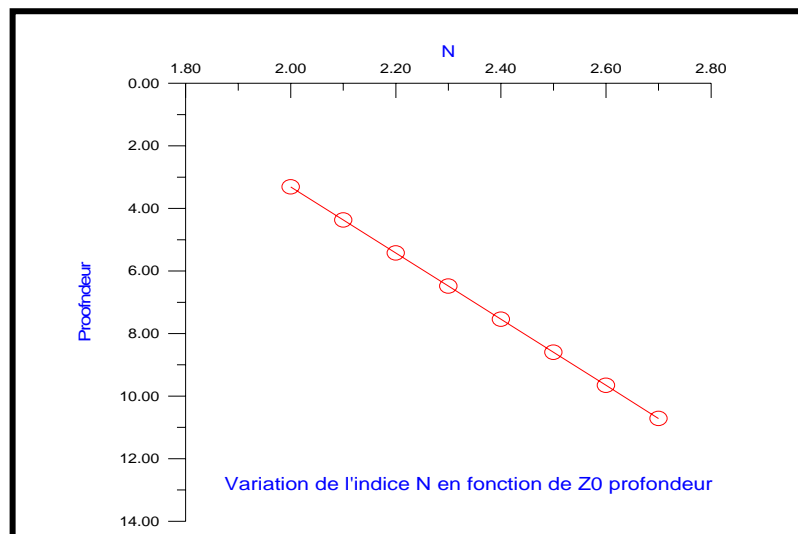
Tableau II.3. La profondeur au centre (Z0) estimée est égale à la réelle pour N de 2 et nlar 19.

a. Effet de la profondeur sur l'indice N :

Afin, de suivre le comportement de l'indice en fonction de la profondeur, la méthode d'Euler a été appliquée aux données résultant du modèle de la figure (II.1), en variant la profondeur du corps de 3 à 10.

Z0	N	Z0 Réel
3.0356	2.0	3.0
3.9655	2.1	4.0
5.0567	2.2	5.0
5.9016	2.2	6.0
6.9669	2.3	7.0
7.9654	2.4	8.0
8.9022	2.5	9.0
10.0772	2.7	10.0

Tableau II.4. En augmentant la profondeur de 3 m à 10 m, l'indice augmente.



Graphie II.1. variation linéaire de l'indice en fonction de la profondeur.

En examinant le tableau, nous remarquons que l'indice N augmente avec Z0. Le graphique (II.1) montre que la relation liant la profondeur Z0 à l'indice N est linéaire. Donc, l'idée de faire correspondre, à un corps ayant une forme géométrique bien définie une valeur N constante, quelque soit sa profondeur n'a pas aboutit, au moins de cette manière puisque, comme nous venons de le montrer, Z0 et N sont linéairement dépendants.

II.4.2.3.2. N inconnu :

L'analyse des résultats obtenus dans ce cas nous a permis de constater que, l'algorithme a fait ressortir parmi les solutions présentant certaines erreurs, qu'il est nécessaire de rejeter.

Alors, nous avons procédé à un tri, de façon à ne garder que les profondeurs (Z0) positives possédants des indices N appartenant à la gamme (0 - 3) suivi d'un tracé sur un graphe (Fig. II.4).

A partir des valeurs de figure II.4., deux profondeurs ont été calculées l'une d'elles correspond à la moyenne des profondeurs estimées, notée Z0 Moy, l'autre correspond à la valeur maximale des profondeurs estimées, notée Z0 Max, (Fig.II.5).

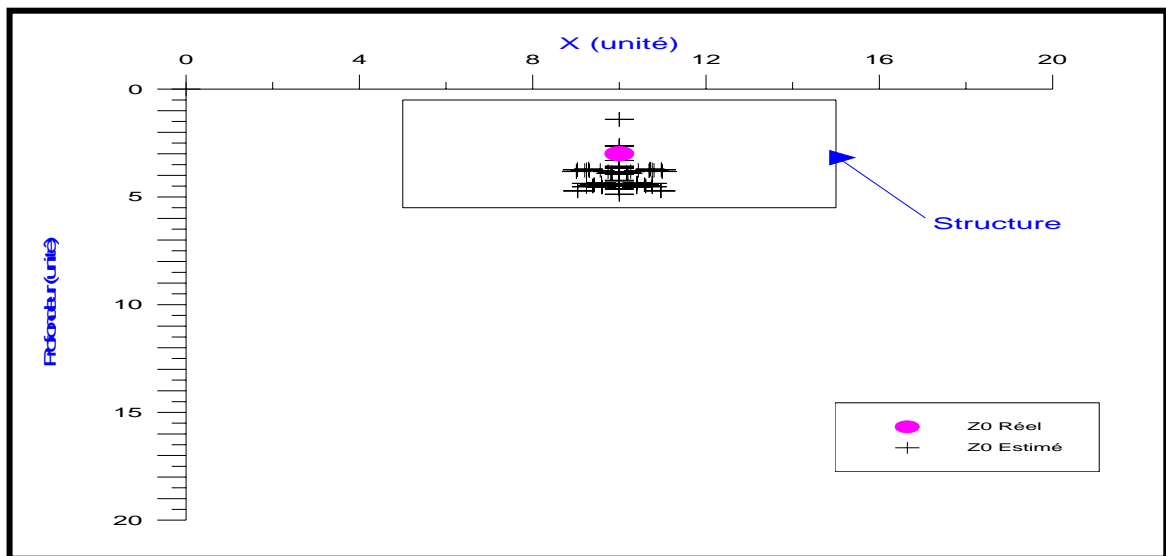


Fig. II.4. Profondeurs au centre estimées en appliquant la méthode d'Euler sur les données de l'inclinaison, avec N inconnu.

Après des quatre (04) cas précédemment étudiés, c'est à dire ; application de l'algorithme d'Euler sur :

- i. racine de la résistivité avec N inconnu,
- ii. racine de la résistivité avec N connu,
- iii. composante réelle du rapport HZ/Hy avec N connu,
- iv. composante réelle du rapport HZ/Hy avec N inconnu.

Le seul cas, jugé exploitable se rapporte au dernier. Puisque, il est le seul à donner des résultats interprétables.

A cet effet, nous proposons d'appliquer la déconvolution d'Euler avec N inconnu, sur la composante réelle du rapport HZ/Hy . Cette application sera suivie par le calcul des deux profondeurs essentielles, la première correspond à la moyenne des solutions, notée $Z0$ Moy et la seconde représente la valeur maximale des solutions, notée $Z0$ Max. L'intérêt et utilité de ces deux profondeurs apparaîtra dans les parties qui suivent.

Le choix fait reste à affirmer et à renforcer, en nous incitons à trouver un critère pour la sélection de la vraie profondeur au centre, sans pour autant s'intéresser aux valeurs de l'indice.

II.4.3. Critère de sélection :

Nous avons utilisé les données du modèle (Fig. II.1), en variant la profondeur du corps de 3m à 10m.

A chaque profondeur, nous avons procédé au tri de valeur tel qu'il a été détaillé dans le paragraphe (II.1.2.3.2), toute valeur ne représentant pas une solution, doit être rejetée.

Une fois le tri accompli, nous sommes passés au tracé des graphes où, à chaque cas il doit faire apparaître $Z0$ Moy, et $Z0$ Max (Fig. II.5) définies plus haut.

L'application du critère, doit être obligatoirement précédée par un calcul de la profondeur au toit en utilisant d'autres méthodes d'interprétation des données VLF telles que les abaques développés par Baker, 1975 et Djeddi, 1999, donnant la profondeur au toit en fonction de la demi-distance du pic au pic de l'anomalie VLF-EM.

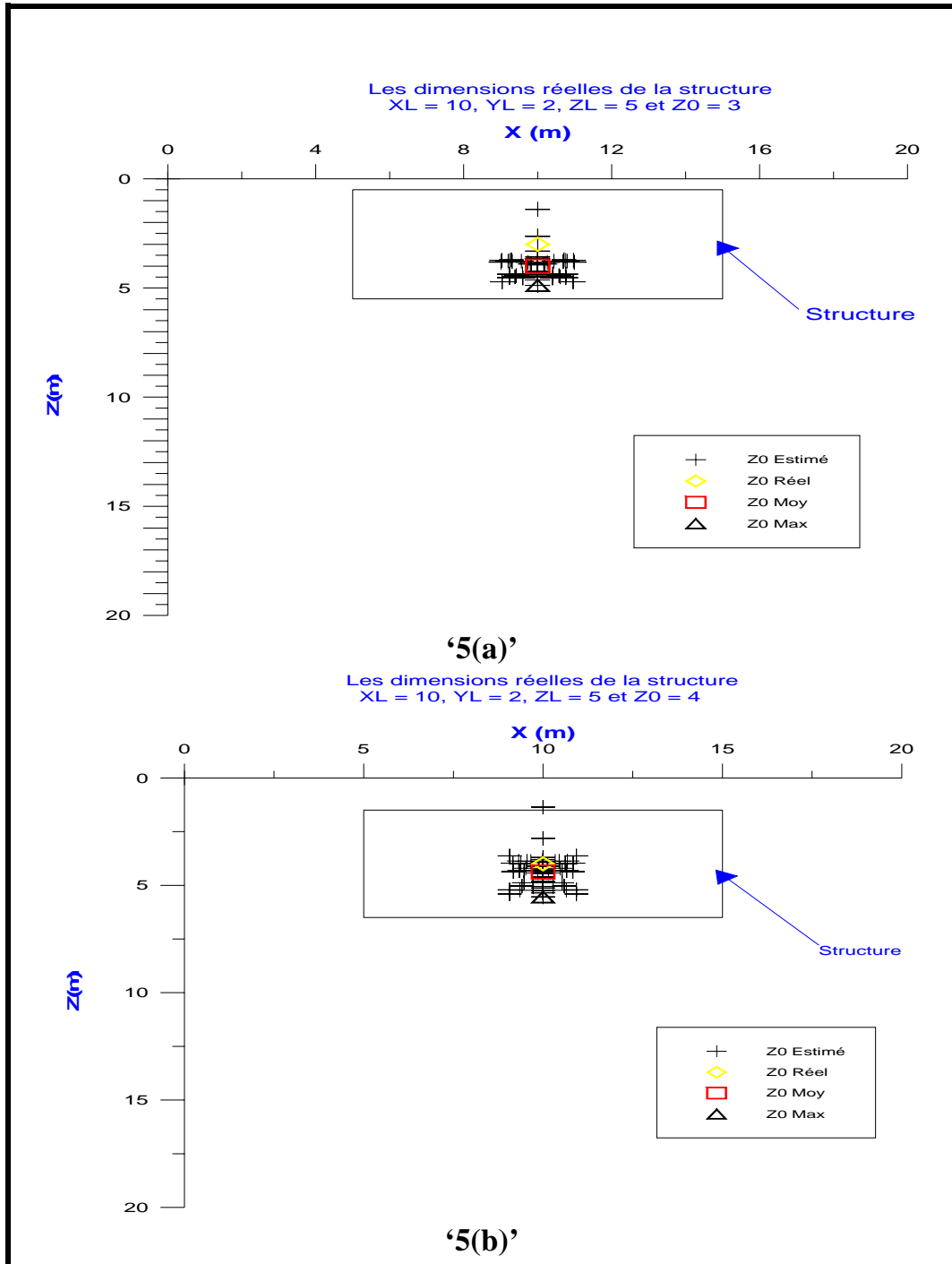


Fig. 5, Profondeurs au centre estimées en appliquant la méthode d'Euler sur les données de l'inclinaison, avec N connu d'un même modèle à deux profondeurs différentes.
 (a) $ZO=3$; (b) $ZO=4$; (c) $ZO=5$; (d) $ZO=6$; (e) $ZO=7$; (f) $ZO=8$; (g) $ZO=9$; (h) $ZO=10$.

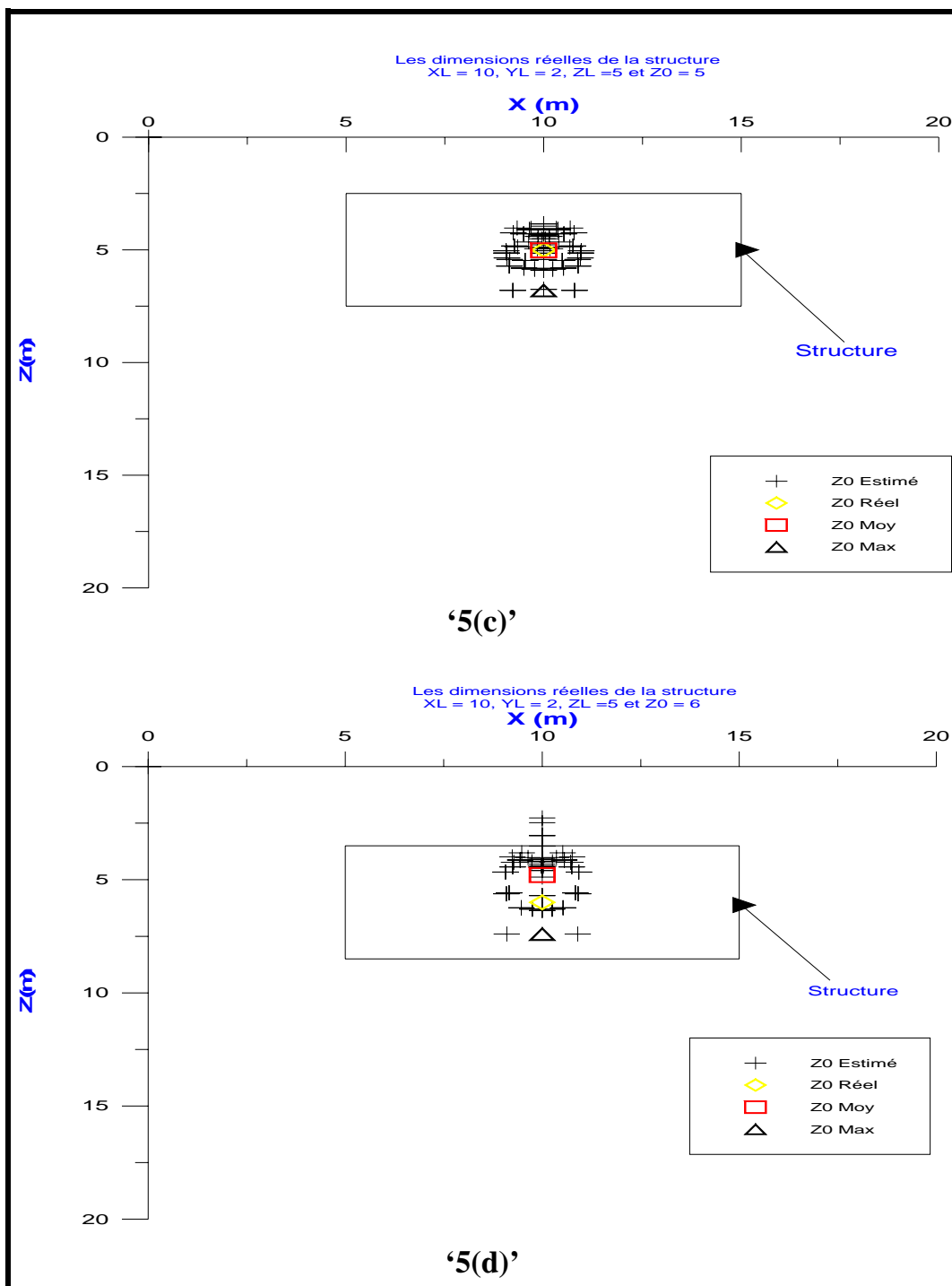


Fig. 5, (c) $Z_0=5$; (d) $Z_0=6$

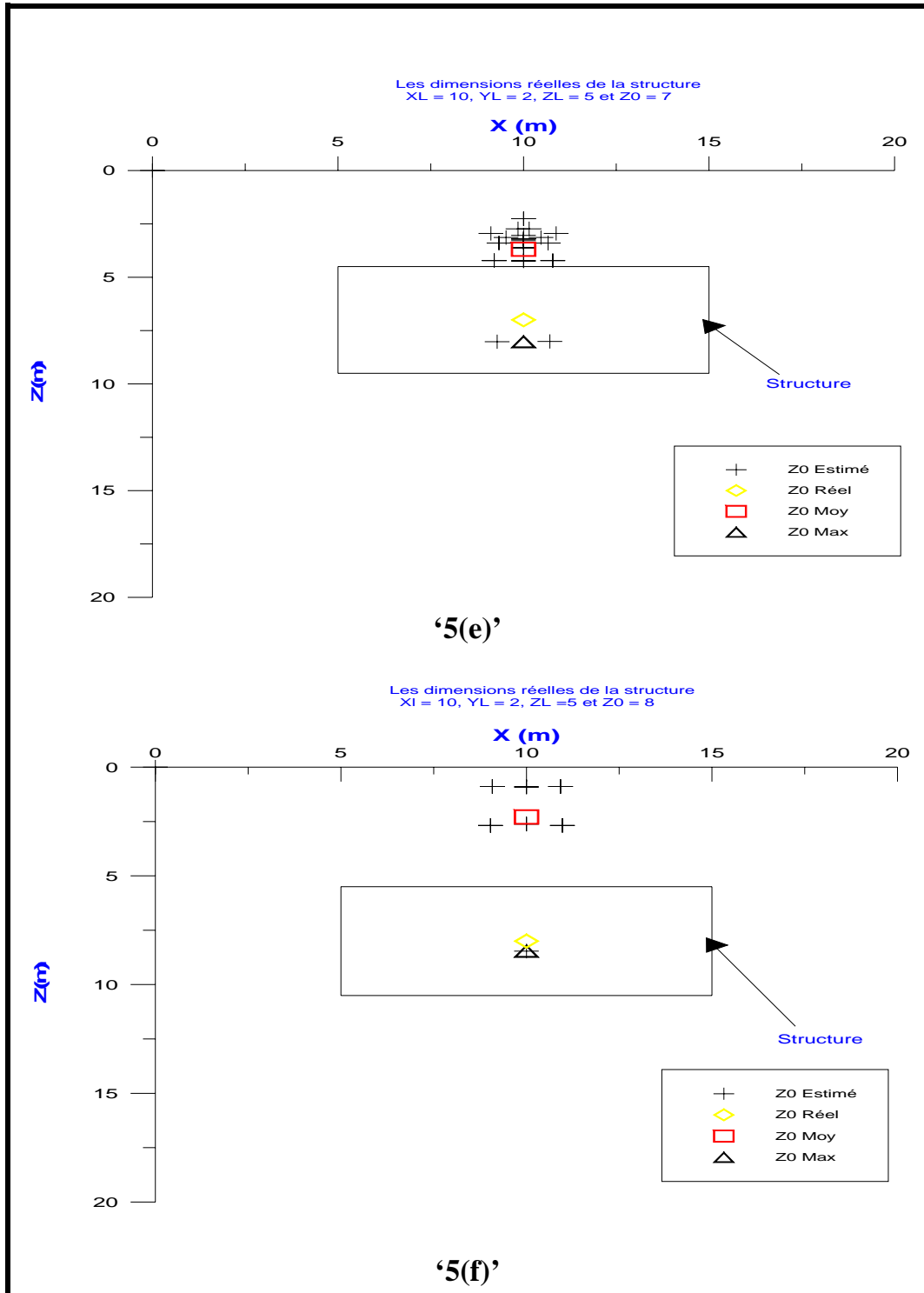


Fig. 5, (e) $Z_0=7$; (f) $Z_0=8$

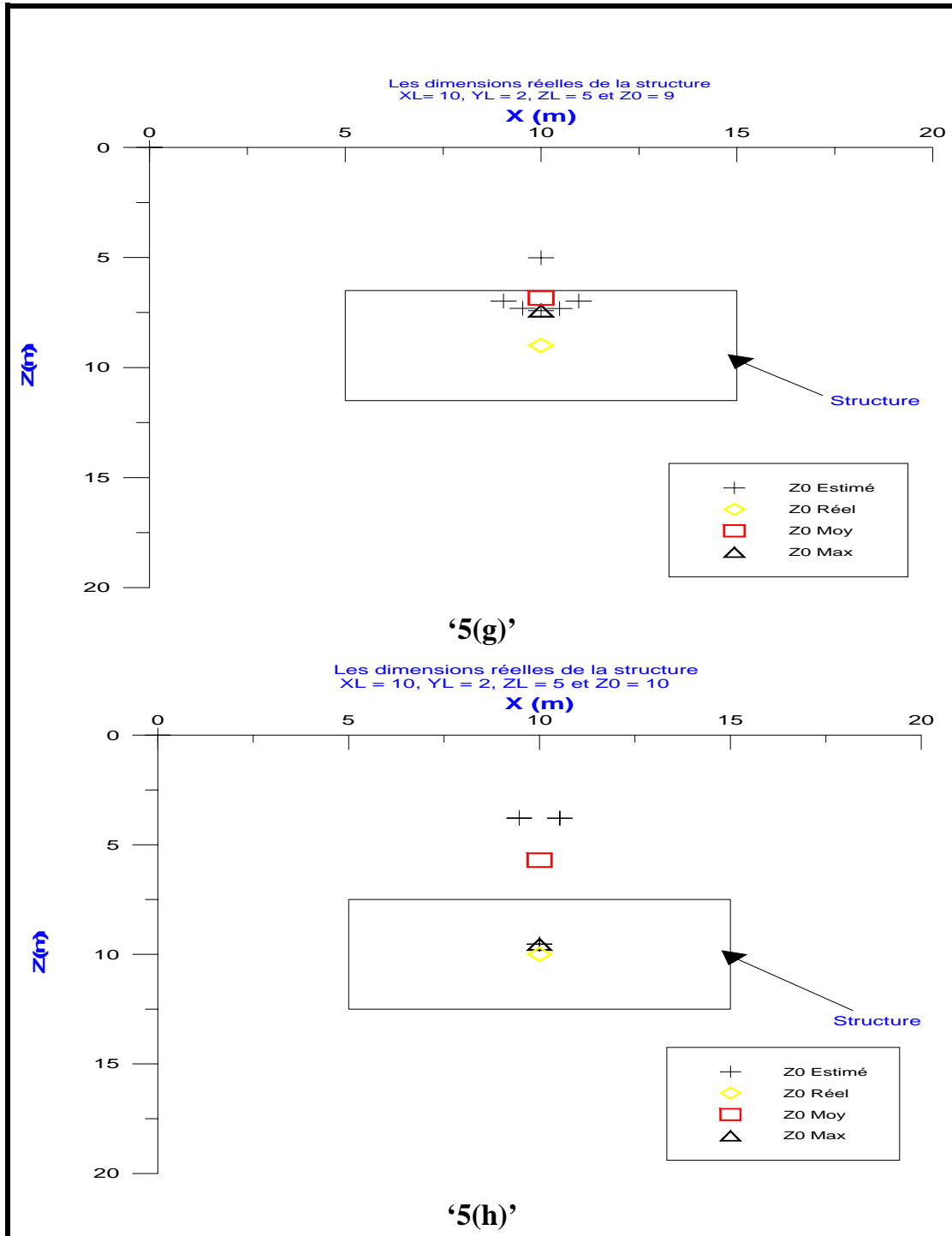


Fig. 5, (g) $Z0=9$; (h) $Z0=10$

Z0 Réel	Z0 Moy	Z0 Max	ZT
<u>3</u>	4.00	4.88	0.5
<u>4</u>	4.38	5.54	1.5
<u>5</u>	5.02	6.8	2.5
<u>6</u>	4.79	7.4	3.5
<u>7</u>	3.69	8.02	4.5
<u>8</u>	2.29	8.46	5.5
<u>9</u>	6.84	7.42	6.5
<u>10</u>	5.7	9.54	7.5

Tableau II.5. Les profondeurs résultant pour les différentes positions de la structures (Z0 réelle varie de 3m à 10m.), où Z0Max correspond à la profondeur maximale estimée et Z0Moy représente la moyenne des profondeurs estimées.

Dans ce cas, les profondeurs au toit sont considérées préalablement calculées. Suite à l'analyse et à l'observation des différents résultats obtenus et des graphes tracés de la figure II.5, nous avons adopté un critère de sélection de la vraie profondeur que nous définissons comme suit :

1. Calculer la profondeur au toit de l'anomalie perturbatrice par une des méthodes d'interprétation des données VLF-EM
2. Appliquer la méthode de déconvolution d'Euler, avec N inconnu, aux données VLF-EM, précisément la composante réelle du rapport HZ/HY.
3. Faire le tri, en éliminant toutes les valeurs de $Z0 < 0$ et $Z0 > 0$ dont l'indice N n'appartient pas au domaine (0 - 3).
4. Calculer Z0 Moy et Z0 Max à partir du reste des valeurs.
5. Comparer Z0 Moy avec ZT.

La détermination de la vraie profondeur se fait suite aux conditions suivantes :

- Si, $Z0 \text{ Moy} \leq ZT$, la profondeur au centre considérée sera $Z0 \text{ Max}$.
- Et si, $Z0 \text{ Moy} > ZT$ alors la profondeur à prendre sera $Z0 \text{ Moy}$.

Puisque, le critère de sélection a fait preuve d'efficacité en variant la profondeur du corps (tableau II.5), nous avons même envisagé de le tester en variant les dimensions.

II.4.4. Efficacité du critère en variant les dimensions :

II.4.4.1. Paramètres du modèle :

Le modèle choisi, correspond à un terrain bicouche (Fig. II.6). La première couche enferme une structure conductrice de forme cubique, centrée en un point de coordonnées (10, 10, 5).

Pour le calcul, le maillage de la structure a été pris (1x1x1) et la fréquence utilisée est toujours 20 kHz.

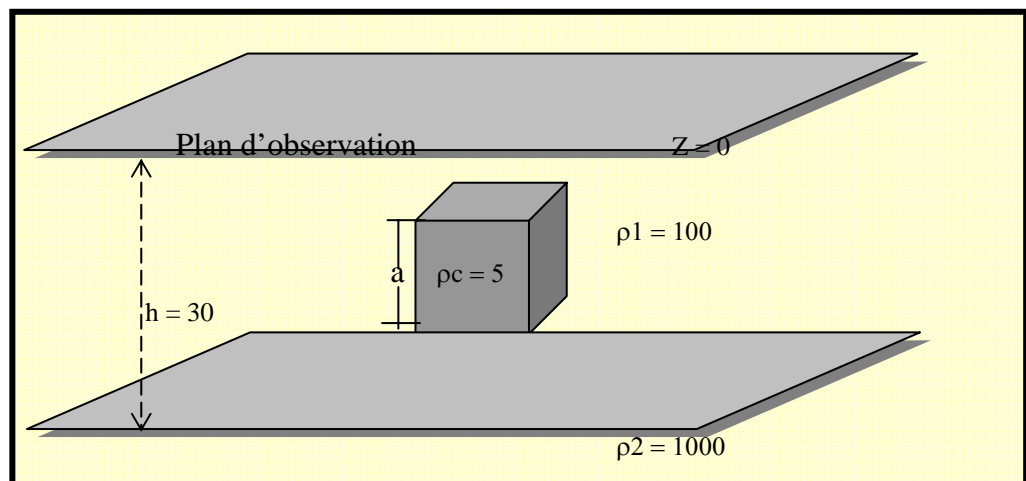


Fig. II.6. Représentation du modèle théorique adopté pour l'étude de l'efficacité du critère de sélection.

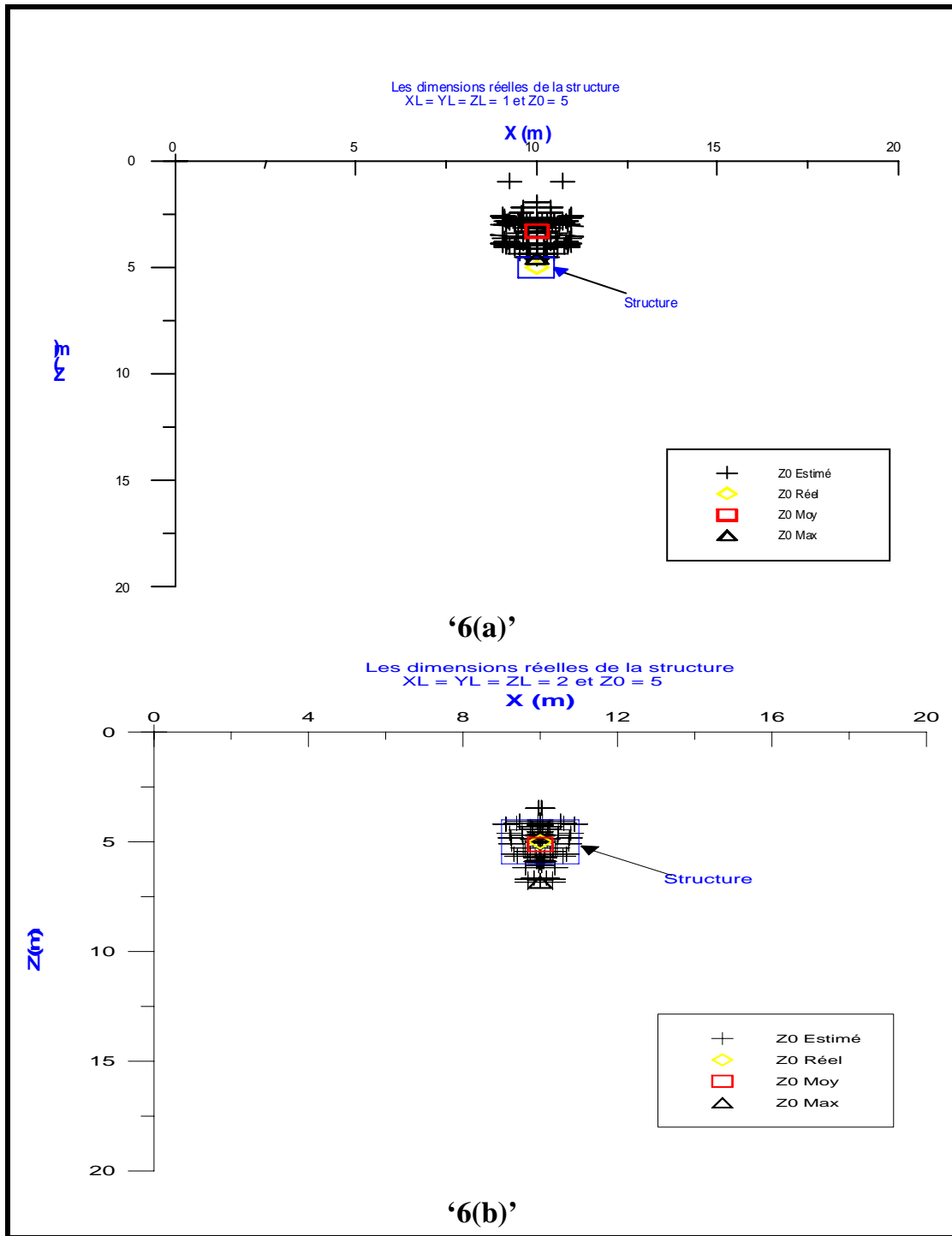


Fig. II.7, (a) Profondeurs au centre estimées en appliquant la méthode d'Euler sur les données de l'inclinaison, avec N connu d'un même modèle en variant la longueur du coté du cube (a).
 (a) $a=1$; (b) $a=2$; (c) $a=4$; (d) $a=6$; (e) $a=8$.

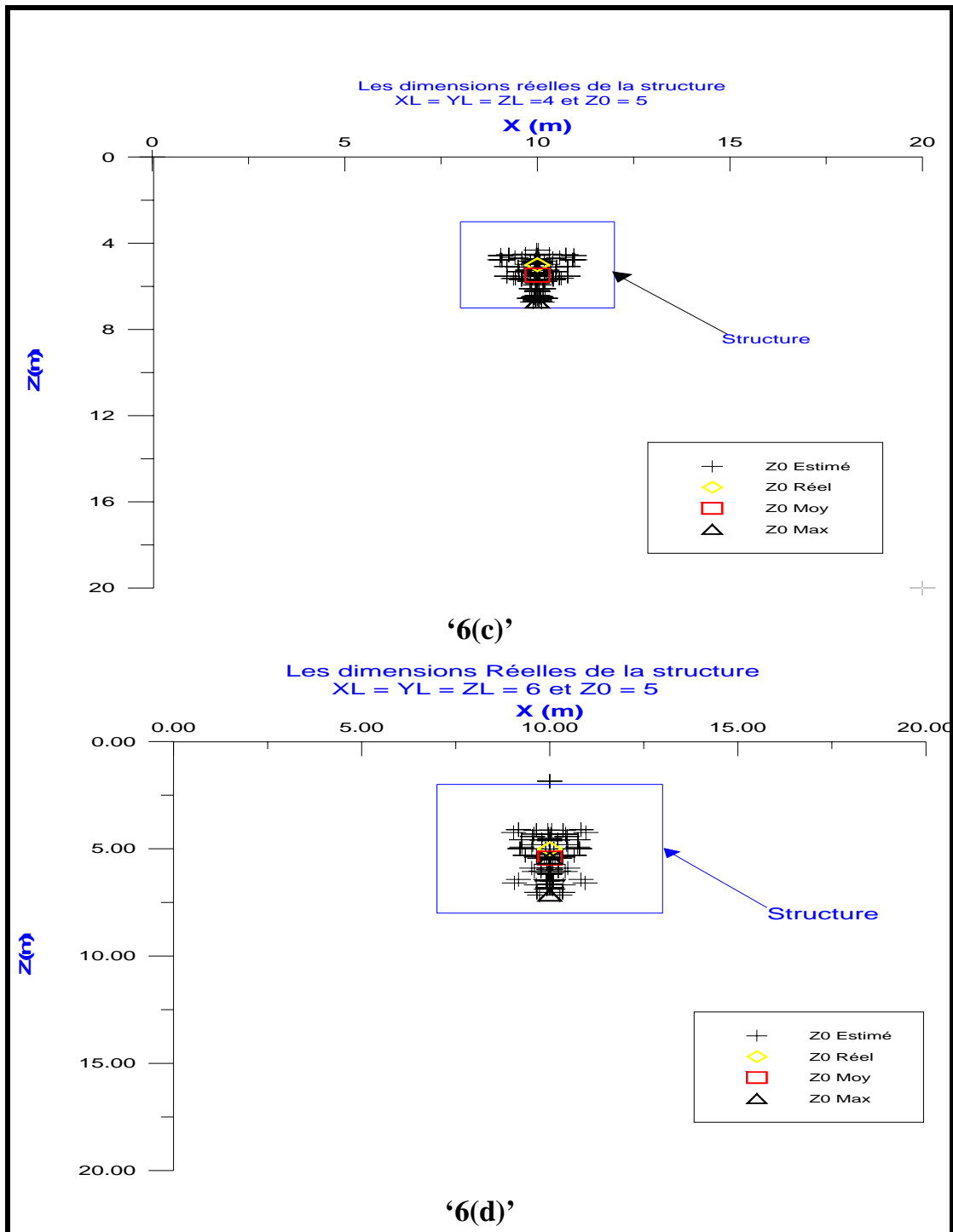


Fig. II.7, (c) $a=4$; (d) $a=6$

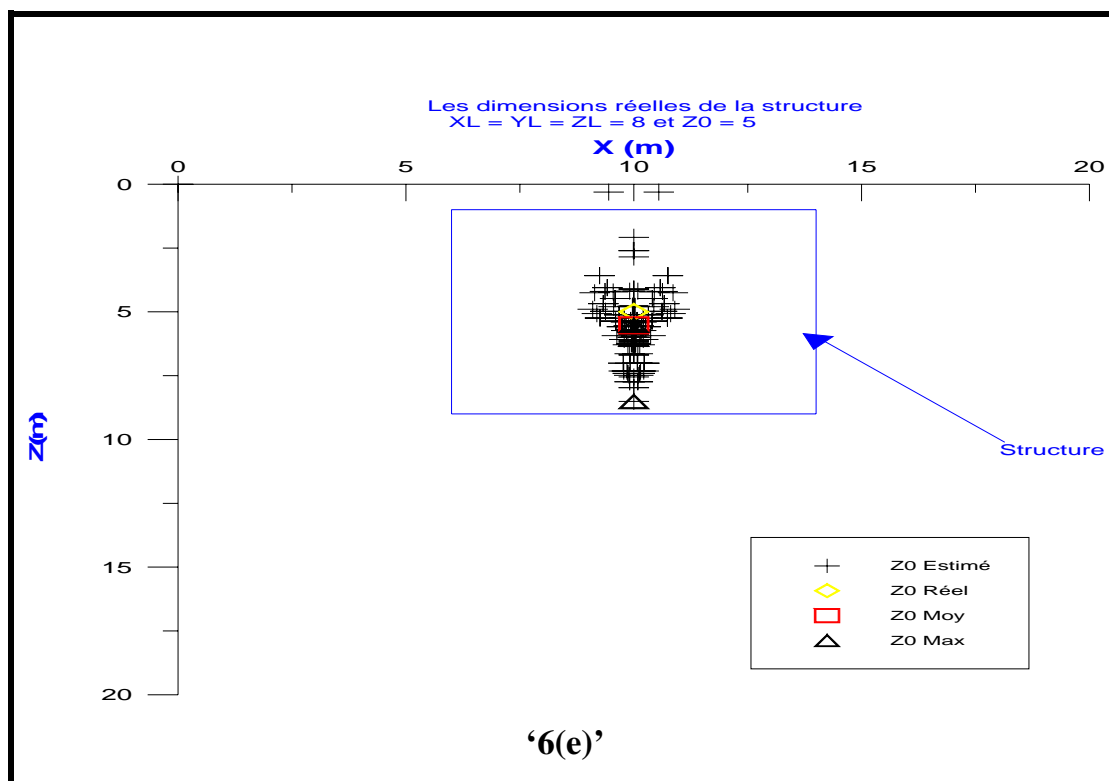


Fig. II.7, (e) a=8

a	Z0 Réel	Z0 Moy	Z0 Max	ZT
<u>1</u>	<u>5</u>	3.29	4.58	4.5
<u>2</u>	<u>5</u>	5.12	6.84	4
<u>4</u>	<u>5</u>	5.48	6.73	3
<u>6</u>	<u>5</u>	5.43	7.16	2
<u>8</u>	<u>5</u>	5.52	8.51	1

Tableau II.6. Les profondeurs résultant pour les différentes longueurs de cotés (a) (Z0 réelle 5m et a varie de 1m à 8m.), où Z0Max correspond à la profondeur maximale estimée et Z0Moy représente la moyenne des profondeurs estimées.

Pour chaque longueur de longueur de côté (**a**), nous avons déterminé Z_0 Moy, Z_0 Max. Les profondeurs au toit sont considérées préalablement calculées (Tableau II.6), afin de pouvoir appliquer la condition de sélection de la profondeur au centre et nous avons constaté :

- Pour $a = 1$, $Z_0 \text{ Moy} < Z_T$, la profondeur au centre sera égale à $Z_0 \text{ Max} = 4.58\text{m}$, cette profondeur est très proche de Z_0 Réel.
- Pour le reste des longueurs de cotés, $Z_0 \text{ Moy} > Z_T$, la profondeur au centre sera considérée égale à $Z_0 \text{ Moy}$.

De cette façon et vu la qualité rigoureuse des résultats, on peut dire que le critère a prouvé son efficacité, une autre fois.

II.4.5. Calcul de l'extension vertical (ZL) :

L'extension verticale d'un corps, comme il est formulé dans l'équation II.4, est donnée par deux fois la différence entre la profondeur au centre (notée Z_0) et celle du toit (notée Z_T).

$$ZL = 2(Z_0 - Z_T) \quad (\text{II.4})$$

Par conséquent, pour estimer ZL , nous aurons d'abord à calculer Z_T et Z_0 .

II.4.5.1. Présentation du modèle :

Le modèle adopté pour cette application, correspond à celui d'un corps de dimensions (10x5x6) et de résistivité ρ_c égale à $5 \Omega\text{m}$, situé dans la première couche d'un terrain bicouche, en un point de coordonnées (10, 10, 7).

Les paramètres du terrain sont $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$, $h = 50\text{m}$ et $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$.

La fréquence utilisée est de 20 kHz et le maillage du corps a été parallélépipédique (2x1x2).

a. Détermination de ZT :

La détermination de ZT s'est faite à partir de l'abaque, donnant la relation entre la Profondeur au toit et Delta x/2 (DX/2), de Baker et Myers.

Par définition, le DX/2 correspond à la demi-distance entre les deux extremums tirés de la carte VLF-EM (voir Fig. II.7).

Le DX, à partir de la coupe (Fig. II.7.b) faite sur la carte d'anomalie (Fig.II.7.a), est égal à 12 m.

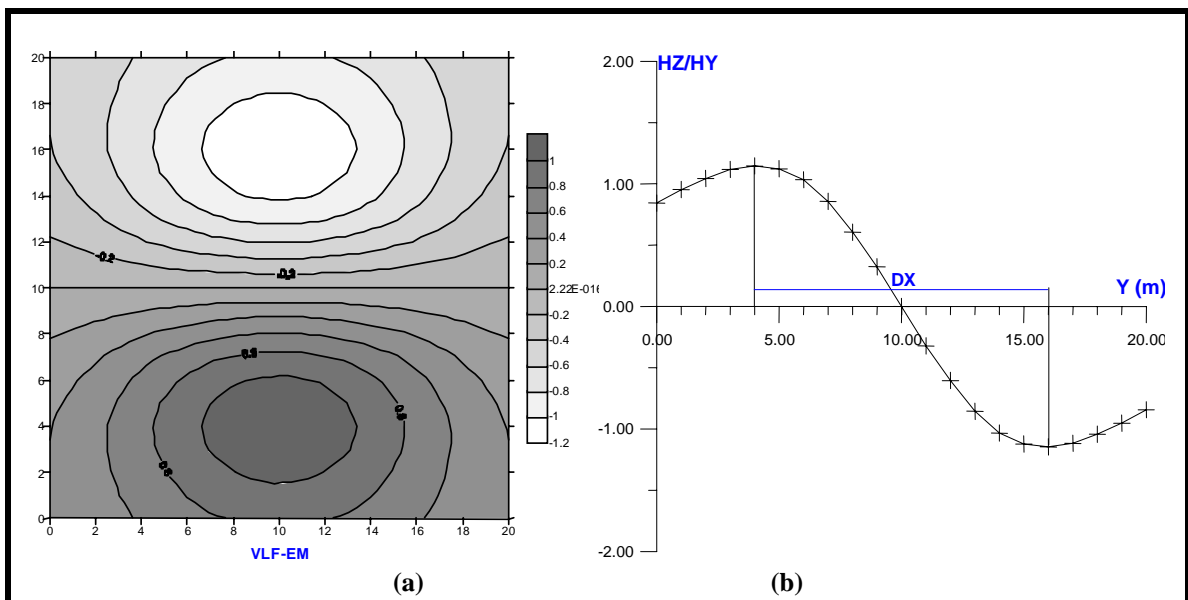


Fig. II.7 (a) carte d'anomalie VLF-EM (b) coupe passant par le centre des deux extremums prise de la carte VLF-EM.

La profondeur au toit (ZT), pointée sur l'abaque pour un DX/2 de 6m, est égale à 4m. Nous remarquons que ZT calculé est équivalent à ZT réel.

b. Détermination de Z0 :

Suite à l'application du critère, défini plus haut, les résultats obtenus sont :

La profondeur au centre calculée est égale à 6.52m. L'extension du corps dans le plan vertical est évaluée en utilisant la formule II.4, nous avons trouvé une extension verticale (ZL) de 5.04 m.

Le pouvoir de résolution latéral, c'est la possibilité de séparer latéralement entre les structures du sous-sol. Cela va nous permettre d'enrichir et d'approfondir l'interprétation. Le pouvoir de résolution latéral (anisotropie ; succession latérale de corps) est principalement lié à deux paramètres suivants : la profondeur et la distance entre les structures puisque même la réponse de l'anomalie est fonction de ces deux paramètres. Si la profondeur est grande même la distance entre les différentes structures est considérable, on risque des ambiguïtés.

nous avons essayé de traiter ce problème, en utilisant la méthode du filtre de dérivation, qui présente l'avantage et la propriété de :

- visualiser les sommets des structures dans le plan horizontal (localiser les limites des structures dans le plan horizontal).
- quantifier d'une part, les dimensions des structures conductrices dans le plan horizontal et d'autre part la profondeur au toit.

Pour la réalisation de cette étude deux modèles théoriques différents ont été utilisés. Le premier correspond à un demi-espace homogène renfermant, deux corps séparés par une distance \mathbf{d} , initialement, très rapprochés l'un de l'autre. Cette distance \mathbf{d} sera augmentée au fur et à mesure ainsi que la profondeur dans le but de suivre la réponse (l'anomalie) en fonction de ces deux paramètres. Le second modèle correspond toujours à un demi-espace, contenant une seule structure, initialement mince. Par la suite, nous avons fait varier l'épaisseur de la structure, afin de suivre le caractère de la réponse de l'anomalie VLF-EM en fonction de l'épaisseur.

III.1. Présentation des modèles :

III.1.1. Cas de deux structures distantes :

Le modèle adopté pour ce cas (Fig. III.1), correspond à deux structures identiques de dimensions XL , YL et ZL , incorporées à une même profondeur au centre Z_0 , dans un terrain infini, homogène et de résistivité ρ . La distance séparant les centres des deux structures dans la direction des Y est d . Les calculs ont été faits avec une fréquence de 20 kHz, chacune des structures a été découpée en cellules parallélépipédique ($2 \times 1 \times 2$).

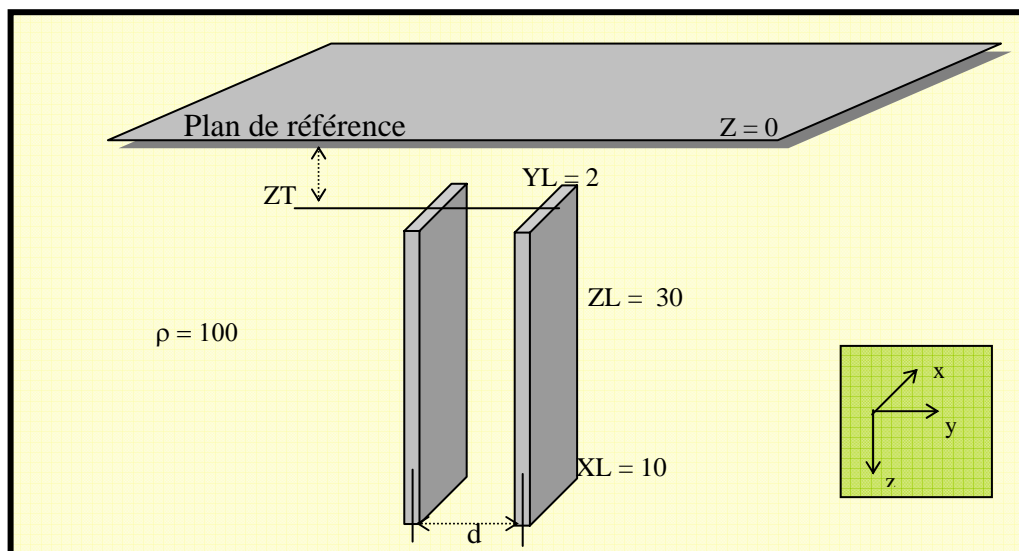


Fig. III.1. Modèle d'un demi-espace comportant deux structures identiques séparés par une distance d (distance séparant le centre des deux structures), initialement $d=2$ puis il augmente progressivement afin de suivre la réponse du terrain en fonction de l'écart (d).

Après avoir effectué les calculs des données VLF-EM et ceux des dérivées dans le plan horizontal attribuées à la réponse du modèle de la figure III.1, à des profondeurs au toit variant de 4m à 9m et avec des écarts (entre les deux structures) allant 2m à 10m, plusieurs cartes ont été tracées.

Nous avons choisi d'interpréter les cartes correspondant à ZT égal à 4m (Fig.III.2) L'analyse faite, à cette profondeur et avec les différents \mathbf{d} , nous a permis de faire les constatations suivantes :

- pour \mathbf{d} , variant de (2 à 5)m les cartes d'anomalie VLF-EM et ses dérivés X et Y (Fig. III.2 (a), (b), (c) et (d)), ne marquent aucune particularité à l'exception d'un élargissement du lob positif apparent précisément sur les cartes dérivée-Y.
- L'élargissement du lob central est certainement lié à l'augmentation de l'écart entre les deux structures. Nous avons préciser, que sur ces cartes n'apparaît aucune particularité. Puisque, pour cet intervalle de séparation (2 à 5)m, la réponse reflétée est exactement la même que celle donnée par un corps seul et donc, il sera quasiment pas possible l'attribuer au cas d'une succession latérale de couches.
- Ce n'est qu'à partir de \mathbf{d} égal à 6 m, que comme à apparaître une image, différente de celles précédemment interprétées, où on remarque sur la carte dérivée-Y un dédoublement du lob central (positif) se manifestant dans la direction de l'écartement des deux structures.

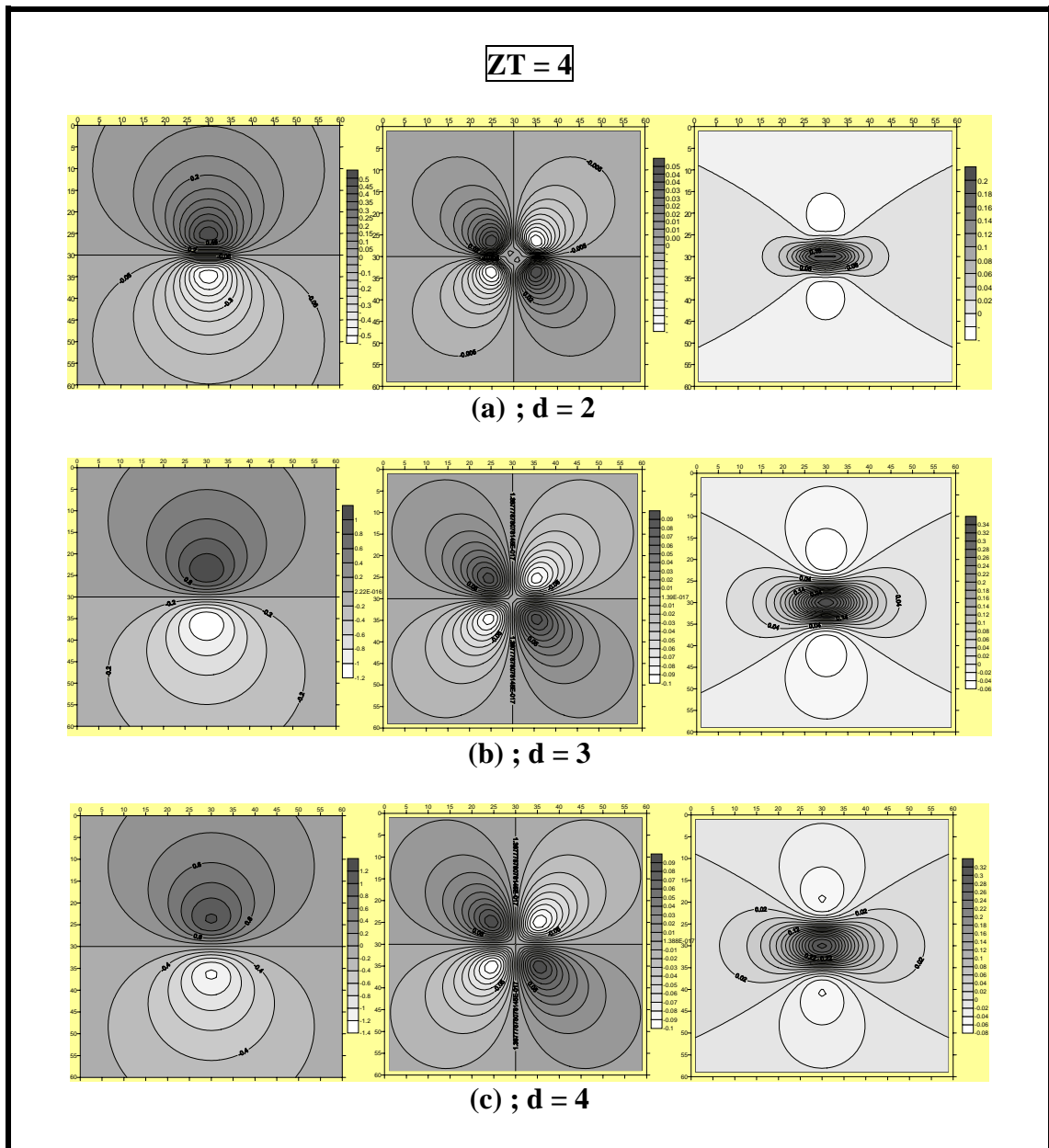


Fig. III.2. Réponse du modèle ; anomalie VLF-EM et leur dérivée-X et dérivée-Y en variant d (a) $d=2m$; (b) $d=3m$; (c) $d=4m$ pour une profondeur au toit (ZT) de 4m.

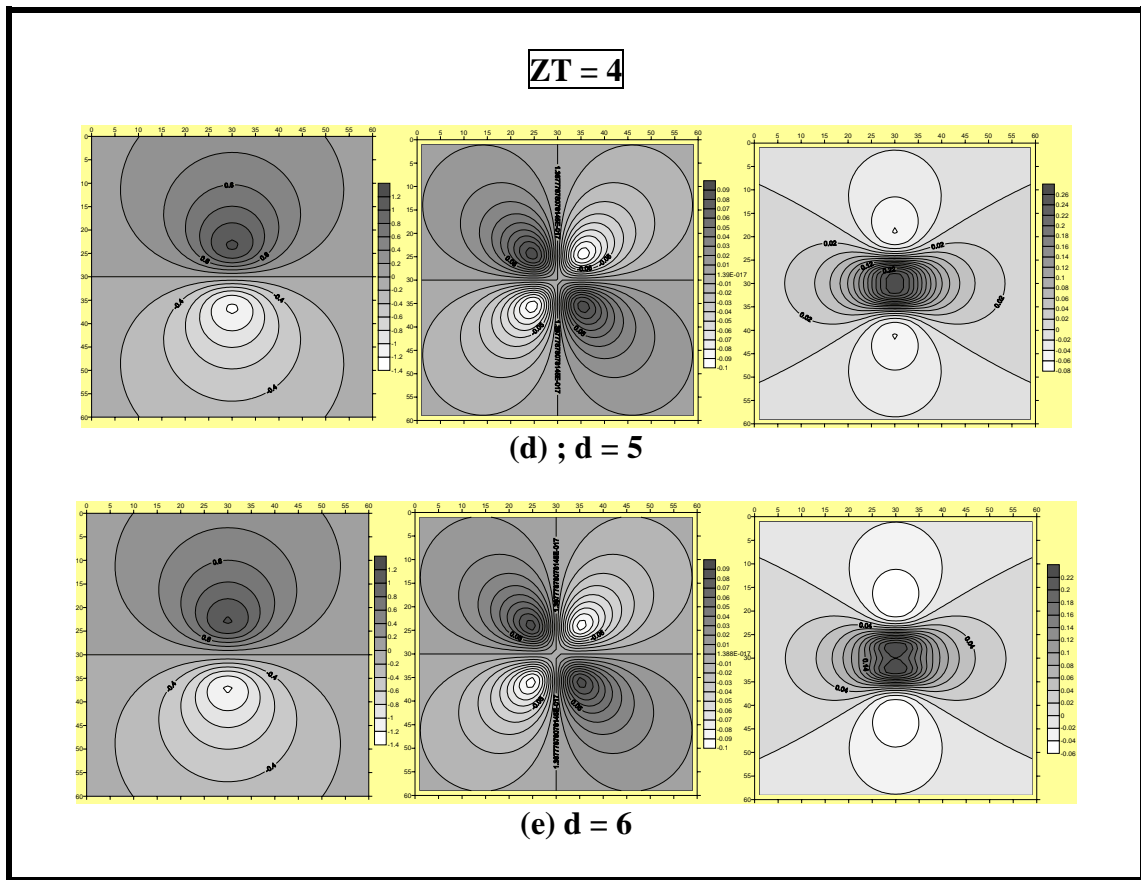


Fig. III.2. Réponse du modèle ; anomalie VLF-EM et leur dérivée-X et dérivée-Y en variant d (d) $d= 5m$; (e) $d= 6m$ pour une profondeur au toit (ZT) de 4m.

Le tableau III.1 a été établi, suite à l’analyse des différentes cartes (Fig. III.2 (e) et Fig. III.3) précisément celles des dérivées-Y, puisque à chaque profondeur au toit (ZT), une distance d , à partir de laquelle le dédoublement du lob central dans la dérivée Y se manifeste, a été déterminée :

ZT	4	5	6	7	8	9
d	6	7	8	9	10	11

Tableau III.1. Distances limites, en fonction de la profondeur au toit, à partir des quelles le dédoublement du lob central se manifeste sur les cartes des dérivées-Y.

Le tableau III.1, montre que l'écart d augmente avec la profondeur au toit ZT , ces deux paramètres sont liés par la relation suivante :

$$d = ZT + 2 \quad (III.1)$$

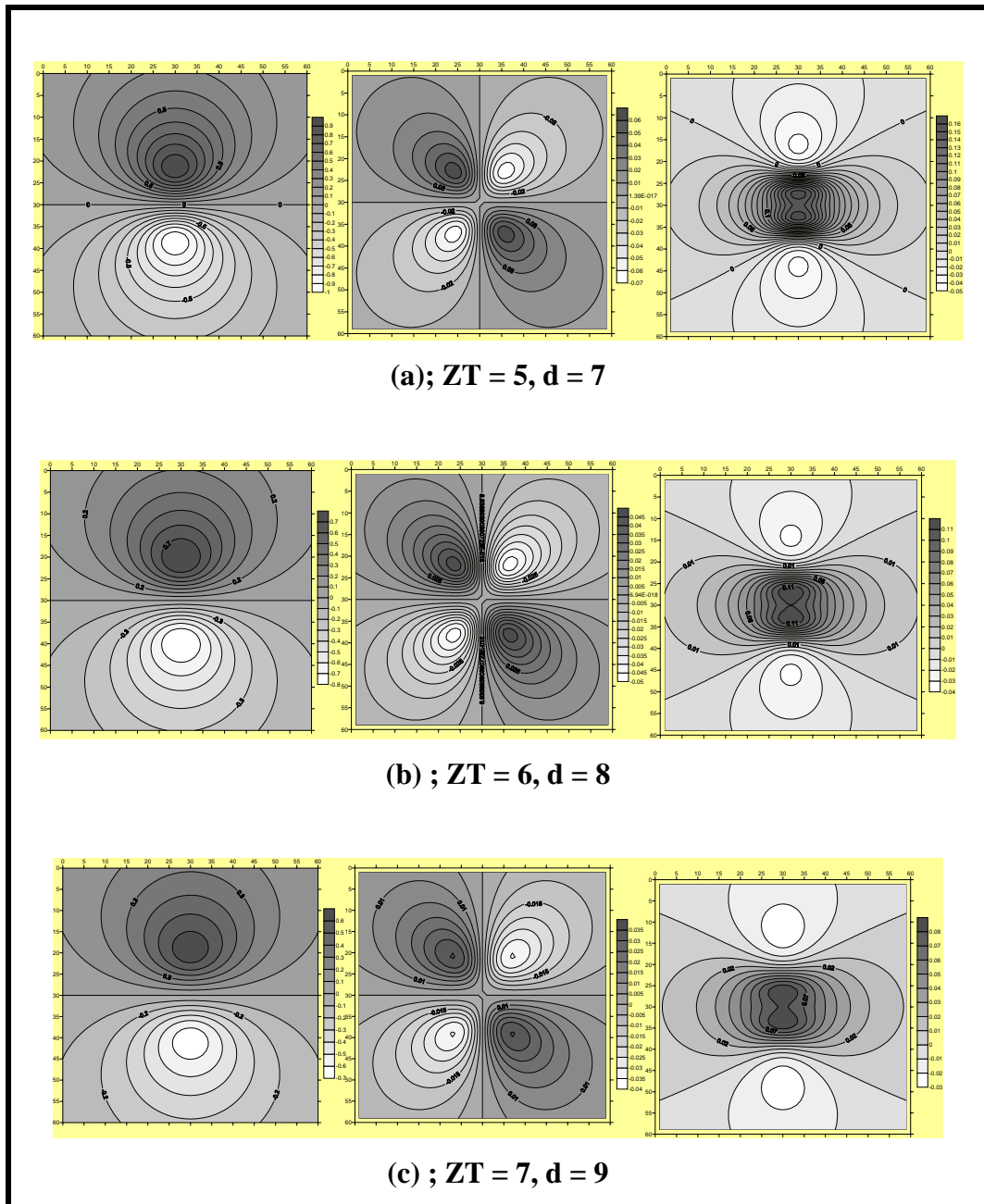


Fig. III.3. Réponse du modèle ; anomalie VLF-EM et leur dérivée-X et dérivée-Y en variant d (a) $ZT = 5m, d = 7m$; (b) $ZT = 6m, d = 8m$; (c) $ZT = 7m, d = 9m$.

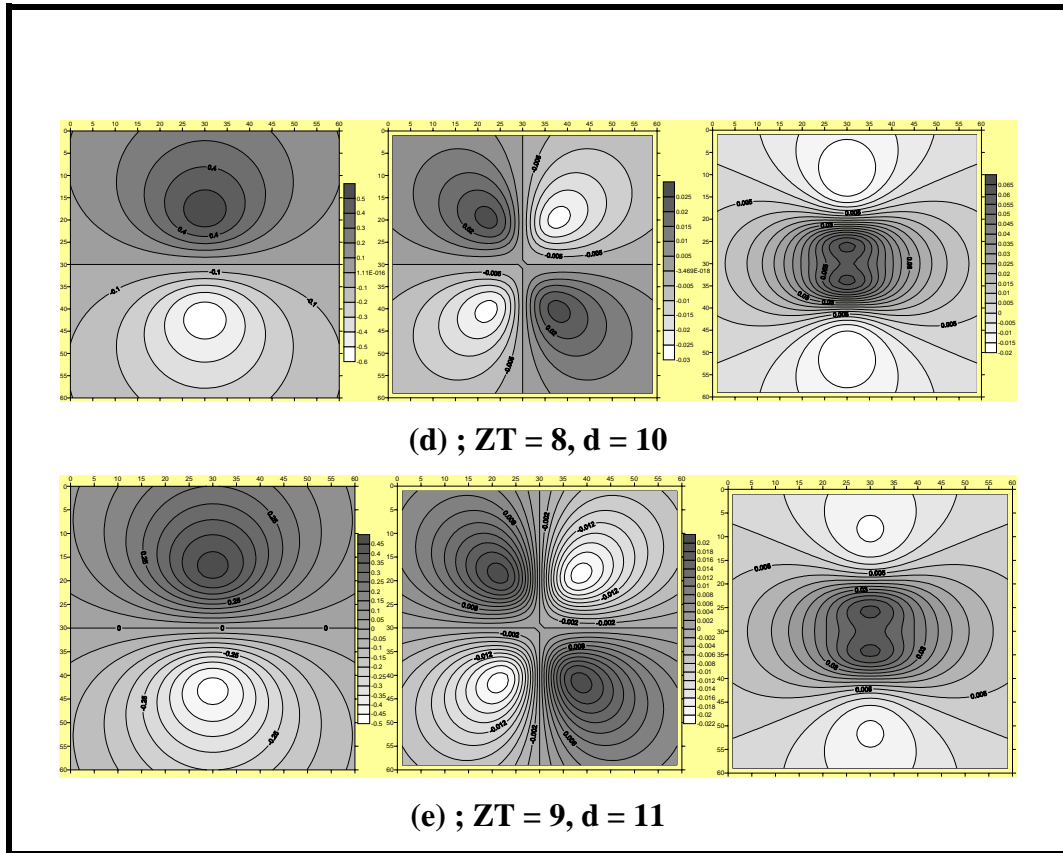


Fig. III.3. Réponse du modèle ; anomalie VLF-EM et leur dérivée-X et dérivée-Y en variant d (d) $ZT = 8m, d = 10m$; (e) $ZT = 9m, d = 11m$.

Pour généraliser, on peut dire qu'à partir de $d = ZT + 2$ les premiers changements se manifestent sur la dérivée-Y par un dédoublement du lob central. Mais, il n'est pas possible de prendre cette distance comme étant la distance limite de séparation c'est à dire ; la limite à partir de laquelle le problème de confusion, entre le cas de l'anisotropie et le cas simple, disparaît. Puisque, il reste le cas du corps épais qui peut répondre de la même manière que celle donnée par les cas limites $d = ZT + 2$. Ceci donnera lieu à un autre problème qui est le risque de confusion entre la réponse VLF-EM des deux cas de figures suivantes :

- a. un corps seul, épais
- b. deux corps distants de d .

III.1.2. La réponse du corps épais

Le modèle choisi (Fig. III.4), correspond à un corps épais de dimensions XL, YL et ZL, découpé en maille de forme cubique et de côté égal à 2, sa résistivité est ρ_c et sa profondeur au toit ZT 4m, centré dans le plan XY en un point de coordonnées ($X_C = Y_C = 30m$). Le corps se trouve dans un demi-espace infini, homogène et résistant ($\rho = 100 \Omega m$). Les calculs ont été faits à une fréquence de 20 kHz et la direction du champ électrique est suivant X (E_x).

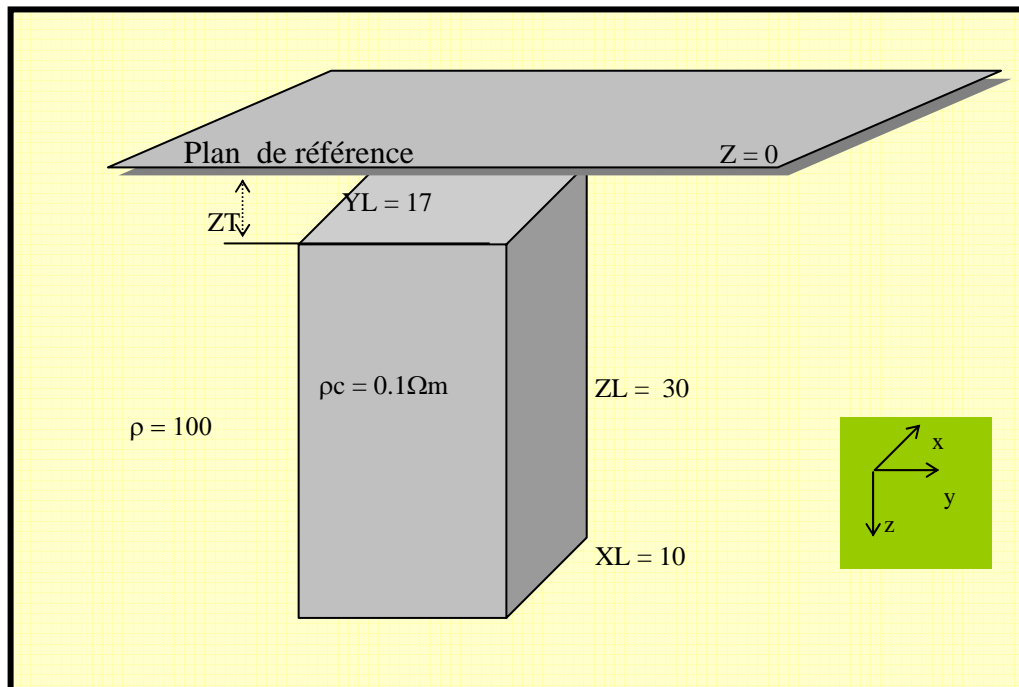


Fig. III.4. Paramètres du modèle théorique correspondant à un demi-espace comportant un corps épais.

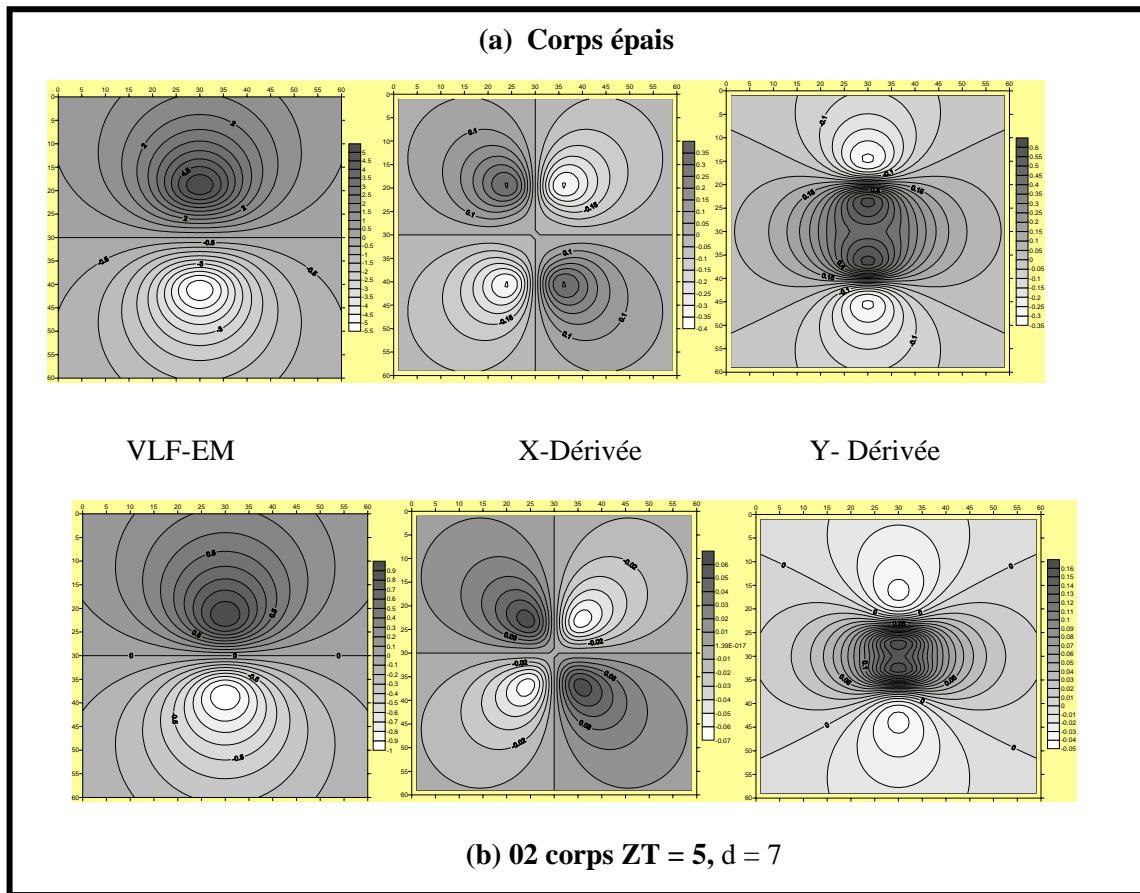


Fig. III.4. Réponse du modèle ; anomalie VLF-EM et leur dérivée-X et dérivée-Y d'un corps épais (a) et celle de deux structures séparées par une distance $d=7m$ (b).

En comparant les cartes d'anomalies et ses dérivées dans les deux directions orthogonales X et Y obtenues qui la réponse du corps épais (Fig. III.4 (a)) et celle due au modèle du terrain comportant deux structures (Fig. III.4 (b)), nous remarquons que la réponse donnée par les deux de figures est approximativement la même. Donc, à cette limite $\mathbf{d} = \mathbf{ZT}+2$, le problème de distinction entre la réponse deux modèle ne s'est pas encore résolu. A ce propos, nous avons cherché de déterminer une autre limite qui nous permet d'attribuer la réponse VLF-EM au modèle considéré.

III.2. Limite de distinction entre un corps épais et deux corps distants :

Dans cette partie, nous avons essayé de continuer l'étude donnée dans le paragraphe III.1.1, puisque le modèle de la figure III.1 a été repris, en variant toujours la profondeur ainsi que l'écart (**d**) entre les deux corps .

Nous allons interpréter seulement les cartes relatives à ZT égal à 4m. avec les écarts **d** variant entre 7m. et 10m. Nous remarquons, sur les cartes dérivées-Y, ne nette distinctions du dédoublement dans le lob central. Plus les deux structures sont distantes plus la distinction du lob est accentuée. Pour avoir donc, sur la carte de la dérivée-Y 04 extremums au lieu de trois.

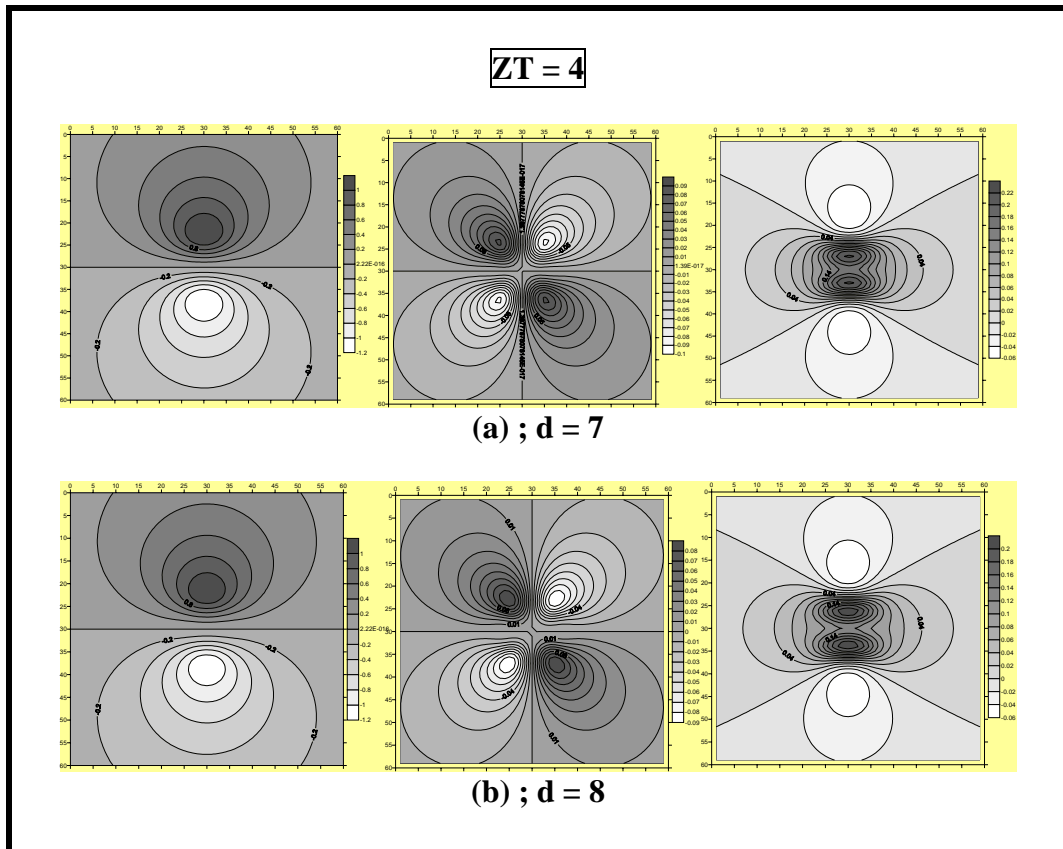


Fig. III.5. Réponse du modèle ; anomalie VLF-EM et leur dérivée-X et dérivée-Y en variant *d* (a) *d*= 7m ; (b) *d*= 8m pour une profondeur au toit (*ZT*) de 4m.

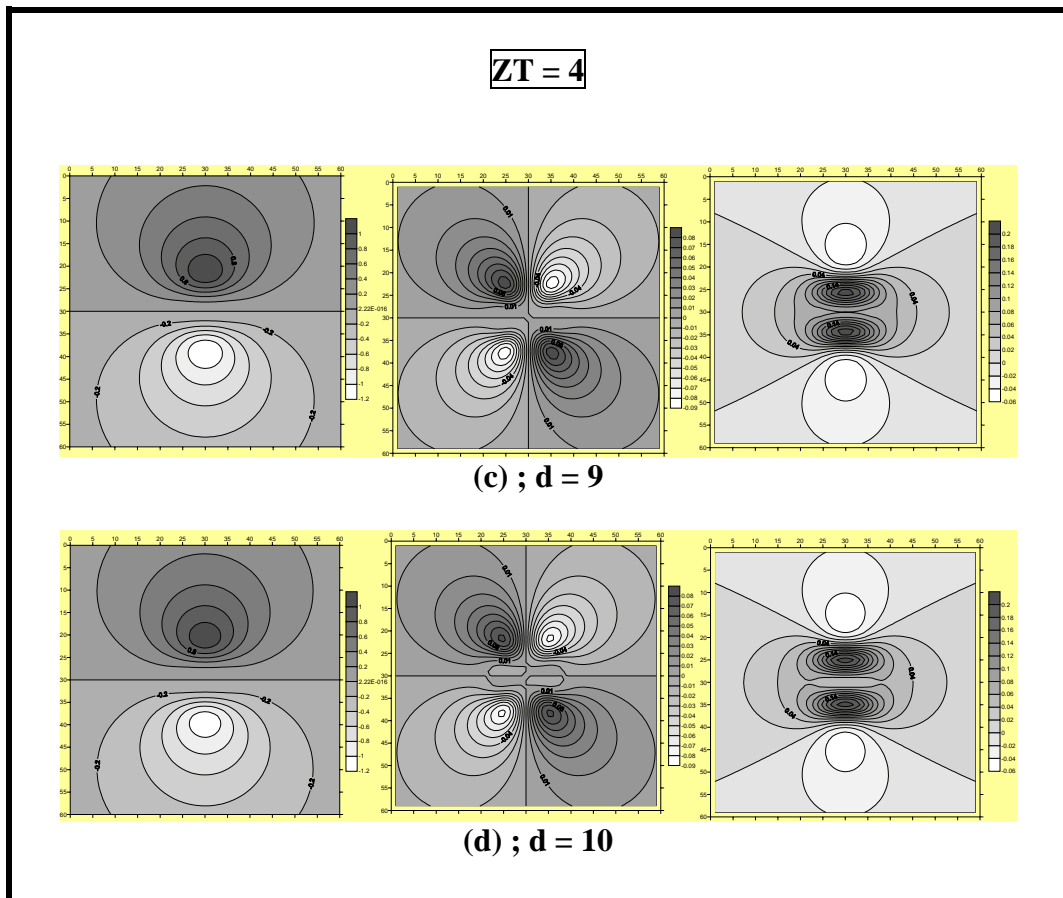


Fig. III.5. Réponse du modèle ; anomalie VLF-EM et leur dérivée-X et dérivée-Y en variant d (c) d= 9m ; (d) d= 10m, pour une profondeur au toit (ZT) de 4m.

Le tableau III.2 a été dressé suite à l'analyse des différentes cartes établies qui témoignent de l'apparition de nouvelles déformations qui se manifestent par :

- la dérivée-X se déforme dans la direction des Y,
- la dérivée-Y montre 02 pics positifs distincts au lieu d'un seul,
- l'anomalie VLF-EM montre une zone de valeurs nulles importante,

et cela à partir de la limite suivante $d \geq 2(ZT + 1)$.

Cette limite est donnée par la relation (III.2), que nous avons tiré du tableau III.2, où la réponse de l'anomalie VLF-EM et ses dérivées (Fig. III.6) ne peut en aucun cas être liée au modèle d'un seul corps épais.

ZT	4	5	6	7	8	9
d	10	12	14	16	18	20

Tableau III.2. Distances limites, en fonction de la profondeur au toit, à partir des quelles on observe du dédoublement du lob central se manifeste sur les cartes des dérivées-Y, 08 extremums apparaissent sur les cartes dérivées-X.

Le tableau ci-dessus, montre que l'écart d augmente avec la profondeur au toit ZT , ces deux paramètres sont liés par la relation suivante :

$$d = 2(ZT + 1) \quad (III.2)$$

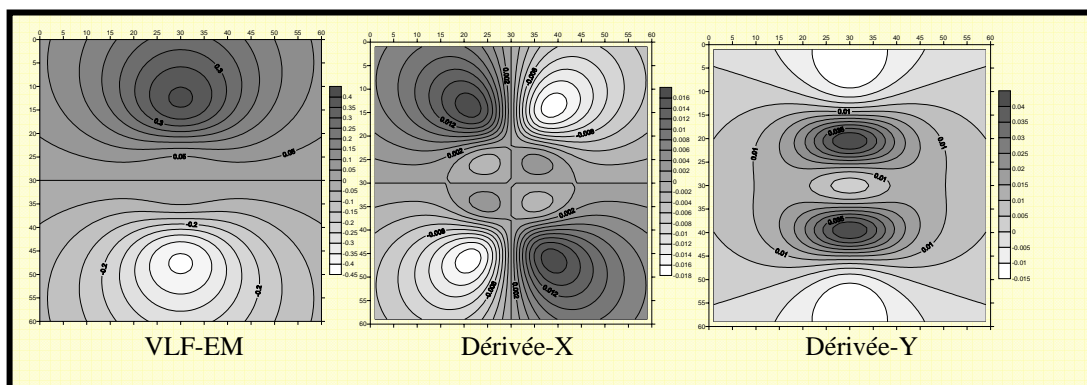


Fig. III.6. La réponse du modèle quand la relation entre la profondeur au toit (ZT) et la distance entre les structures (d) est vérifiée $d \geq 2(ZT + 1)$.

Les différents cas traités sont reproduits dans le Tableau ci-dessous :

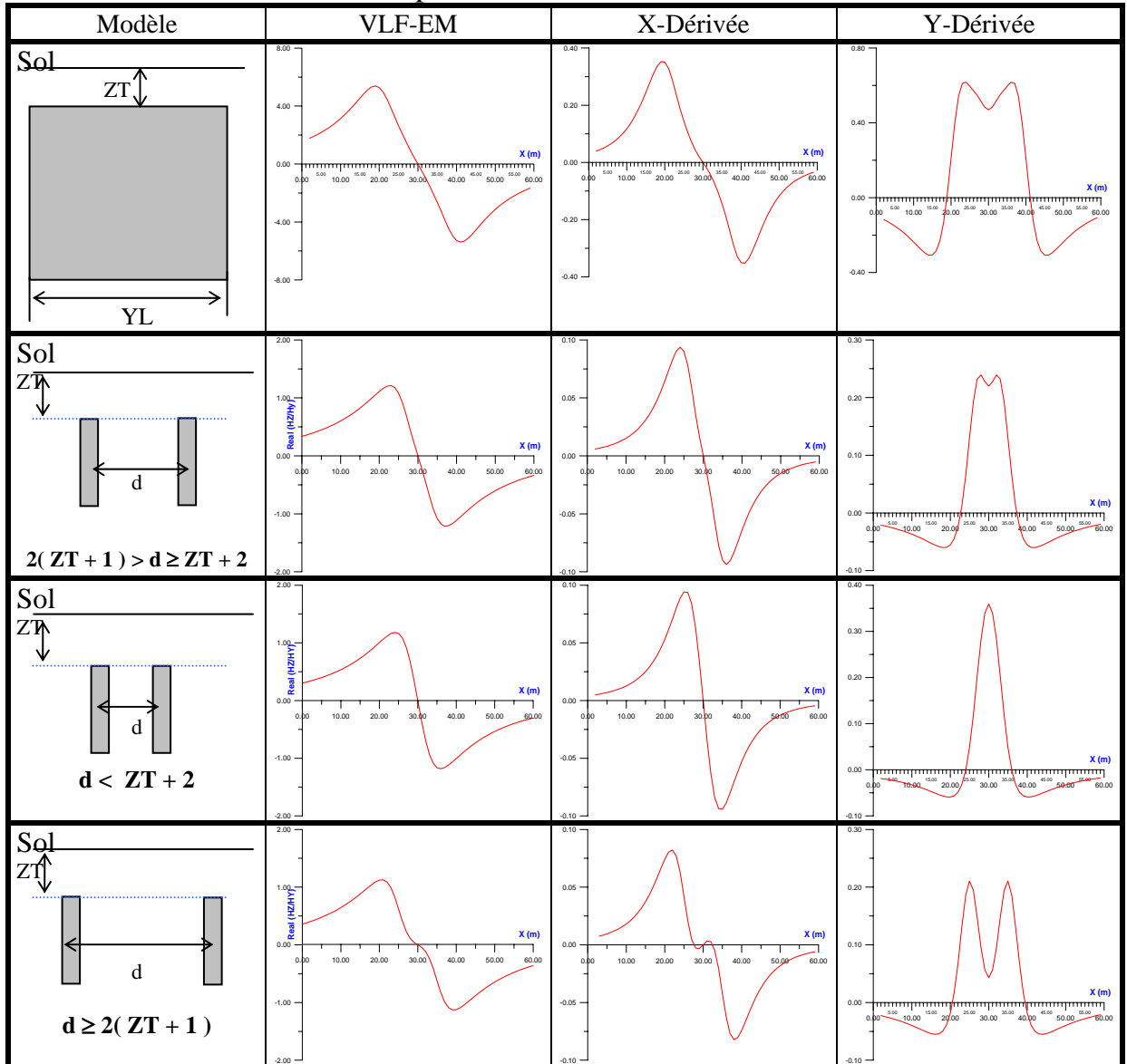


Tableau III.3. identification de certains cas en fonction de d , ZT et l'épaisseur.

- $d < ZT + 2$, la forme de l'anomalie et ses dérivées est semblable à celle donnée par un corps seul mince ou ayant une certaine épaisseur, donc impossible de séparer entre les deux modèles.
- $2(ZT + 1) > d \geq ZT + 2$, pour ce cas la réponse du modèle de deux corps peut être confondue avec celle donnée par un corps épais.
- $d \geq 2(ZT + 1)$, il sera possible de distinguer la réponse d'un corps épais de celle de deux corps séparés par une distance d (Fig. III.6), puisque ; (a) l'anomalie VLF-EM montre un étalement autour des valeurs nulles, (b) la dérivée dans la direction des X montre plus de 04 extremums habituellement rencontrés, (c) un très net dédoublement apparent sur la carte dérivée-Y.

Cette partie est consacrée à l'étude des corps inclinés. Nous allons essayer de traiter les données VLF-EM, précisément les données d'inclinaison par l'application du filtre de dérivation afin de déterminer l'extension des structures dans le plan horizontal. Le pendage sera évalué à l'aide de l'abaque, Baker (1979). A partir du pendage et des extensions dans le plan horizontal, nous calculons l'extension dans le plan vertical.

IV.1. Application aux cas synthétiques :

Le modèle adopté dans ce cas est donné par figure (IV.1), il représente un demi-espace, infini, homogène et de résistivité ρ . Une structure, de dimensions XL, YL, ZL et de résistivité ρ_c , est incorporée dans le terrain à une profondeur au centre Z0.

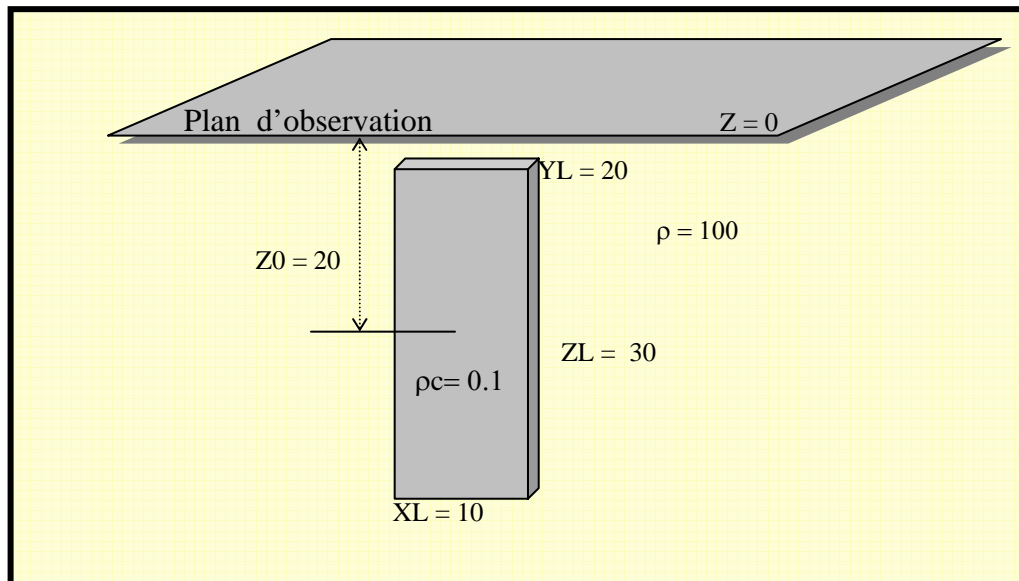


Fig. IV.1. Modèle théorique.

Pour les calculs, la rotation du corps s'est fait par rapport au centre de la structure autour de l'axe X dans le sens conventionnel positif (Fig. IV.2).

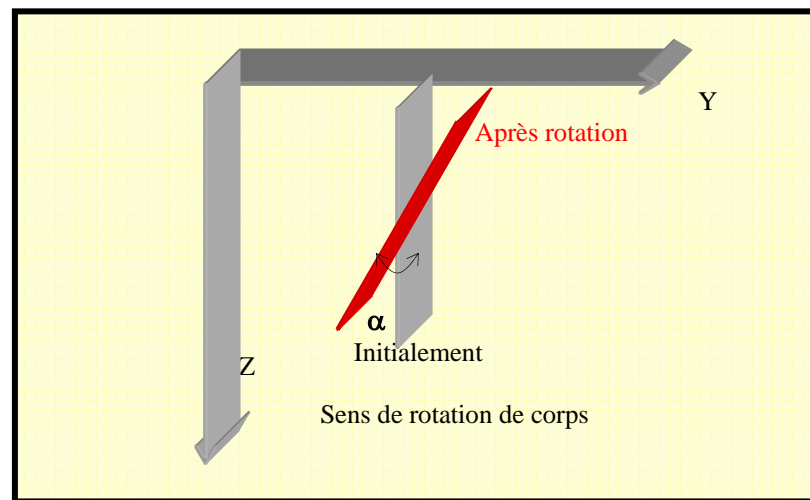


Fig. IV.2. Sens de rotation de la structure par rapport à son centre parallèlement à l'axe des X dans le plan YZ.

Les anomalies VLF-EM résultant de la variation de l'angle α , sachant qu'initialement le corps est vertical, ont été cartographiées exactement dans le même contexte que celui utilisé pour les calculs dans le programme de modélisation. Puisque ces derniers sont faits pour un système d'axe (x, y, z) régulier, avec z positif vers le bas. Dans des études pareilles, lors de la schématisation, il faut faire très attention parce que les logiciels utilisés pour le tracé des cartes risquent de nous induire en erreur, vu qu'une rotation rentre en jeu. Pour que le logiciel utilisé donne une carte juste, il faut faire une petite modification des coordonnées sur l'axe des Y.

La carte qui résulte du tracé direct des résultats est donnée par la figure (IV.3(a)) et celle qu'a subit la modification est bien montrée par figure IV.3.(b).

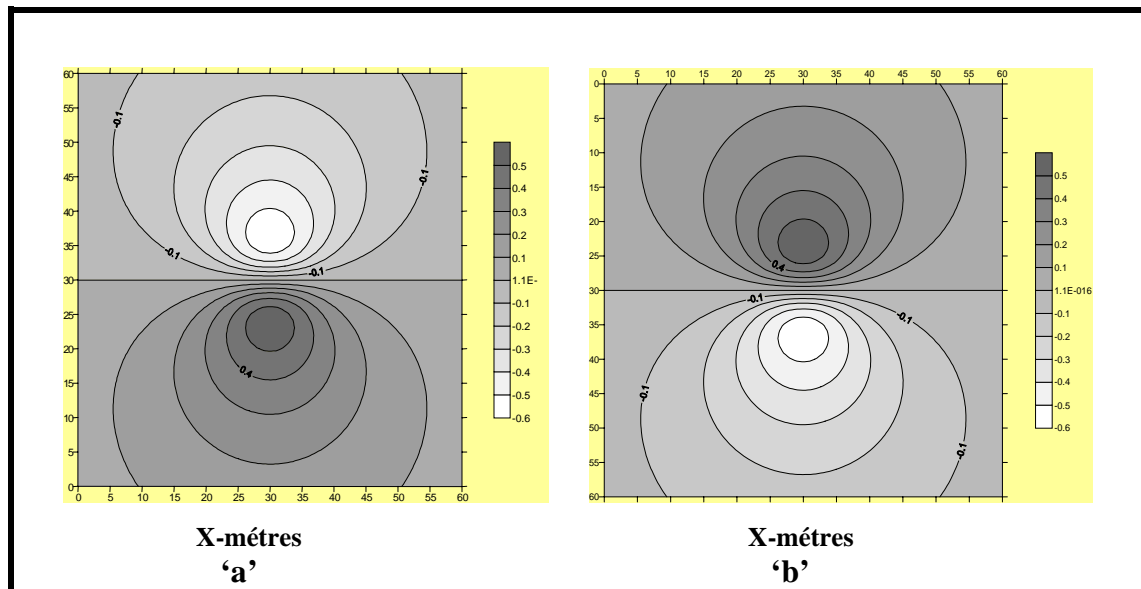


Fig. IV.3. Cartes d'anomalie VLF-EM (a) l'axe des Z vers le bas (b) Z vers le haut.

La différence entre les deux cartes de la figure IV.3, est claire puisque l'une correspond à l'image de l'autre par rapport à l'axe des X. La carte de figure IV.3'a' est tracée directement par un logiciel elle est relative à trièdre régulier avec l'axe des Z dirigé vers le haut. Cette orientation est imposée par le logiciel lors du tracé. Delà, on remarque que le logiciel nous impose le système.

Par contre, celle de fig. IV.3.'b' est une carte tracée dans un système d'axe régulier avec z vers le bas, par conséquent nous sommes revenus au même système que celui utilisé dans le programme de modélisation.

L'intérêt de cette modification apparaîtra bien, une fois le corps est incliné.

Donc, pour montrer l'intérêt de la modification nous avons considéré le cas de $\alpha=30^\circ$ dans les deux systèmes une fois Z dirigé vers le haut (imposé par logiciel) et une autre fois avec Z dirigé vers le bas (la vraie orientation du système).

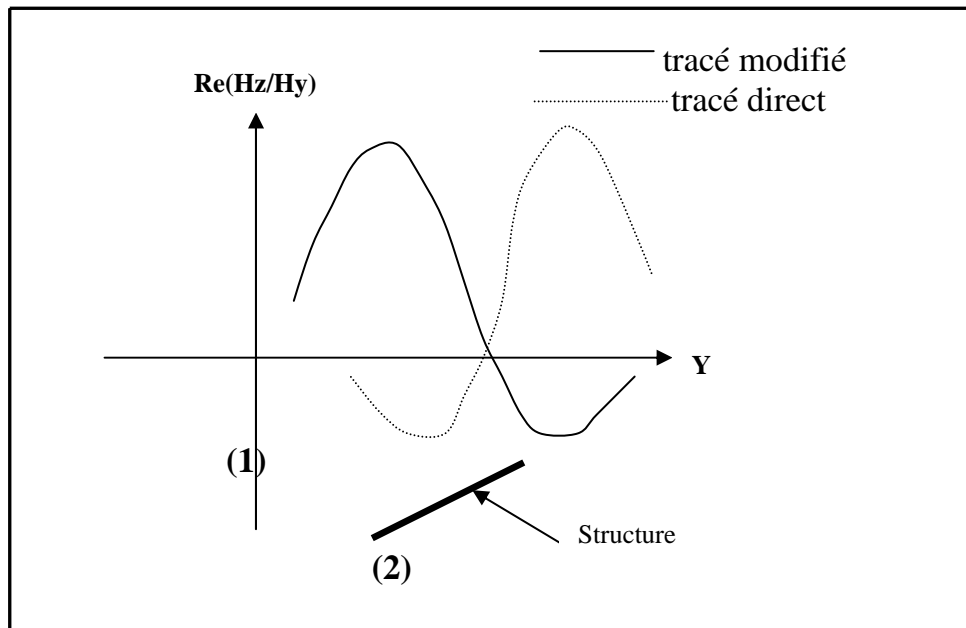


Fig. IV.4. profils d'anomalie VLF-EM

——— Z vers le bas
 Z vers le haut

Le schéma de la figure (IV.4) fait apparaître la différence entre les deux tracés, puisque sur la courbe d'anomalie VLF-EM correspondant au tracé direct nous remarquons que l'amplitude maximale est donnée par le toit du corps (1), contrairement au tracé modifié où on remarque que l'amplitude maximale correspond le côté bas (2) de la structure.

Les cartes d'anomalies VLF-EM, reflétant la réponse du corps à différents angles, sont présentées par la figure ci-après :

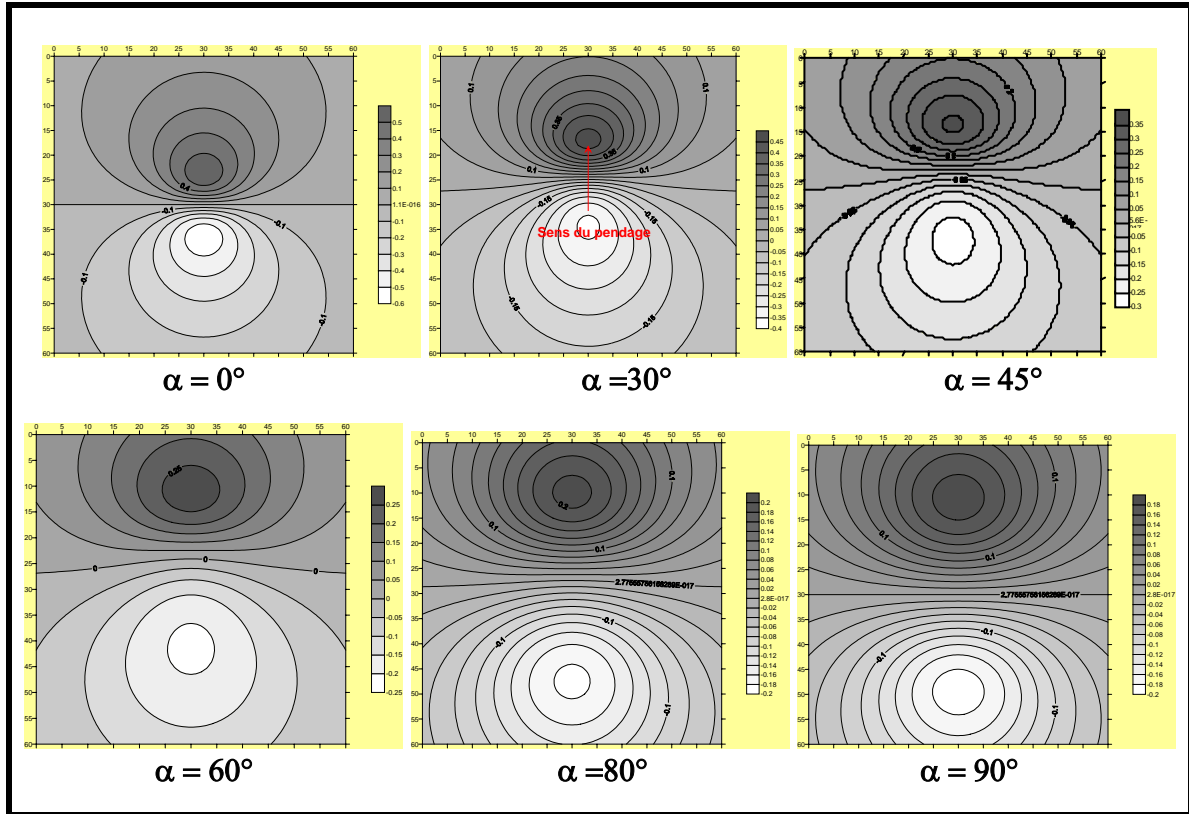


Fig. IV.5. Effet de la rotation de la structure dans le plan vertical sur la forme de l'anomalie.

IV. 1.1. Calcul du pendage :

Le pendage sera évalué à partir de l'abaque établi par Baker 1975, plus précisément, du graphe donnant la relation entre pendage et DR.

Sachant que DR, représente la différence en valeur absolue entre les valeurs Maximale (M) et Minimale (N) de l'anomalie VLF-EM, est donné par la relation suivante :

$$DR = (|M| - |N|) \quad (IV.1)$$

Après avoir effectué le tracé des cartes reflétant la réponse du corps incliné à différents angles (de 0° à 90°) une analyse de ces dernières a été nous renseignant de l'apparition d'une asymétrie qui se prononce seulement dans les cas où le corps est penté. L'asymétrie est clairement visible sur les coupes faites parallèlement à l'axe des Y (Fig.IV.6), plus précisément pour les angles de 30° , 45° , 60° et 80° .

Delà, il sera valable de lier la présence d'une asymétrie sur les cartes VLF-EM à un pendage. Afin de déterminer le pendage des structures, nous avons utilisé les coupes de la figure (IV.6) pour calculer le DR correspondant à chaque cas.

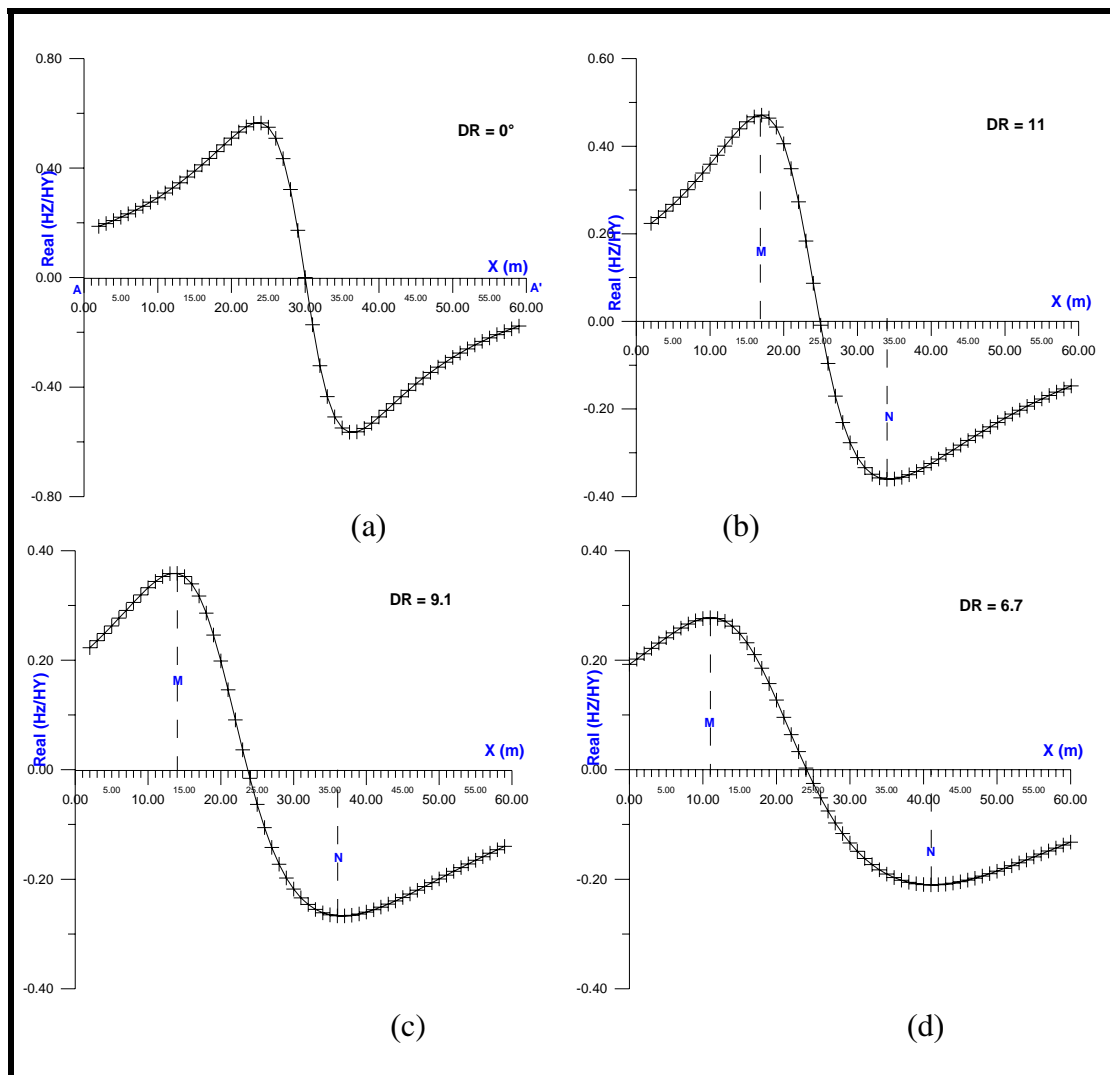


Fig. IV.6. profils d'anomalie VLF-EM, pour le calcul de DR et la détermination des pendages. (a) $\alpha = 0^\circ$, (b) $\alpha = 30^\circ$, (c) $\alpha = 45^\circ$ (d) $\alpha = 60^\circ$.

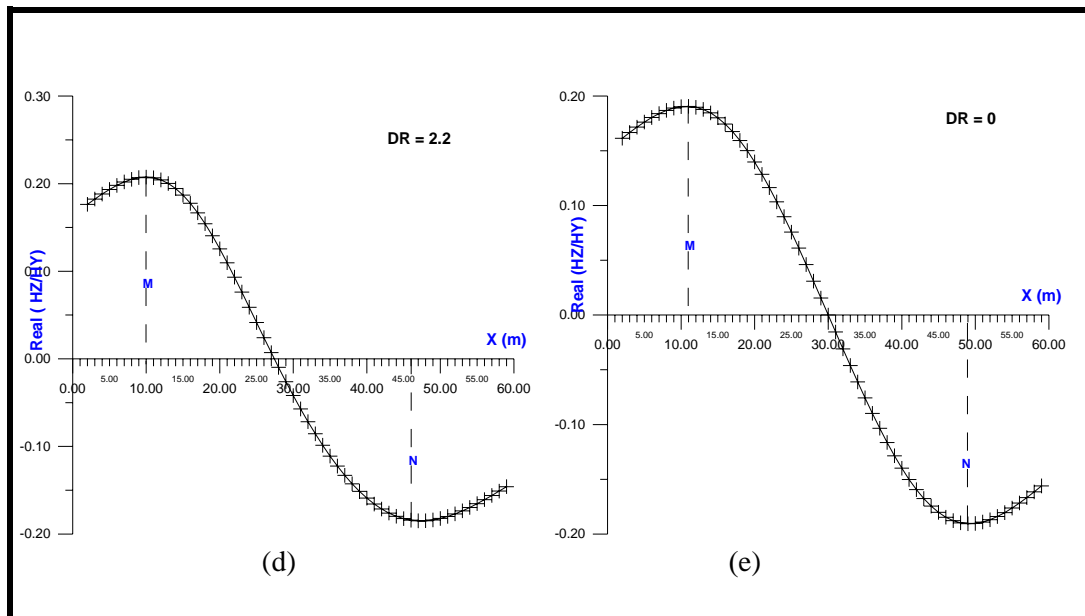


Fig. IV.6. profils d'anomalie VLF-EM, pour le calcul de DR et la détermination des pentages. (d) $\alpha = 80^\circ$, (e) $\alpha = 90^\circ$.

Les angles calculés de l'abaque (Fig. IV.9) sont donnés par le tableau ci-dessous :

α Réel/verticale	DRm	β Angle trouvé (abaque)
0°	0	0°
30°	11	-30°
45°	9.1	-45°
60°	6.7	-60°
80°	2.2	-80°
90°	0	0°

Tableau IV.1. DRm calculés et leur angles correspondant tirés à partir des abaques.

Bien que, les angles de α (Réel) et β (calculé) donnés par le tableau IV.1, sont en valeur absolue égaux, un problème est apparu. En positionnant le corps avec l'angle β calculé, nous avons trouvé que cette position ne coïncide pas avec la position réelle du corps. Sur la figure (IV.7), on remarque que α correspond au complément du pendage par contre β représente le pendage.

En principe si α Réel est de 30° , le pendage doit être forcément -60° (Fig. IV.7), par contre le pendage que nous avons tiré de l'abaque est égal -30° .

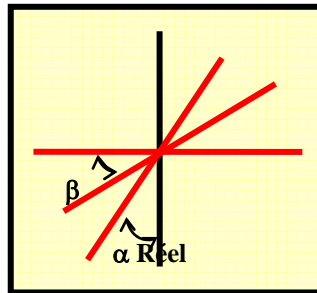


Fig. IV.7. Relation entre les angles α et β .

En comparant, les figures IV.8 et IV.8.a (Baker, 1979), nous remarquons que la réponse, en terme d'amplitude, donnée par les deux cas est la même puisque, sur les deux graphes, nous remarquons que plus le corps s'approche de l'horizontale son amplitude diminue, la plus grande amplitude correspond à la position verticale.

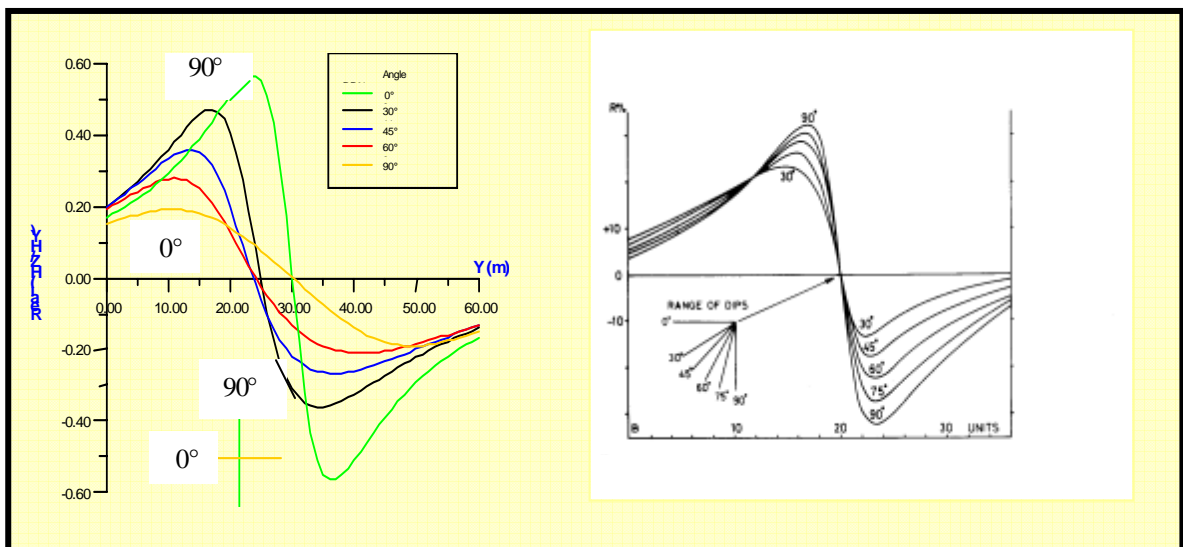


Fig. IV.8. Réponse de l'anomalie VLF pour différentes positions du corps à partir des calculs théoriques.

Fig. IV.8.a; Baker 1979, Réponse de l'anomalie VLF pour différentes positions du corps.

Ceci s'expliquera comme suit ; sachant que dans notre cas nous avons considéré un corps de dimensions (10x2x30), initialement vertical, nous avons augmenté l'angle de rotation jusqu'à ce que le corps prenne la position horizontale sans oublier de rappeler que la rotation s'est fait par rapport au centre du corps.

Il est connu que l'amplitude de l'anomalie VLF-EM est inversement proportionnelle à la profondeur au toit du corps à cet effet, vu que dans notre cas le corps tourne par rapport à son centre, sa profondeur au toit augmente. C'est cela qui a causé la diminution de l'amplitude.

La rotation du corps induira aussi l'augmentation de son extension dans la direction des Y, ce qui causera l'augmentation de la distance pic à pic.

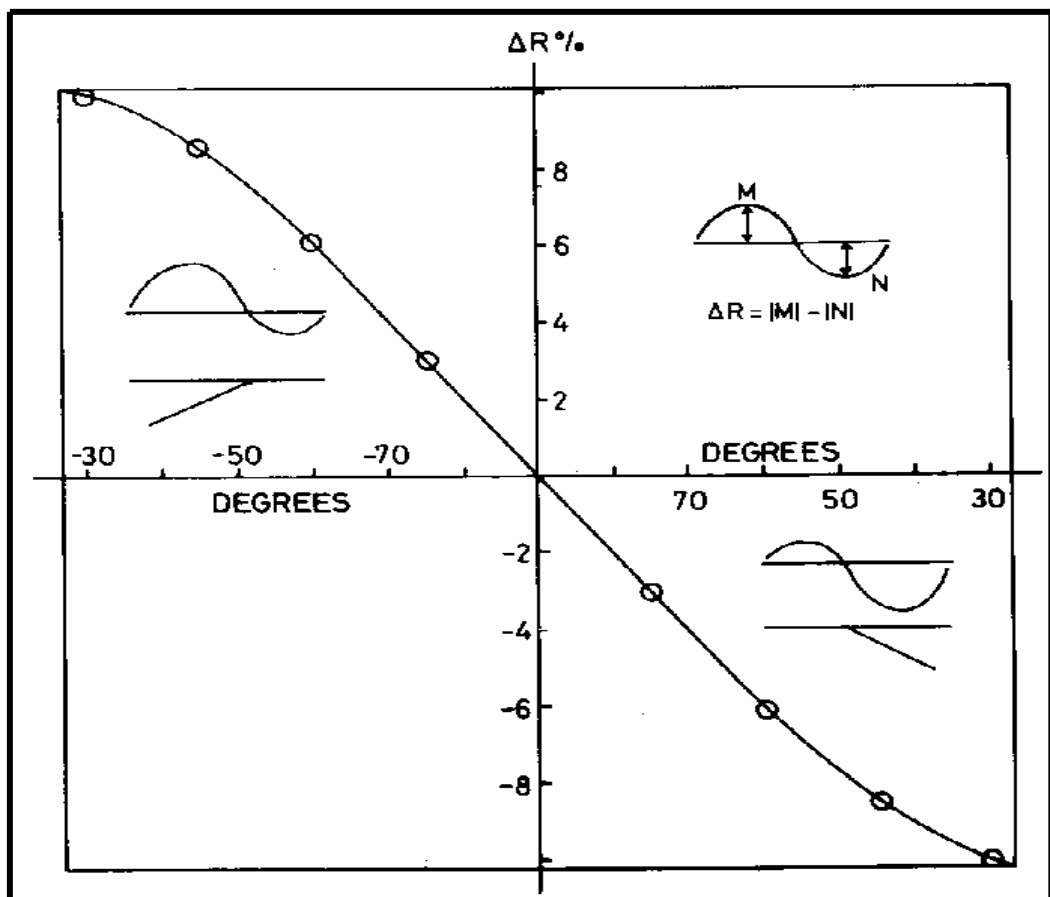


Fig. IV.9. Abaque donnant les angles en fonction de DR d'après Baker (1979).

IV.1.2. Variation de la réponse VLF-EM avec l'origine de la rotation

IV.1.2. 1. Rotation par rapport au centre du corps

Si, le corps subit une rotation par rapport à son centre, nous remarquons que l'amplitude de l'anomalie augmente avec le pendage.

Puisque, avec l'augmentation du pendage, la profondeur au toit du corps augmente à son tour ainsi que l'amplitude.

Ce résultat est tiré de l'étude faite plus haut.

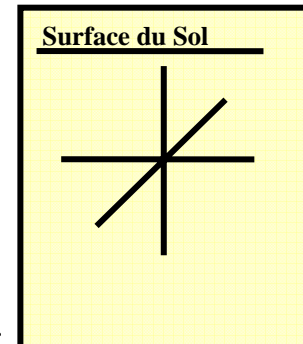


Fig. IV.10. Rotation / au centre.

IV.1.2. 2. Rotation par rapport au toit du corps

A partir, des cartes d'anomalies (Fig. IV.12, a et b) obtenues, nous avons tracé l'anomalie VLF-EM (Fig. IV.12, c).

Contrairement au cas précédent, dans ce cas, nous remarquons que l'amplitude diminue avec augmentation du pendage, ceci peut être expliquer comme suit ; la profondeur au toit reste la même puisque le corps subit une rotation par rapport à son toit (Fig. IV.11).

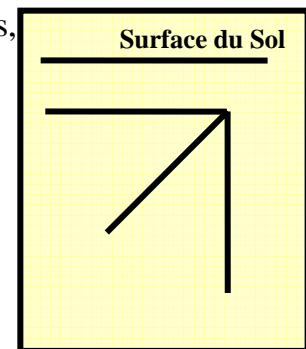


Fig. IV.11. Rotation / au toit.

Alors, plus le corps est près de l'horizontal, le flux de courant devient plus important, ce qui provoquera l'amplification de l'amplitude de l'anomalie.

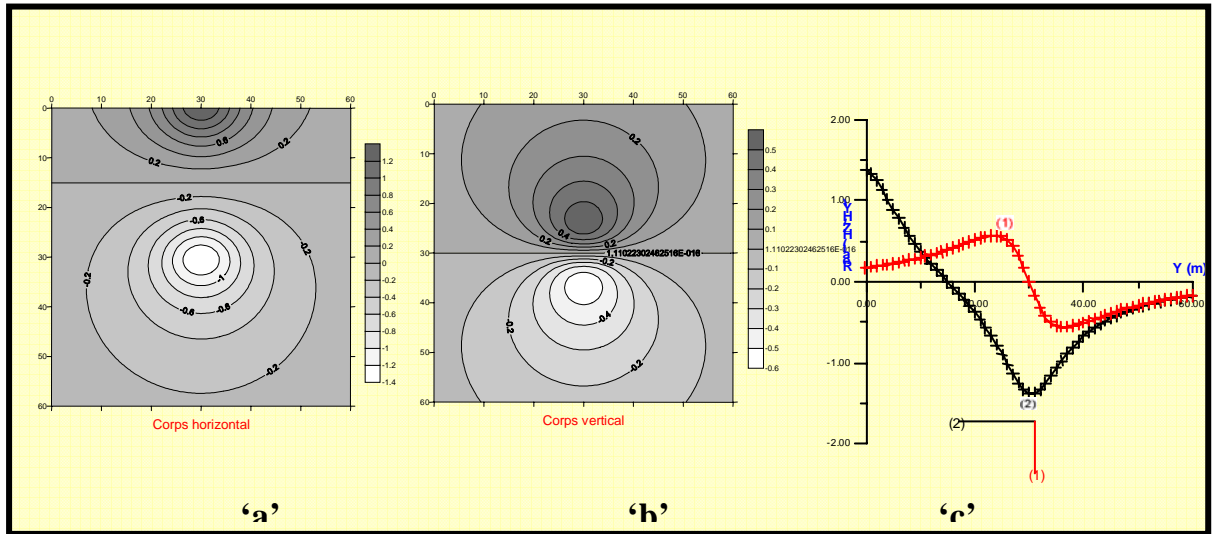


Fig. IV.12. Effet de l'origine de la rotation sur la réponse de l'anomalie VLF-EM.

IV.1.3. Application du filtre de dérivation :

IV.1.3.1. Calcul des extensions dans le plan horizontal :

La détermination des extensions dans le plan horizontal s'effectue à partir des cartes dérivées d'anomalie dans les deux directions du plan horizontal (X et Y).

Nous tenons à préciser que la détermination des extensions (XL et YL) dans le plan horizontal d'une structure donnée, en appliquant la méthode du filtre dérivée, se fait en procédant comme suit :

1. d'abord, il faut tracer les cartes des dérivées X et Y (Fig. IV.13 et IV.14).
2. sur la carte de X- dérivée (Fig. IV.13), faire une coupe parallèle à l'axe des X et passant par les deux extremums, la distance entre ces deux extremums sera prise comme étant XL.
3. sur la carte Y- dérivée (Fig. IV.14), prendre une coupe parallèle à l'axe des Y et qui passe par les 03 extremums. YL correspondra à la largeur à mi-hauteur du lob central (0.5 de l'amplitude MAX).

Dans ce travail nous avons calculé YL de deux autres façons, dans la première nous avons considéré YL égal à la largeur au un-dixième (0.1 MAX) de la hauteur et dans la deuxième, YL est pris égal à la largeur au neuf-dixième (0.9 MAX) de la hauteur, comme il est représenté par la figure (IV.15)

Les dimensions calculées après traitement des données par la méthode du filtre de dérivation sont reportées sur le tableau (IV.2), YLPC correspond à l'extension du corps dans la direction des Y. Réellement le YLPC, n'est pas une extension mais il représente la projection du corps sur l'axe des Y (Fig. IV.16).

L'extension calculée dans la direction des X est notée XLC.

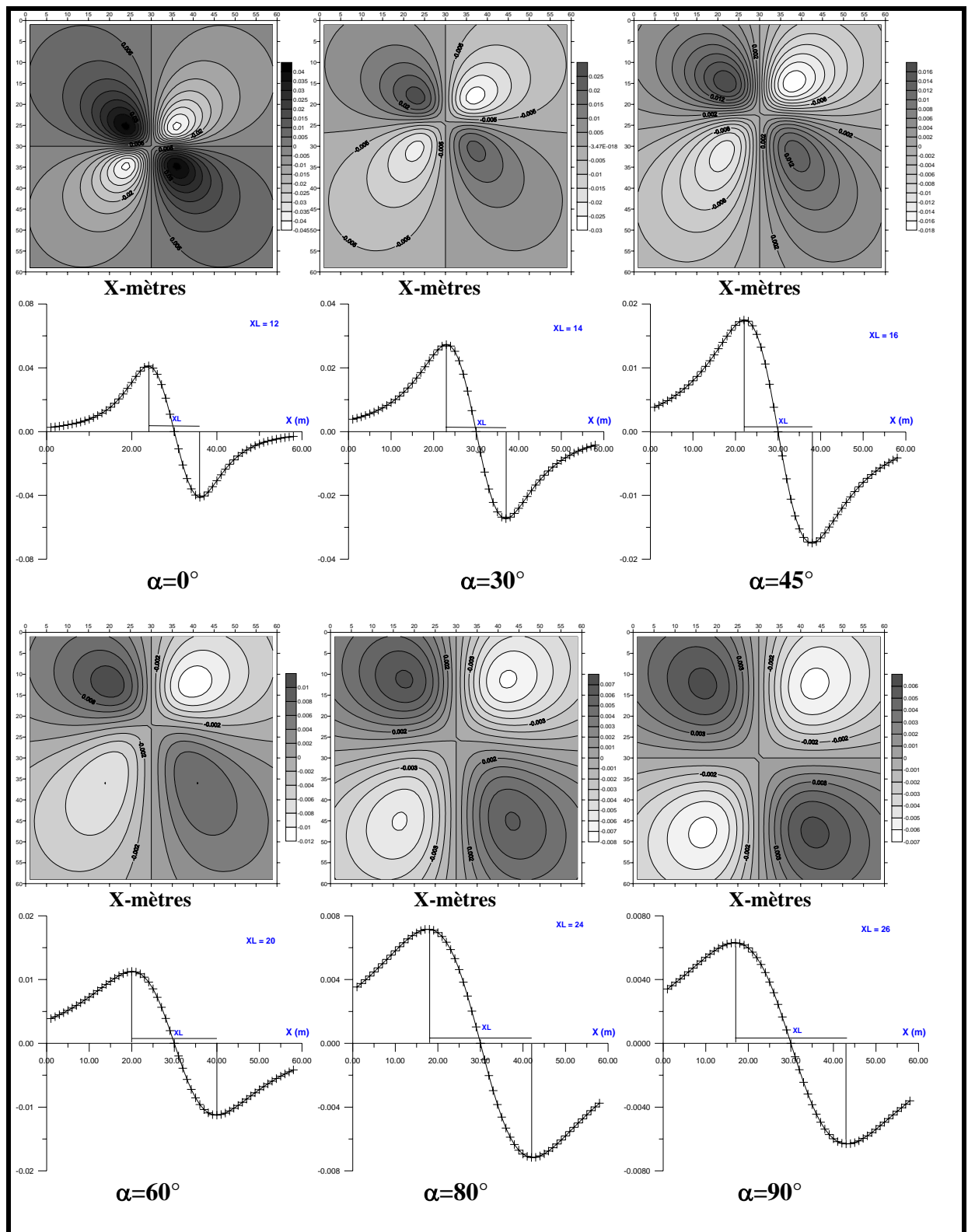


Fig. IV.13. Cartes des dérivées- X et coupes parallèles à l'axe des X passant par 02 extremums.

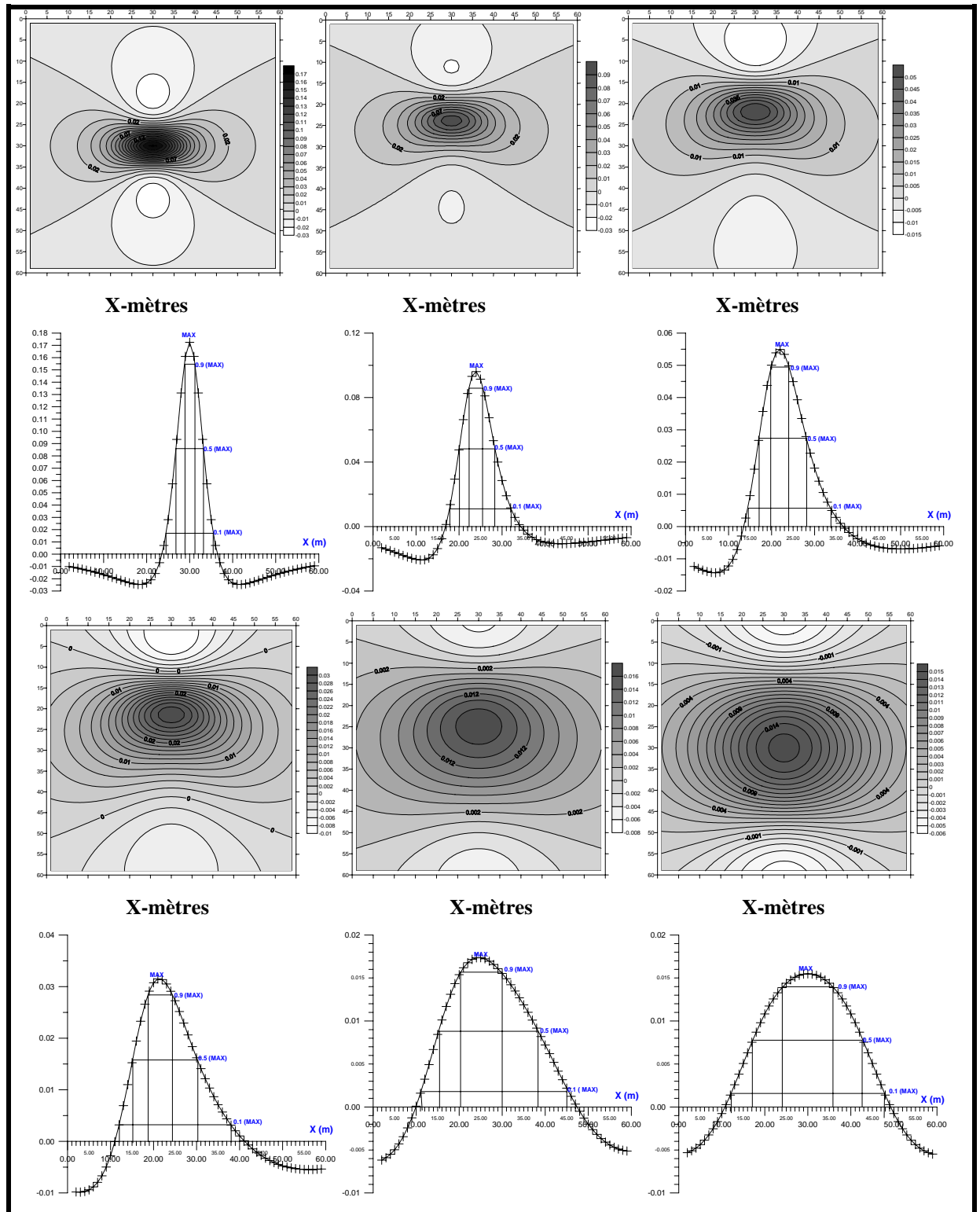


Fig. IV.14. Cartes des dérivées- Y et coupes parallèles à l'axe des Y passant par X=30m.

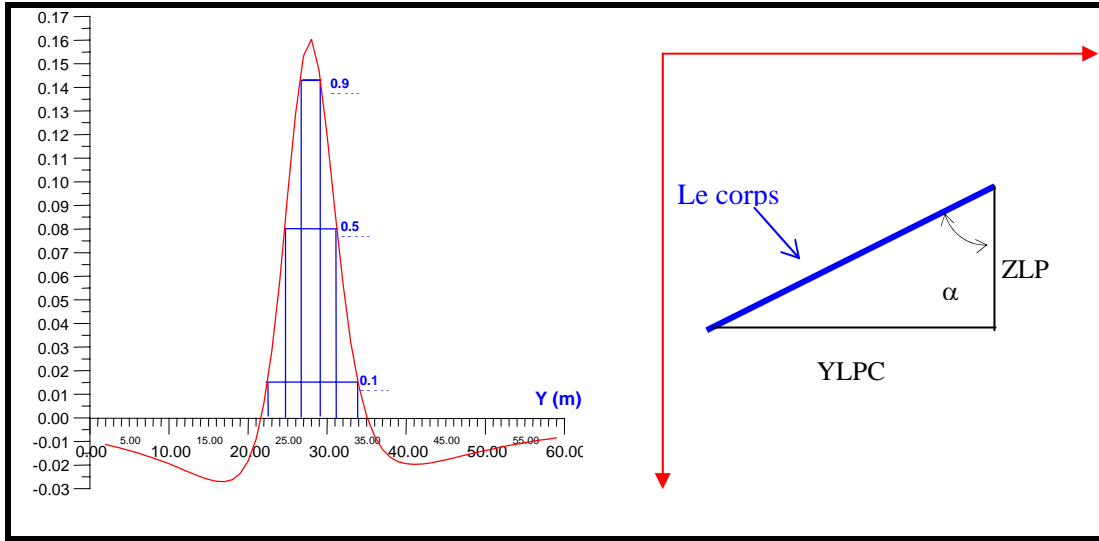


Fig.IV.15. Largeur (YL) pour les coefficients 0.1, 0.5 et 0.9 du Maximum.

Fig. IV.16. Identification des différentes largeurs calculées.

α	YL Réel (projeté)	YLPC (0.1 MAX)	YLPC (0.5 MAX)	YLPC (0.9 MAX)	XLC	XL Réel
0°	2	11	6	2	12	10
30°	15	14	8	3	14	10
45°	21	19	11	4	16	10
60°	26	26	15	6	20	10
80°	29.5	33	22	9.5	24	10
90°	30	37	25	12	26	10

Tableau IV.2. Dimensions XL et YL calculées pour les différentes positions (angles) de la structure.

L’analyse, du tableau ci-dessus, nous amène à tirer les constatations suivantes :
 En ce qui concerne les dimensions de la structure dans la direction des X, XL doit rester constant et égale à 10 m quelque soit l’angle (α). Les extensions que nous avons calculé dépassent la dimension réelle et la seule dimension jugée acceptable correspond à $\alpha = 0^\circ$ (position verticale). Nous dirons donc, que la méthode du filtre dérivé n’a pas donné de bon résultat.

Cela, est sûrement dû à la non-vérification de la condition d'application du filtre dérivé, qui précise qu'une estimation (des dimensions) est acceptable seulement quand la profondeur du toit est plus petite ou égale à la plus petite des dimensions dans le plan XY (DJEDDI, (1998)).

En ce qui est des dimensions dans la direction des Y, elles sont évaluées par rapport à trois coefficients donnés par la figure (IV.15), les largeurs à mi-hauteur ne convergent pas bien aux dimensions réelles à part celle donnée par $\alpha = 90^\circ$.

Pour les structures inclinées, nous remarquons que les largeurs à un-dixième de la hauteur se rapprochent des dimensions réelles des structures. Pour les largeurs à neuf-dixième de la hauteur, la seule largeur qui se rapproche de la vraie dimension est donnée par le premier cas ($\alpha = 0^\circ$), là où le corps est mince.

IV.1.3.2. Calcul de l'extension verticale (ZLP) :

Ce paramètre sera calculé en combinant le pendage et YLPC calculés précédemment, ceci n'est valable que dans le cas des corps inclinés, en utilisant la formule suivante :

$$\mathbf{ZLP = YLPC / \tan \alpha} \quad (\text{IV.2}).$$

α	YLPC (0.1 MAX)	ZLPC	ZLP (Réel)
30°	14	24.2	26
45°	19	19	21.2
60°	26	15	15
80°	33	5.8	5.2

Tableau IV.3. Dimensions XL et YL calculées pour les différentes positions (angles) de la structure.

Les résultats du tableau IV.3 sont très encourageants puisque les dimensions calculées (ZLPC) dans le plan vertical sont très proches des dimensions réelles (ZLP Réel).

Conclusion

Les méthodes VLF renseignent d'un avenir prometteur à cause des développements très avancés qu'elles connaissent et à la modernisation de ses outils, l'application et l'intégration de ces techniques se sont diversifiées ces dernières décennies. Grâce à cette impression, nous avons utilisé les données VLF, l'inclinaison et la racine de la résistivité, afin de les transformer en paramètres géométriques tel que : dimensions, positions et pendages etc.

La délimitation des structures perturbatrices dans le plan vertical (extension verticale) constituait, jusque-là un problème d'un grand intérêt dans les domaines de géophysique de subsurface.

Dans ce travail, nous avons réussi à traiter ce problème après détermination de la profondeur au centre, combinée à celle du toit, en s'inspirant de l'équation d'homogénéité d'Euler qui fait apparaître la relation liant les gradients du champ aux coordonnées des structures perturbatrices.

Bien que, l'application de cette méthode aux données de la racine de la résistivité n'a pas fourni de bon résultat, mais son avantage et son intérêt se sont manifestés suite à son application aux données de l'inclinaison. Cela, nous a permis d'avancer un critère de sélection de la bonne profondeur au centre.

L'application de la méthode du filtre dérivé, dans le plan horizontal et sur les données de la VLF-EM, plus précisément les données de l'inclinaison, dans le cas des corps inclinés et le cas des terrains qui présentent une anisotropie latérale, nous a été très bénéfique et concluante. Puisqu'il a permis d'affiner notre interprétation et d'enrichir nos informations dans le plan horizontal.

Dans les cas précédemment cités, nous avons pu à partir des cartes dérivées définir leur caractère (la réponse de ces modèles).

Le pouvoir de séparer latéralement entre les formations nous permet d'affiner nos interprétations, en nous avisons du passage latéral de formation en formation, grâce aux cartes dérivées, nous avons pu à partir d'une certaine limite séparer latéralement entre les formations.

Bibliographie

- Baker, H.A. and Myers. J.O., 1979. VLF-EM model studies and some simple quantitative applications to field results. *Geoexploration* **17**, 55 – 63.
- Baker, H.A. and Myers. J.O., 1980. A topographic correction for VLF-EM profiles based on model studies. *Geoexploration* **18**, 135-149.
- Barbosa, V.C.F., Silva, J.B.C., Medeiros, W.E., 1999. Making Euler deconvolution applicable to small ground magnetic surveys. *Geophysics* **43**, 55 – 68.
- Barbosa, V.C.F., Silva, J.B.C., Medeiros, W.E., 1999. Stability analysis and improvement of structural index estimation in Euler deconvolution. *Geophysics* **64**, 48 – 60.
- Beamish, D., 2000. Quantitative 2D VLF data interpretation. *J. Appl. Geophysics* **45**, 33 – 47.
- Coney, D.P., 1977. Model studies of the VLF-EM method of geophysical prospecting. *Geoexploration* **15**, 19 – 35.
- Djeddi, M. , Baker, H.A. and Tabbagh, A., 1998. Interpretation of VLF-EM anomalies of 3D structures by using linear filtering techniques. *Annali di Geofisica* **41**, 151 – 163.
- Djeddi, M., 1998. Nouvelles méthodes d'interprétation 3D des données électromagnétiques, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.

- Gharbi, M. and pedersen, L. B., 1999. Transformation of VLF data into apparent resistivities and phases. *Geophysics* **64**, 1393 – 1402.
- Grant, F.S. and West, G.F., 1965. Interpretation theory in applied geophysics. McGraw-Hill, New York.
- Guerin, R., Tabbagh, A., Andrieux, P., 1994. Field and/or resistivity mapping in VLF-MT and implications for data processing. *Geophysics* **59**, 1695 – 1712.
- Kaikkonen, P., 1979. Numerical VLF modelling. *Geophysical prospecting* **27**, 815 – 834.
- Keating, P. and Pilkington, M., 2000. Euler deconvolution of the analytic signal. Geophysical survey of Canada, 193 - 195
- Nabighian, M.N., 1991. Electromagnetic methods in applied geophysics. Applications part A and B.
- Nabighian, M.N., March, 2001. Unification of Euler and Werner deconvolution in three dimensions via the generalized Hilbert transformation. *Document Internet*.
- Olsson, O., 1980. VLF anomalies from a perfectly conducting half plane below an overburden. *Geophysical prospecting* **28**, 415 – 434.
- Olsson, O., 1981. Reply to comments on “ Numerical VLF modelling” and “VLF anomalies from a perfectly conducting half plane below an overburden”. *Geophysical prospecting* **29**, 303 – 307.

- Peltoniemi, M., 1981. Comments on “ Numerical VLF modelling” and “VLF anomalies from a perfectly conducting half plane below an overburden”. *Geophysical prospecting* **29**, 298 – 302.
- Poddar, M., 1982. Very low-frequency electromagnetic response of a perfectly conducting half-plane in a layered half space. *Geophysics* **47**, 1059 – 1067.
- Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millet, A. J., and Somerton, I. W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution, *Geophysics* **55**, 80 - 91
- Roy, L., Agarwal, B.N.P. and Shaw, R.K., 2000. A new concept in Euler deconvolution of isolated gravity anomalies. *Geophysical prospecting* **48**, 559 – 575.
- Seguin, M.K., 1971. La géophysique et les propriétés physiques des roches.
- Tabbagh, A., Benderitter, Y., Andrieux, P., Decriaud, J.P., Guerin, R., 1991. VLF resistivity mapping and verticalization of the electric field. *Geophysical prospecting* **39**, 1083 – 1097.
- Telford, M.N., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. 1998. Applied geophysics (second edition). Cambridge University Press.
- Thompson, D.T., 1982. Euldph : A new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics* **47**, 31 – 37.