

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



**FACULTE DES HYDROCARBURES ET DE LA
CHIMIE**

**DEPARTEMENT GEOPHYSIQUE, GENIE
PARASISMIQUE
ET PHENOMENES ALEATOIRES**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER
EN GEOPHYSIQUE PETROLIERE**

FILIERE : Sciences de la Terre et de l'Univers

OPTION : Géophysique pétrolière

Thème :

**Calcul des corrections statiques par la méthode de
tomographie des temps des premières arrivées sur une étude
sismique 3D :**

Le bassin de El Ouabed

Réalisé par :

✍ **BENDILMI MOUSAAB**

✍ **BOUBRYEM ANIS**

Suivi par :

Promoteur : Mme. AIT ADJEDJOU

Encadreur : Mr. BELAID

DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

PRESIDENT : Mr. Djeddi

EXAMINATEUR : Mr. Aitouche

EXAMINATEUR : Mr. Allek

Boumerdes : 2021/2022

REMERCIEMENTS

En préambule de ce mémoire, nous souhaitons adresser ici tous mes remerciements aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont ainsi contribué à l'élaboration de ce mémoire.

En premier lieu, nous tenons à remercier notre créateur, ALLAH pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Nous souhaitons remercier notre promoteur Mme AITADJEDJOU Doria pour son implication et sa disponibilité.

Nous souhaitons particulièrement remercier M. BELAID Tabet, ingénieur géophysicien à l'ENAGEO, merci d'avoir partagé avec nous ta passion, la géophysique, de nous avoir inspiré et d'avoir cru en nous. Merci d'avoir sacrifié de ton temps et de nous avoir orientés et conseillés pour le bon déroulement de notre projet.

Nous tenons à remercier en particulier Mr : M.Abdelli le chef Département du traitement des données sismiques .

Nous tenons également à remercier l'ensemble des professeurs du département de géophysique qui nous ont permis d'avoir une formation de qualité durant les cinq années passées au sein de la Faculté.

DEDICACES

A la mémoire de mon défunt grand père BOUBRYEM Elhachemi, et à celle de ma défunte grand-mère BENDAL Fatima.

A ma chère mère, ma source de bonheur, de réussite et de bien-être, celle qui a fait de moi l'homme que je suis devenu, rien au monde ne vaudra jamais tout l'amour que tu m'as donné.

A mon cher père qui m'a appris que la persévérance et le dur labeur payent, et que peu importe les épreuves la joie de vivre ne doit jamais manquer à l'appel.

A mon cher frère BAHA EDDINE et ma sœur RITADJ.

A tous les membres de ma famille que j'aime.

A mes camarades du groupe MAGP17 pour leur gentillesse et pour leur amitié.

A tous les membres du SEG Student Chapter, chacun d'entre vous a eu un impact considérable sur moi.

A INES qui m'a apporté un soutien sans faille, et un apport de taille, celle qui a toujours cru en moi, et dont la présence me rend tout en émoi.

A tous mes amis, à qui je souhaite beaucoup de réussite dans leurs vies et projets.

En particulier Mouloud, et surtout à mon binôme MOUSAAB

BOUBRYEM Anis

DEDICACE

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à la mémoire de ma défunte grand mère Beniyezar Messouda , et à celle de ma défunte grand-mère Sahnoun Ratiba et celle de mon défunt grand père Namous Messoud , que la miséricorde de Dieu soit sur eux .

A ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux : mon adorable mère NAMOUS Sabah.

A l'homme, mon précieux cadeau de Dieu, à qui je dois ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père BENDILMI Younes.

A mon chère grand père BENDILMI Salah que dieu le protège pour nous.

A mes chères frères Seif El Islem et Abdelazize qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes

études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

A mon chère petit frère Houd .

A tous les membres de ma famille que j'aime.

A la fille qui m'a entouré d'amour, d'affection et qui fait tout pour ma réussite, que dieu la garde.

A mes camarades du groupe MAGP17 pour leur gentillesse et pour leur précieuse amitié.

A tous les membres du SEG Student Chapter , ma deuxième famille .

A tous mes amis et mes proches qui m'ont toujours encouragé et me donnent de l'amour et de la vivacité., et à qui je souhaite plus de succès dans leurs vie .

Sans oublier mon proche qui est mon binôme BOUBRYEM Anis pour son soutien moral , sa précieuse amitié , sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet .

BENDILMI Mousaab

Table des matières

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre 01 Généralités sur les corrections statiques

I.1 Introduction :.....	2
I.2 La zone altérée WZ :.....	2
I.3 Généralités sur les corrections statiques :	5
I.4 Correction WZ :.....	8
I.5 Les différentes méthodes de calcul des corrections statiques :	11

Chapitre 02 Généralité et théorie de la tomographie sismique

II.1. introduction.....	17
II.2. Définition de la tomographie.....	17
II.3. Comparaison des différentes méthodes d'inversion tomographique :.....	18
II.4. Différents types de tomographie	18
II.4.1. Tomographie sismique	18
II.4.1.a. Différents types de tomographie sismique.....	19
II.4.1.b. Limite et difficultés :	20
II.4.2. Les étapes de la tomographie sismique :	21
II.5. Les différentes méthodes de reconstruction tomographiques :.....	22
II.6 Algorithme d'inversion tomographique :.....	24

Chapitre 03 La tomographie des premières arrivées

III.1. La tomographie des temps de première arrivée	26
III.2. L'objectif de la tomographie des temps de première arrivée	26
III.3. Le problème direct.....	26
III.4. Le problème inverse	27
III.5. Méthode de Turing Ray Tomographie (TRT) :.....	29

Chapitre 04 Contexte géologique de la région d'étude

IV.1. Introduction générale à la géologie de l'Algérie	33
IV.2. Principaux gisements d'hydrocarbures de l'Algérie	35
IV.3. Historique de l'exploration géophysique	36
IV.4. La région d'étude	36

Chapitre 05 Application de la tomographie des temps des premières arrivées sur des données réelles

V.1 Introduction.....	40
V.2 Paramètres d'acquisition.....	41

V.3 dispositif d'acquisition de la zone d'étude	42
V.4 Schéma descriptif des paramètres d'acquisition :	42
V.5 Présentation de logiciel GEOSTAR	43
V.6 Application des corrections statiques :	45
V.7 Etapes d'applications de la méthode tomographique sur les données réelles :.....	46
V.8 Comparaisons des sections obtenues par l'application de la méthode GLI et la tomographie.....	68
Conclusion.....	70
Bibliographie.....	72

Liste des figures

Figure I.1 Principe du carottage de WZ	4
Figure I.2 dromochronique des ondes sismiques.	5
Figure I.3 DP horizontal.....	6
Figure I.4 DP incliné.....	6
Figure I.5 DP en escalier	7
Figure I.6 Schéma de principe de calcul des corrections statique	7
Figure I.7 Les signes de la correction altimétrie	9
Figure I.8 Schéma représente le concept des corrections statiques résiduelle	10
Figure I.9 Section sismique avant correction statiques résiduelles (a) et après correction statiques résiduelles (b)	11
Figure I.10 Courbe temps-profondeurs $T_v = F(p)$	12
Figure I.11 Exemple d'un enregistrement la réel d'un CVT.....	13
Figure I.12 up hole analyse de lithologie correspondant	13
Figure I.13 Dromochronique des ondes sismique	14
Figure I.14 Erreur entre le modèle observé et le modèle calculé	15
Figure I.15 Algorithme général de la modélisation itérative (GLI)	16
Figure III.1 Les problèmes direct et inverse en tomographie des temps de première arrivée relient un modèle de vitesse aux temps de première arrivée pointés (en ligne rouge) sur un sismogramme.	26
Figure III.2 Schéma illustrant la discrétisation en grille cartésienne d'un modèle de lenteur S_j et la trajectoire d'un rai entre une source et un récepteur.	27
Figure III.3 Trajets de rayon en turning ray tomographie	29
Figure III.4 Exemple de pointé des premières arrivées sur des shots	30
Figure III.5 Courbe des temps de premières arrivées prédits et réelles	31
Figure III.7 Organigramme de la méthode TRT	32
Figure IV.1 Carte des bassins sédimentaire d'Algérie	33
Figure IV.2 carte des gisements pétroliers	34
Figure IV.3 Carte des gisements pétroliers en Algérie	35
Figure IV.4 Carte de situation géographique du périmètre EL OUABED	37

Figure IV.5 Carte de situation géographique du périmètre EL OUABED el bayedh	38
Figure IV.6 colonne litho- stratigraphique type du périmètre EL OUABED	39
Figure V.1 dispositif d'acquisition	42
Figure V.2 Schéma descriptif des paramètres d'acquisition	42
Figure V.3 Distribution de la couverture de l'étude	43
Figure V.4 Lancement de l'application Geostar	43
Figure V.5 La fenêtre principale de Geostar	44
Figure V.6 Schéma Synthétique des étapes de l'application sur Geostar pour le calcul des corrections statiques	45
Figure V.7 Carte d'élévation	46
Figure V.8 Distribution des CVT's	47
Figure V.9 Carte de vitesse de la WZ en CVT.....	47
Figure V.10 Carte de vitesse de la WZ en GLI (offset 600 – 1600)	48
Figure V.11 Carte de vitesse du milieu rapide en CVT	48
Figure V.12 Carte de vitesse du milieu rapide en GLI (offset 600-1600)	49
Figure V.13 Carte d'épaisseur en CVT	49
Figure V.14 Carte d'épaisseur en GLI (offset 600 – 1600)	50
Figure V.15 Enregistrement montrant le pointé de premières arrivées réalisées sur l'application FB Pick	50
Figure V.16 Enregistrement montrant le pointé de premières arrivées réalisées sur l'application FB Pick	51
Figure V.17 Schéma des points de contrôles.....	51
Figure V.18 modèle initial de vitesses nord / est	52
Figure V.19 modèle initial de vitesses nord / ouest	52
Figure V.20 modèle en cellule tomographie	53
Figure V.21 Premier Modèle de vitesse Après l'application de la Tomographie	54
Figure V.22 Deuxième Modèle de vitesse Après l'application du Tomographie	54
Figure V.23 Courbe de variation de l'erreur moyenne	54
Figure V.24 Nombre de Pick valide	55
Figure V.25 modèle de densité des rayons	55
Figure V.26 carte de densité des rayons	55

Figure V.27 carte des statique d'élévation.....	56
Figure V.28 carte des statiques à base des CVT's	57
Figure V.29 carte des statiques a base du model GLI	57
Figure V.30 carte des statiques à base du model TOMO (offset 600-1600)	58
Figure V.31 Visualisation du data (INL, CRL)	58
Figure V.32 modèle 01 : nord ouest – sud est.....	59
Figure V.33 modèle 02 : nord est – sud ouest	59
Figure V.34 IL4384 sans statique	59
Figure V.35 IL4384 avec correction statique	60
Figure V.36 IL4384 avec CVT interpolé	60
Figure V.37 IL4384 avec GLI	61
Figure V.38 IL4384 avec statique TOMO	61
Figure V.39 XL5000 sans statique	62
Figure V.40 XL5000 avec statiques élévation	63
Figure V.41 XL5000 avec statiques CVT	64
Figure V.42 XL5000 avec statiques GLI	65
Figure V.44 XL5000 avec statiques TOMO	66
Figure V.45 LES résultat avant et après corrections statique CVT , GLI, Tomo du modèle "IL4384"	67
Figure V.46 LES résultat avant et après corrections statique CVT , GLI, Tomo du modèle "XL5000"	68
Figure V.47 Comparaison entre la section sismique après corrections statique GLI et Tomographie du modèle "IL4384"	69
Figure V.48 Comparaison entre la section sismique après corrections statique GLI et Tomographie du modèle "XL5000"	69

Introduction générale

La géophysique est une branche des sciences de la Terre qui étudie la structure interne de la Terre ainsi que tous les phénomènes sismiques, électriques, thermiques et magnétiques qui se produisent sur Terre et à son voisinage. Il y'a plusieurs méthodes dans le domaine de l'exploration géophysique : sismique, électrique, électromagnétique, magnétotellurique, gravimétrie, radiométrie, etc... Elles se définissent par des paramètres physique (vitesse, densité, porosité, perméabilités, résistivité, susceptibilité...etc.) dont on mesure l'effet en surface ou dans un forage.

Ces méthodes sont utilisées selon l'objectif de l'étude et les différents paramètres géologiques et physiques de la zone ou la région d'étude.

La méthode sismique représente environ de 90% des méthodes géophysiques dans le domaine de la prospection pétrolière. L'acquisition des données sismiques, leur traitement et leur interprétation sont les trois étapes principales.

Pour obtenir un bon résultat en interprétation des données sismiques, il est nécessaire de faire un bon traitement afin d'obtenir des sections sismiques de bonne qualité. Pour cela il faut tenir compte des différences d'altimétries et les variations latérales et verticales de vitesse dans les couches superficielles. Ces événements influent sur les enregistrements en sismique sous forme des retards sur les temps d'arrivées. Les corrections statiques prédéterminent la qualité de la section sismique finale et donc ont une grande importance pour la bonne qualité du traitement.

Actuellement, le calcul des corrections statiques se fait en exploitant les données des premières arrivées sur l'enregistrement sismique. Il existe plusieurs méthodes : la méthode directe (carottage sismique), les méthodes classiques (méthode d'intercepte IK, ABC, GARDNER, ...) et les méthodes itératives (GLI, GRM, Tomographie sismique).

La bonne estimation des paramètres de la zone altérée qui sont les causes des anomalies statiques peuvent nous donner de meilleures corrections statiques.

Dans notre mémoire, nous avons utilisé la tomographie sismique sur des données de profils sismiques réflexion de la région d'El Ouabed (Algérie). Ces données nous ont été transmises par l'Entreprise Nationale de Géophysique « ENAGEO » où nous avons effectué notre stage de fin d'étude. Nous avons réalisé notre travail au centre de traitement sismique de l'ENAGEO Boumerdes. L'objectif de ce mémoire est d'utiliser la méthode de tomographie sismique pour l'application des corrections statiques. Nous avons donc, exploité les données de 02 profils sismiques et pour un meilleur aperçu de l'intérêt de la méthode, nous avons aussi utilisé la méthode GLI et comparé ses résultats avec ceux de l'inversion sismique.

Ce travail est organisé en cinq chapitres : le premier présente le principe et les différentes méthodes de calcul des corrections statiques. Au deuxième chapitre, nous exposons la théorie de la tomographie. Le troisième chapitre, est consacré à tout ce qui concerne la tomographie des premières arrivées. Le quatrième présente le contexte géologique sur la région d'étude. Le dernier chapitre est entièrement réservé à l'application des corrections statiques par la méthode de tomographie sismique.

Chapitre 01

Généralités sur les corrections statiques

I.1 Introduction :

Les différentes actions climatiques (érosion éolienne, érosion due à la circulation d'eau, etc.) aboutissent à l'altération des couches superficielles (zone altérée). L'intensification du degré d'altération conduit à l'augmentation de la porosité et à une faible compaction du sol, ce qui engendre une diminution des vitesses de propagation des ondes et par conséquent un retard des arrivées réfléchies et un effet sélectif sur les fréquences.

En sismique terrestre, les traces sont corrigées de l'effet de ce retard causé par les positions des émetteurs et des récepteurs (effet de l'altimétrie), ainsi que par la nature des terrains situés à leurs aplombs (effet de la couche altérée). La détermination des paramètres de la zone altérée et l'application de la translation des événements en temps sont réalisées dans une phase importante du traitement sismique appelée « corrections statiques ». Les corrections sont des statiques car elles sont constantes en fonction du temps pour chaque trace, elles compensent à la fois les effets de zone altérée et de topographie.

I.2 La zone altérée WZ :

I.2.1 Définition :

La zone des couches superficielles du sol est caractérisée par une grande variation des vitesses des ondes sismiques. Elle est connue sous le nom de (zone altérée) ou WZ (Weathered Zone). Son épaisseur est très variable - plusieurs dizaines de mètres dans le cas des dunes et moins d'un mètre lorsque des terrains durs affleurent à la surface du sol - Le signal sismique qu'on recueille lors d'une campagne sismique traverse deux fois cette zone, il est alors très perturbé.

I.2.2 Caractéristiques de la zone altérée (wz) :

Elle est caractérisée par (Frensay):

- de faibles vitesses de propagation des ondes sismiques : $400 < v < 1600 \text{ m / s}$
- un grand coefficient d'amortissement (l'amplitude d'une onde qui se propage dans La zone altérée (wz) décroît rapidement).
- la présence d'ondes élastiques parasites dues ou non à l'explosion. Celles dues à l'explosion (ground - roll) se propagent à la surface du sol ou à faible profondeur. Leurs fréquences sont généralement basses (5-20 Hz) et les filtres permettent de les éliminer en grande partie. Ces ondes parasites du ground – roll sont relativement plus importantes que les autres quand le tir a lieu à l'intérieur de la zone altérée.
- la wz joue le rôle de filtres cela par l'absorption des hautes fréquences.

I.2.3 Etude de la zone altérée :

L'étude de la WZ consiste essentiellement en l'estimation des épaisseurs des couches qui la composent (donc la profondeur de la WZ), ainsi que les vitesses de propagation des ondes dans celles - ci.

Deux techniques sont alors utilisées :

- Techniques directes : le carottage sismique (carottage VT) de la WZ.
- Techniques indirectes : Travaux de petite réfraction (TPR).

I.2.4 Carottage sismique :

Le carottage sismique est habituellement réalisé dans un forage de faible profondeur (échelle hectométrique ou décamétrique). Il est utilisé pour déterminer les paramètres de la zone altérée (Weathering Zone ou WZ, on parle aussi de carottage WZ), notamment son épaisseur et sa vitesse qui sont des paramètres indispensables pour réaliser les corrections statiques. Souvent son acquisition est plutôt suivant la configuration uphole (source en forage, de type dynamite) que downhole (source en surface). (Jean-Luc Mari, Christophe Vergnault (2018))

Le carottage VT est une méthode directe de détermination des vitesses et l'épaisseur de couches constituant de la WZ . Il permet en effet de déterminer par un simple calcul les temps verticaux dans les différentes couches et par simple lecture les vitesses et les épaisseurs. (Bernard Giroux 2019)

principe :

On fore un trou à une profondeur donnée (quelque dizaines de mètres) . On enregistre les premières arrivées et dans le bureau de computage on pointe ces temps sur un graphe $F(p) = t$.

Ensuite, nous interprétons ce graphe pour déterminer les vitesses et les épaisseurs de la WZ.

a) Mise en œuvre :

Après avoir foré le trou, on fait suspendre un câble contenant plusieurs sismogrammes espacés de 5 mètres (Figure (I.1)). Ce câble est lié à un petit laboratoire d'enregistrement, qui permet d'enregistrer les temps de parcours aux différents sismogrammes, d'un signal provoqué par des tirs manuels en utilisant un marteau sur une plaque métallique effectués près de la gueule du trou (3 mètres).

- pour avoir un enregistrement chaque 2,5 mètres on fait tirer le câble vers le haut à distance de 2,5 mètres.

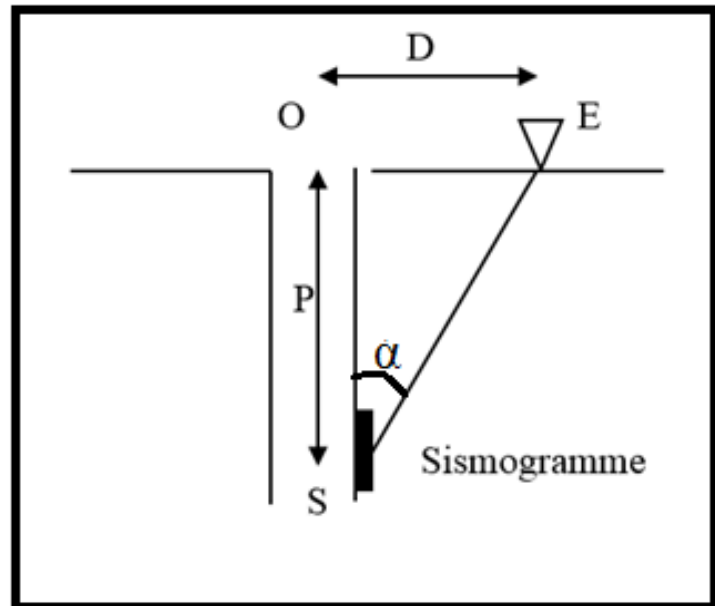


Figure I.1 Principe du carottage de sismique

b) Exploitation des résultats :

On choisit les meilleures arrivées sur les films réceptionnés et on effectue des opérations suivantes (Figure (I - 1)) :

- pointage des arrivées premières.
- chronométrage des temps bruts.
- calcul du temps vertical par la formule suivante :

$$T_v = \frac{T_{ob}.p}{(p^2 + D^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (I.1)$$

Où :

T_v : le temps vertical recherché (ms).

T_{ob} : le temps oblique mesuré ou temps réel du parcours SE (ms).

P : la profondeur du sismogramme (m)

D : la distance entre l'émetteur et le centre du trou (m)

Le temps vertical t_v peut être écrit en fonction de P et D .

Construction des dromochroniques $T_v = f(p)$

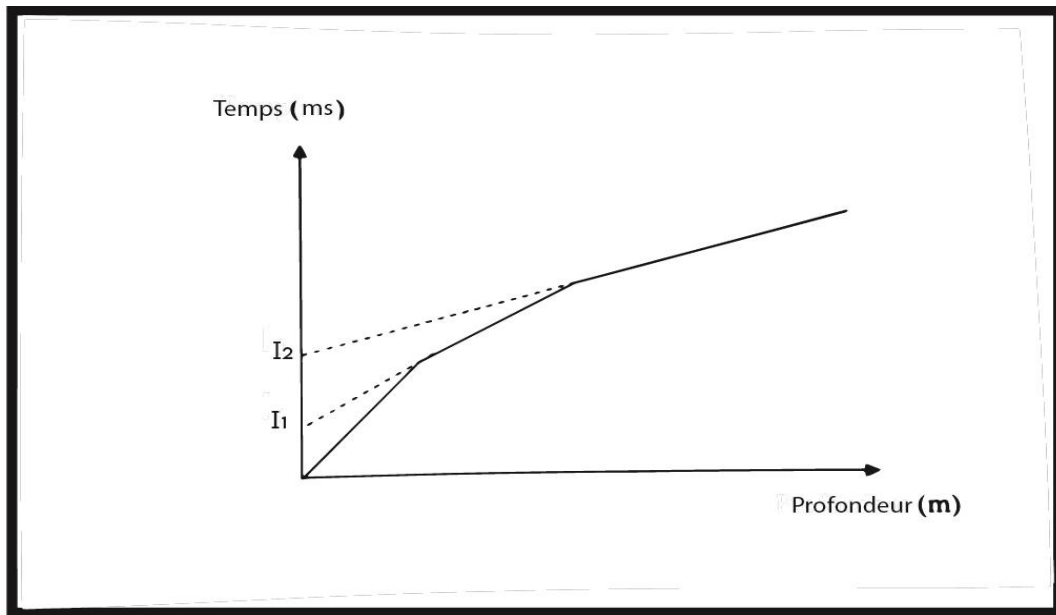


Figure I.2 dromochronique des ondes sismiques.

- A partir de cette dromochronique (Figure (I.2)) on peut déterminer les vitesses et les épaisseurs de la (WZ).

- Pour déterminer le modèle de la (WZ) sur tout le profile en reliant entre les différentes limites des couches pour tous les trous, tout en suivant la forme du relief. La base de la WZ est généralement horizontale. Les limites des couches sont déterminées par les différents points de brisures.

I.3 Généralités sur les corrections statiques :

I.3.1 Définition des corrections statiques :

C'est un temps algébrique qui est ajouté au temps total enregistré, sa grandeur et son signe dépend de la position du plan de référence. On distingue deux types de corrections :

- Variations de la topographie.
- Variations d'épaisseurs et des vitesses (WZ). (Yilmaz, O. 2001)

I.3.2 But des corrections statiques :

Le but des CS est d'éliminer les effets de l'altimétrie et de la zone altérée. Il s'agit donc de ramener les enregistrements à même plan de référence (Datum Plane) DP.

Pour appliquer les corrections statiques sur un enregistrement sismique donné on doit connaître les paramètres suivants :

- L'altimétrie des points d'émission et de réception.

L'épaisseur et la vitesse de propagation des ondes sismiques dans la WZ (CVT, tir petite réfraction (TPR).....).

- Un plan de référence choisi DP.
- Vitesse de comblement ou vitesse des ondes sismique sous la base de la wz (proche de la vitesse du milieu consolidé).

I.3.3 Choix du DP :

Le plan de référence (Datum Plane ou DP) est un plan fictif qui suivant les cas qui se présentent peut-être choisi sous ou dans la zone altérée. Habituellement, il est choisi en dessous de la base de la WZ, le plus proche possible du mur de celle-ci afin de diminuer le chemin de parcours de l'onde sismique entre le mur et le DP. Il existe plusieurs cas possibles de DP : Datum plane horizontal, en escalier, incliné ou flottant.

a) Le DP horizontal :

Il est choisi lorsque l'altimétrie ou bien la topographie est calme (pas de changement rapide de l'altimétrie du terrain) figure (I-3).

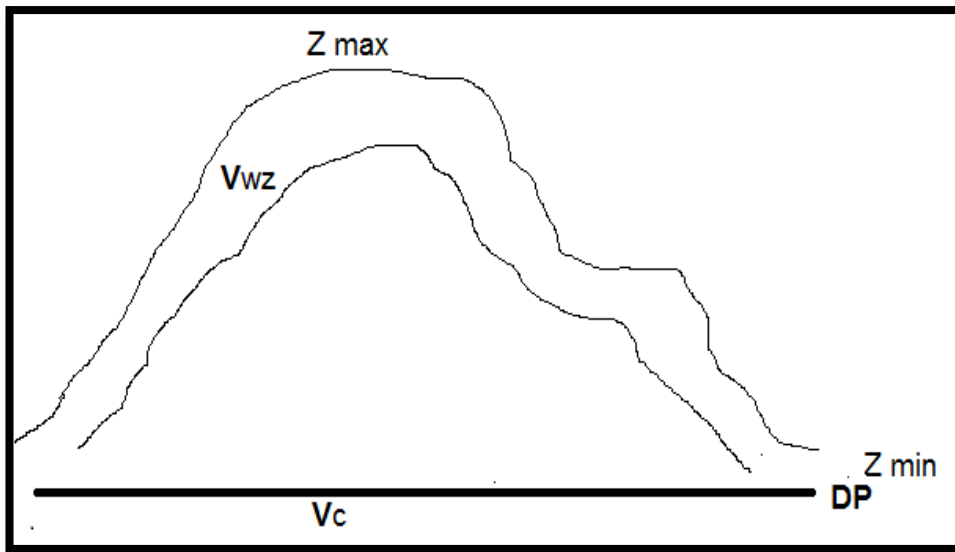


Figure I.3 DP horizontal

b) DP incliné:

Ce type de DP est choisi dans le cas où le profil altimétrique des profils sismiques est incliné à l'échelle régionale. On choisit un DP dirigé selon le pendage moyen (figure (I-4)).

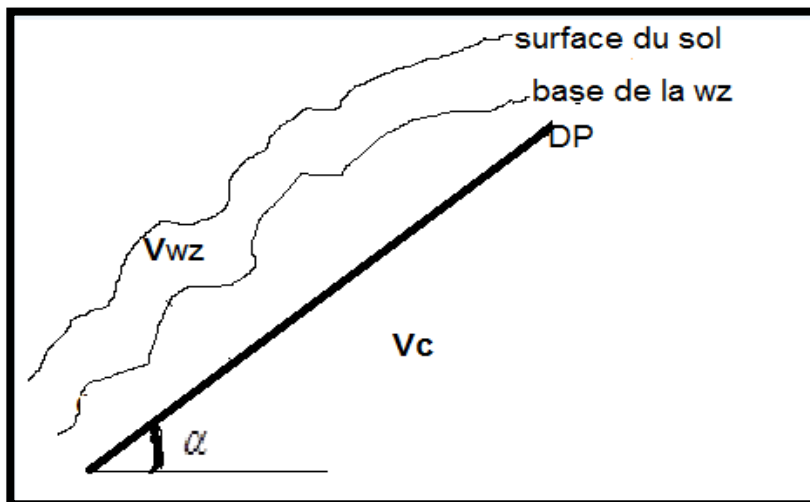


Figure I.4 DP incliné

c) DP en escalier :

Il est choisi en cas de présence des variations importantes et brutales de la topographie des profils sismiques. Il est alors considéré des côtes successives variant graduellement. Mais, il est indispensable lors de la synthèse de la région de ramener tous les temps à un seul DP (DP régional) figure (I-5).

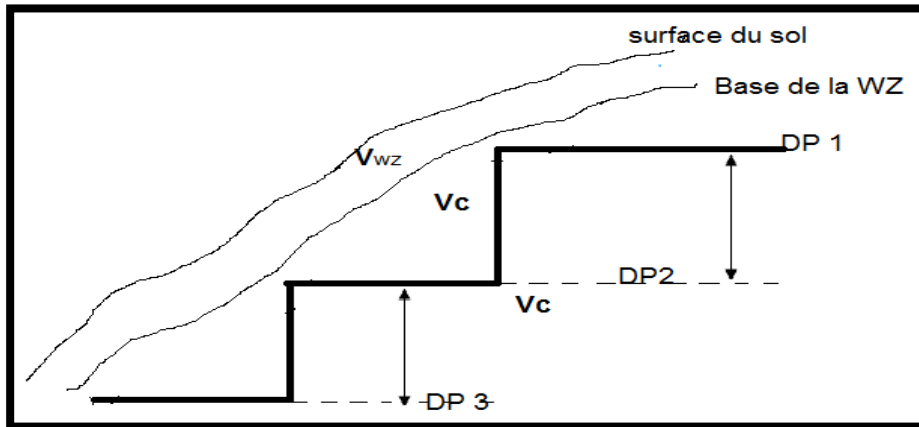


Figure I.5 DP en escalier

I.3.4 Principe des corrections statiques :

Le temps de parcours mesuré entre l'instant d'émission et l'arrivée de la réflexion correspondante, à une trace déterminée, représente le trajet réel SMR parcouru par l'onde sismique entre le point de tir S et le géophone placé en R (figure (I-6)). Ce trajet dépend des facteurs d'altitude des points S et R, de l'épaisseur de la wz au-dessous de S' et R' et des vitesses des terrains situés au-dessous de la wz. Il dépend également de l'obliquité du trajet sismique entre l'émetteur et le récepteur. Une correction statique sera appliquée pour éliminer les effets d'altimétrie et de la wz ; avec correction d'obliquité.

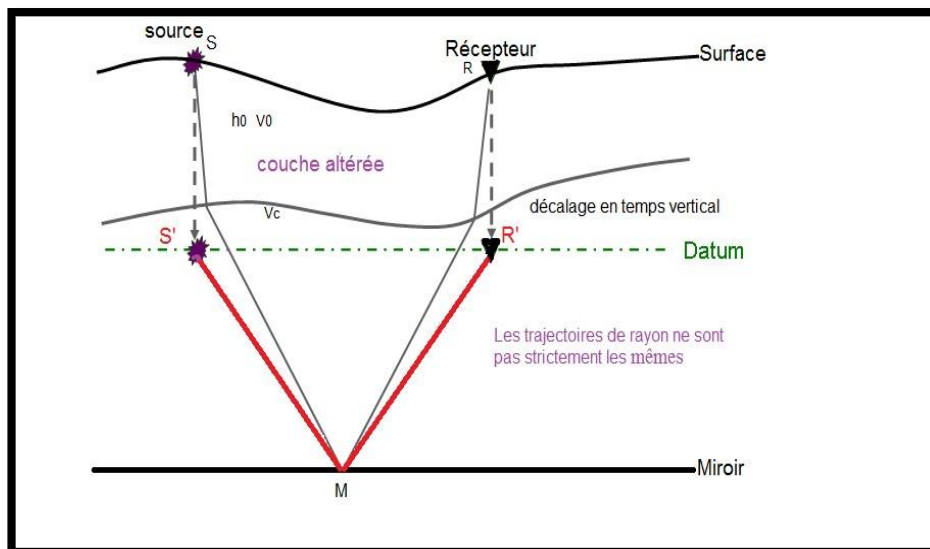


Figure I.6 Schéma de principe de calcul des corrections statique

SS'MR'R : trajet réel (m).

S'MR' : trajet de tir d'altitude (m).

Z_{eH_0} : épaisseur de la wz (m).

V_0 : vitesse de wz (m/s).

M : point miroir.

V_c : vitesse de comblement (m/s).

DP : Datum plane d'altitude Z_{DP} .

I.3.5 Principe de calcul des corrections statiques :

Les corrections apportées à chaque trace sont composées de deux temps de parcours :

Une correction de la durée de parcours du trajet descendant SS' (figure (I-6)), connus le nom de correction à l'émetteur ou du point de tir.

Une correction de la durée de parcours du trajet montant RR', représentant la correction au récepteur R.

Chacun de ces termes renferme deux autres corrections : l'une représente la correction de la wz et l'autre représente la correction au plan de référence (C_{DP}).

La détermination des corrections statiques nécessite la connaissance exacte des :

- Altitudes des points de tir Z_e et de réception Z_r .
- De l'altitude du DP : Z_{DP} .
- De l'épaisseur des différentes couches de la wz (h_i) (m).
- Des vitesses moyennes de ces couches V_i ou de la loi de vitesse $V(z)$ (m/s).
- De la vitesse du terrain consolidé. Situé sous la base de la wz, dite vitesse de comblement (V_c) (m/s), elle est prise constante pour toute l'étude ou une partie d'étude.

D'après la figure (I-6), on remarque que pour un seul rayon (rayon descendant ou ascendant) on a deux corrections à faire :

I.4 Correction WZ :

Pour une WZ à 'n' couches :

$$C_{wz} = - \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{V_i} \right) h \quad (I.2)$$

Correction D_p :

$$C_{DP} = \pm \frac{h_{DP}}{V_c} \quad (I.3)$$

h_{DP} : est l'épaisseur entre le DP et la source. Le signe ($\pm$) représente la position du DP par rapport à la base de la WZ (figure (I-7)) : (+) le DP est au-dessus de la base WZ, (-) le DP est de dessous de la base de la WZ. (Bernard Giroux 2019)

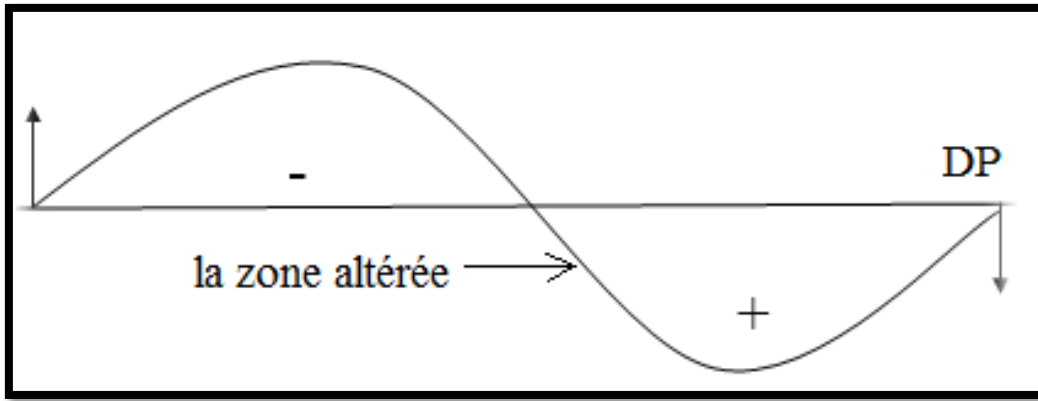


Figure I.7 Les signes de la correction altimétrie

I.4.1 Corrections aux récepteurs :

De la même façon que pour le calcul des statiques à la source ; on a pour le récepteur :

$$C_R = C_{AL} + C_{WZ} \quad (I.4)$$

D'où :

$$C_R = \frac{Z_R - Z_{DP}}{V_c} + d_{WZ} \left(\frac{1}{V_{WZ}} - \frac{1}{V_c} \right) \quad (I.5)$$

Tel que :

- $C_{AL} = \frac{Z_R - Z_{DP}}{V_c}$: correction altimétrie C_{AL} au récepteur.
- $C_{WZ} = d_{WZ} \left(\frac{1}{V_{WZ}} - \frac{1}{V_c} \right)$: correction apportée la WZ (C_{WZ})

I.4.2 Corrections aux sources :

Suivant la position du Dp on effectue le calcul des temps corrigés en retranchant la durée du trajet SS' du temps total brut.

On a:

$$C_S = C_{AL} + C_{WZ} \quad (I.6)$$

Tels que :

- $C_{AL} = \frac{Z_S - Z_{DP}}{V_c}$: correction altimétrie à l'émetteur.
- $C_{WZ} = D_{WZ} \left(\frac{1}{V_{WZ}} - \frac{1}{V_c} \right)$: correction apportée à la WZ (C_{WZ})

-si la WZ est composée de plusieurs couches d'épaisseurs d_i et de vitesse moyenne v_i on fait la somme de CWZ .

I.4.3 Corrections statiques totales (CST) :

La correction statique totale est égale à la somme de la correction statique au point de tir ajouté à la correction statique au point de réception :

$$C_{ST} = C_S + C_R \quad (I.7)$$

Soit :

$$C_{ST} = C_{S(ALT)} + C_{S(WZ)} + C_{R(ALT)} + C_{R(WZ)} \quad (I.8)$$

I.4.4 Conséquences des mauvaises corrections statiques :

Une mauvaise correction statique implique une déformation du signal dans la trace somme ainsi qu'une mauvaise mise en phase et une altération de la continuité des horizons sismiques ce qui va se répercuter sur les analyses de vitesses.

Chaque trace sismique est affectée d'une erreur correspondant à un décalage en temps, ce décalage est corrigé par les corrections statiques résiduelles.

Si les corrections statiques sont mal déterminées les traces correspondantes au même pointmiroir ne seront pas en phases et leurs sommes sont de mauvaises qualités.

De même les mauvaises corrections statiques peuvent générer des distorsions importantes sur la section sismique. Ces distorsions peuvent être de grande longueur d'onde (Basse Fréquence) égale ou supérieure à la longueur du dispositif modifiant ainsi la géométrie de la subsurface, ou de courte longueur d'onde (Haute fréquence) détériorant le signal somme, la continuité des réflexions et leur caractère.

Les conséquences de mauvaises corrections statiques sont résumées par les points suivants :

La déformation du signal dans la trace somme, d'où une mauvaise continuité des horizons sismiques.

- Une image erronée de la subsurface et apparition de fausses anomalies structurales.
- Des analyses des vitesses inopérantes.

I.4.5 Les corrections statiques résiduelles :

Parfois, après l'application des corrections dynamiques (NMO) et statiques, les réflexions sur les traces CMP ou CDP ne sont pas toujours exactement alignées dans le temps. Cela est généralement dû à de petites erreurs dans les corrections statiques primaires appelées statiques résiduelles. Les statiques résiduelles sont caractérisées par des différences temporelles de trace à trace qui sont de nature aléatoire. Dans la figure (I-8), même si des corrections NMO ont été appliquées, les réflexions ne sont pas alignées sur les traces du CDP.

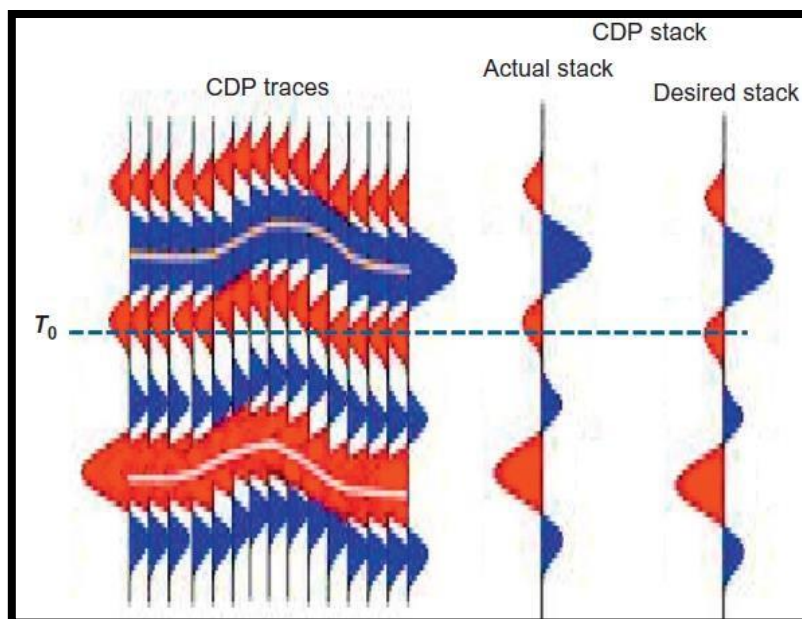


Figure I.8 Schéma représente le concept des corrections statiques résiduelle

Les corrections statiques résiduelles, réalisées au niveau du centre de traitement ont pour but de compenser les erreurs ou l'imprécision des corrections statiques primaires. Ces corrections consistent à améliorer l'addition à l'intérieur des points miroirs par la mise en phase des signaux avant addition et cela sans modifier la position des horizons.

L'application des corrections statiques résiduelles a pour but :

- D'optimiser l'addition dans les traces somme.
- D'améliorer la mise en phase des signaux.
- D'améliorer l'Analyse de vitesses.

Ainsi les corrections statiques résiduelles sont vues comme soin apporté au calcul des corrections statiques afin d'améliorer la qualité de la section sismique (figure (I-9))

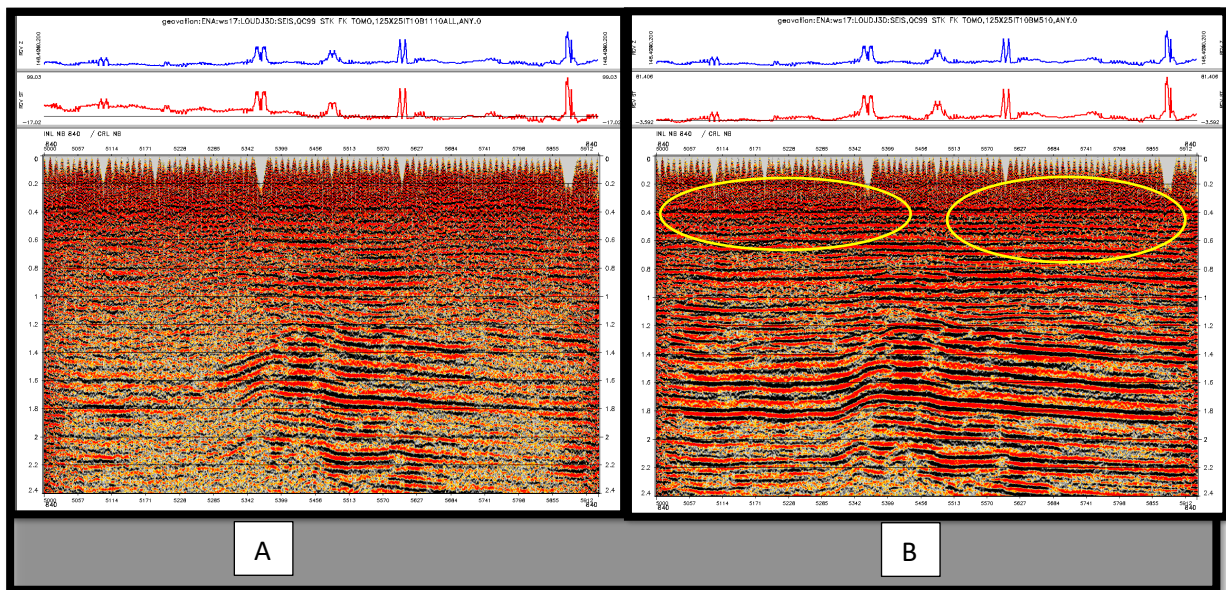


Figure I.9 Section sismique avant correction statiques résiduelles (a) et après correction statiques résiduelles (b)

I.5 Les différentes méthodes de calcul des corrections statiques :

Les corrections statiques (CS) consistent à corriger les effets de la wz. Pour calculer les corrections statiques, on a besoin de connaître les paramètres de la wz (épaisseur et vitesse)

On peut distinguer plusieurs méthodes (directes, indirectes) :

- Méthodes directes : donnant directement les valeurs des vitesses verticales et des épaisseurs des couches de la WZ.

Exemple : carottage VT.

- Méthodes indirectes : nécessitant une interprétation pour déduire les données, par l'étude des dromochronique et des indicatrices.

Exemple : -le cas des tirs petite réfraction (TPR),

- Méthode des interceptes.
- Méthode de Gardner.
- Méthode ABC.

- Méthodes itératives :
 - Méthode GLI
 - Méthode DRM

Dans ce travail, nous avons opté, selon les données disponibles, pour les méthodes GLI et tomographie sismique. Par conséquent, nous ne développons que ces méthodes-là.

(Mender , 2015)

I.5.1 Méthode directe :

On obtient directement les valeurs des vitesses verticales et des épaisseurs des couches de la WZ par le carottage VT.

I.5.2 Carottage sismique de la WZ (CVT) :

Le carottage sismique (CVT) de la zone altérée appelé couramment carottage WZ est une méthode directe qui utilise un forage d'une certaine profondeur qui dépasse généralement la base de la WZ.

En fait des tirs en surface et effectuer un enregistrement en profondeur du puits en remontant le géophone avec un espacement de 3 à 10m.

Les mesures de temps des trajets directs entre les différentes positions en profondeur des hydrophones sismique et les sources placés en surface permettent d'établir la relation temps –profondeur $T = f(P)$.

L'opérateur pointe les temps des arrivées premières (figure (I-10)), il mesure le chronométrage des temps bruts et enfin, il calcule le temps vertical T_v à l'aide de la formule (voir figure I-1) :

$$T_v = T_{op} \cos \alpha = \frac{T_{op} P}{(p^2 + D^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (I.9)$$

Où α est l'angle entre l'émetteur , sismogramme et la surface du carottage

Pour chaque tir sismique, l'opérateur pointe les temps d'arrivée de l'onde directe. Une fois les temps pointés sont convertis en temps verticaux T_v , il établit la courbe temps-profondeurs (temps vertical en fonction de la profondeur) $T_v = f(p)$ figure (I-11).

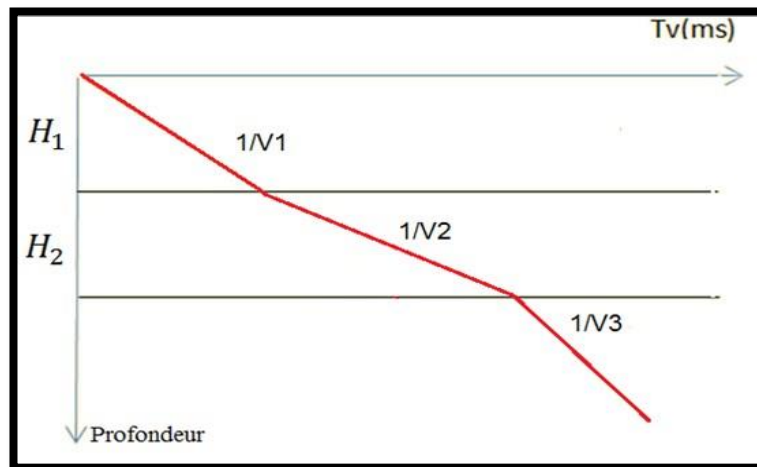


Figure I.10 Courbe temps-profondeurs $T_v = F(p)$

Lorsque la WZ possède une seule couche, la dromochronique sera représentée par deux branches des vitesses V_{WZ} et V_0 correspondant respectivement à la vitesse de la WZ et celle du premier milieu consolidé (substratum).

Lorsque la zone altérée est composée de plusieurs couches, on observe plusieurs points debrisure.

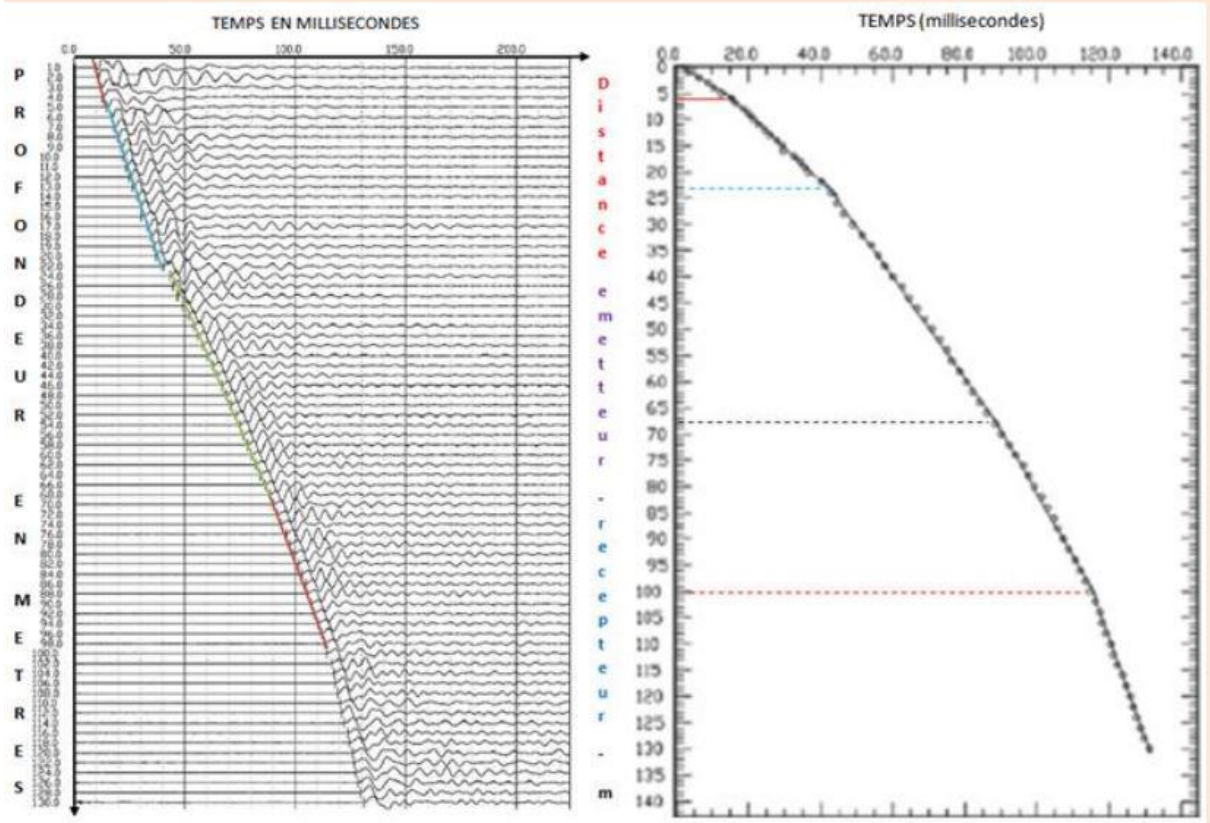


Figure I.11 Exemple d'un enregistrement réel d'un CVT

(Djeddi,2022)

Figure I.12 up Hole analyse de lithologie correspondant

(Djeddi ,2022)

I.5.3 Méthodes d'inversion ou (itératives) :

Dans le but d'éviter les limites des méthodes directes et indirectes, d'autres méthodes permettent de générer de manière itérative le modèle géologique de la zone altérée (calcul des épaisseurs et des vitesses) en modifiant séquentiellement à chaque itération l'épaisseur et la vitesse de chaque couche.

Parmi ces méthodes, celles qui sont très utilisées dans l'industrie sismique sont la méthode d'inversion linéaire généralisée (GLI), la méthode de réduction de la matrice résiduelle (DRM), la méthode KUPSTAT et la Méthode Réciproque Généralisée (GRM) Nous avons utilisé la méthode GLI. (Mender 2015)

a) Méthodes d'inversion linéaire généralisée (GLI):

La GLI est une technique mathématique qui a été appliquée pour la première fois par Hampson et Russelle en 1984 pour la résolution du problème des corrections statiques. Cette technique est caractérisée par sa flexibilité dans la définition de la zone altérée. L'approche directe consiste à réaliser des calculs en utilisant les arrivées observées qui donnent les

paramètres eux-mêmes par l'ajustement des lignes droites qui passent au mieux par les premières arrivées et à mesurer les pentes pour définir les vitesses qui une fois appliquées aux intercepts déterminent les épaisseurs.

La méthode GLI consiste à déterminer de manière itérative le modèle géologique de subsurface en modifiant dans chaque itération séquentiellement l'épaisseur et la vitesse de chaque couche. Comme la méthode GLI utilise la technique du tracé de rayon par une modélisation directe sur des modèles de grandes variations de la couverture. Le modèle géologique doit être lissé afin d'assurer la stabilité du processus d'inversion. Le programme GLI adopte un lissage de fenêtrée à la longueur du dispositif ainsi que les paramètres du modèle (vitesse, épaisseur).

- **Principe de la méthode GLI:**

La méthode itérative (GLI) consiste à construire itérativement un modèle de subsurface basé sur l'information obtenue par l'enregistrement des premières arrivées réfractées.

Le principe de base de la méthode est simple et peut être expliqué en se référant aux figures (I-13) et (I-14).

On suppose que le modèle d'origine (réel) est composé de deux couches à faible vitesse dominant une couche à grande vitesse. On génère un ensemble de réfractés enregistrés comme des arrivées observées. Sans connaître a priori les paramètres du modèle actuel, on peut deviner un modèle comme le montre la figure (I-4). Par la méthode de tracé de rayon on calcule les temps des premières arrivées réfractées théoriques correspondants à ce modèle initial.

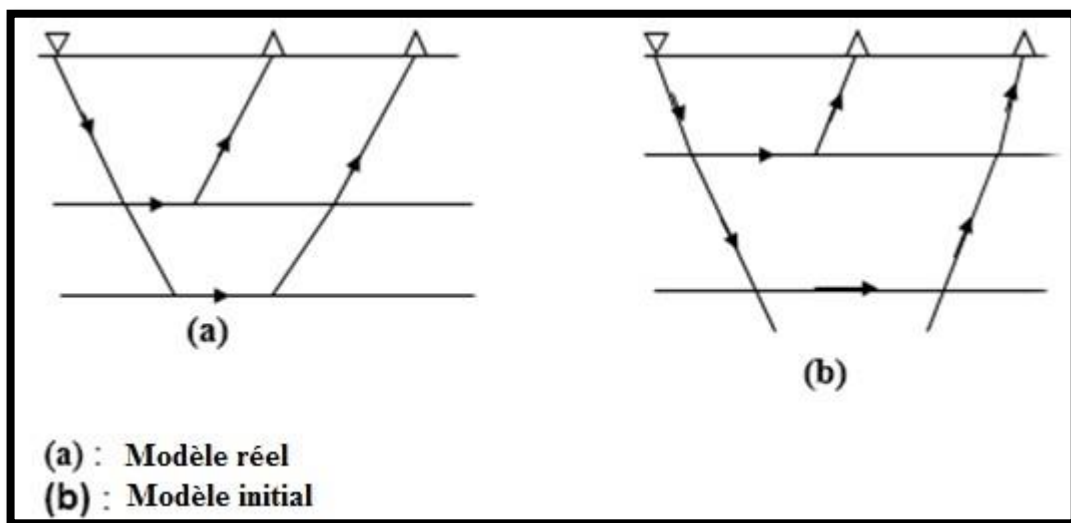


Figure I.13 Trajectoire des rayons réfractés à travers le modèle d'origine et le modèle initial

Généralement le modèle supposé est un modèle approximatif, c'est à dire que les arrivées du modèle ne correspondent pas aux arrivées réelles. On montre sur la figure (I-14) l'erreur existant entre les temps d'arrivées du modèle supposé et celles du modèle réel.

En analysant cette fonction d'erreur qu'on essayera de minimiser, on peut estimer les corrections à apporter au modèle choisi, et cela de manière itérative jusqu'à avoir une ressemblance entre les temps observés et ceux du modèle estimé. Dans les conditions idéales l'erreur est nulle .

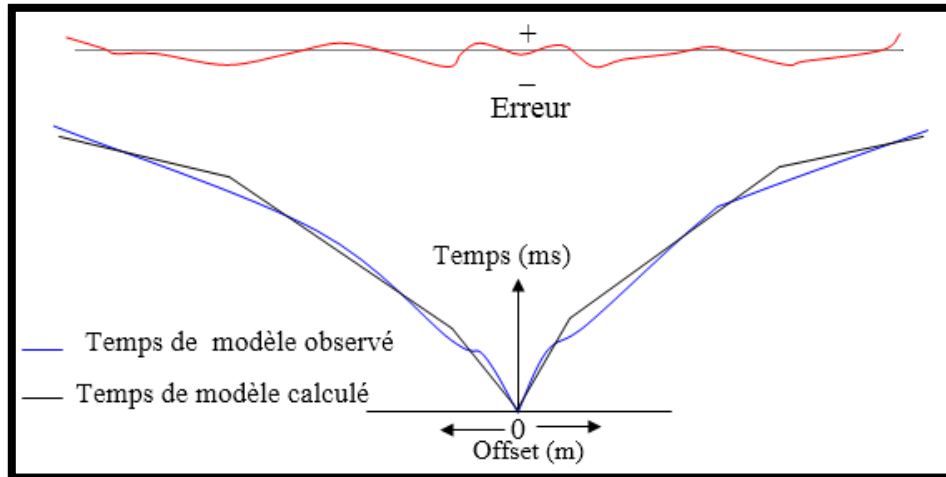


Figure I.14 Erreur entre le modèle observé et le modèle calculé

- **Algorithme GLI:**

Comme toutes méthodes itératives, le choix du modèle initial est important. Ce dernier, pour l'algorithme GLI montré ci-dessous, permet de connaître le nombre de couches prises avec leurs épaisseurs et leurs vitesses. Le programme GLI exécute une série d'itérations dans lesquelles les premières arrivées réfractées du modèle sont calculées par la méthode du tracé de rayon et sont comparées avec celles mesurées. Alors des modifications sont appliquées au modèle, et un nouvel ensemble des temps de premières arrivées réfractées est calculé. Cette procédure est répétée jusqu'à l'obtention d'une ressemblance acceptable entre les temps observés et celles du modèle initial ce qui revient à chercher le modèle qui donne une erreur minimale.

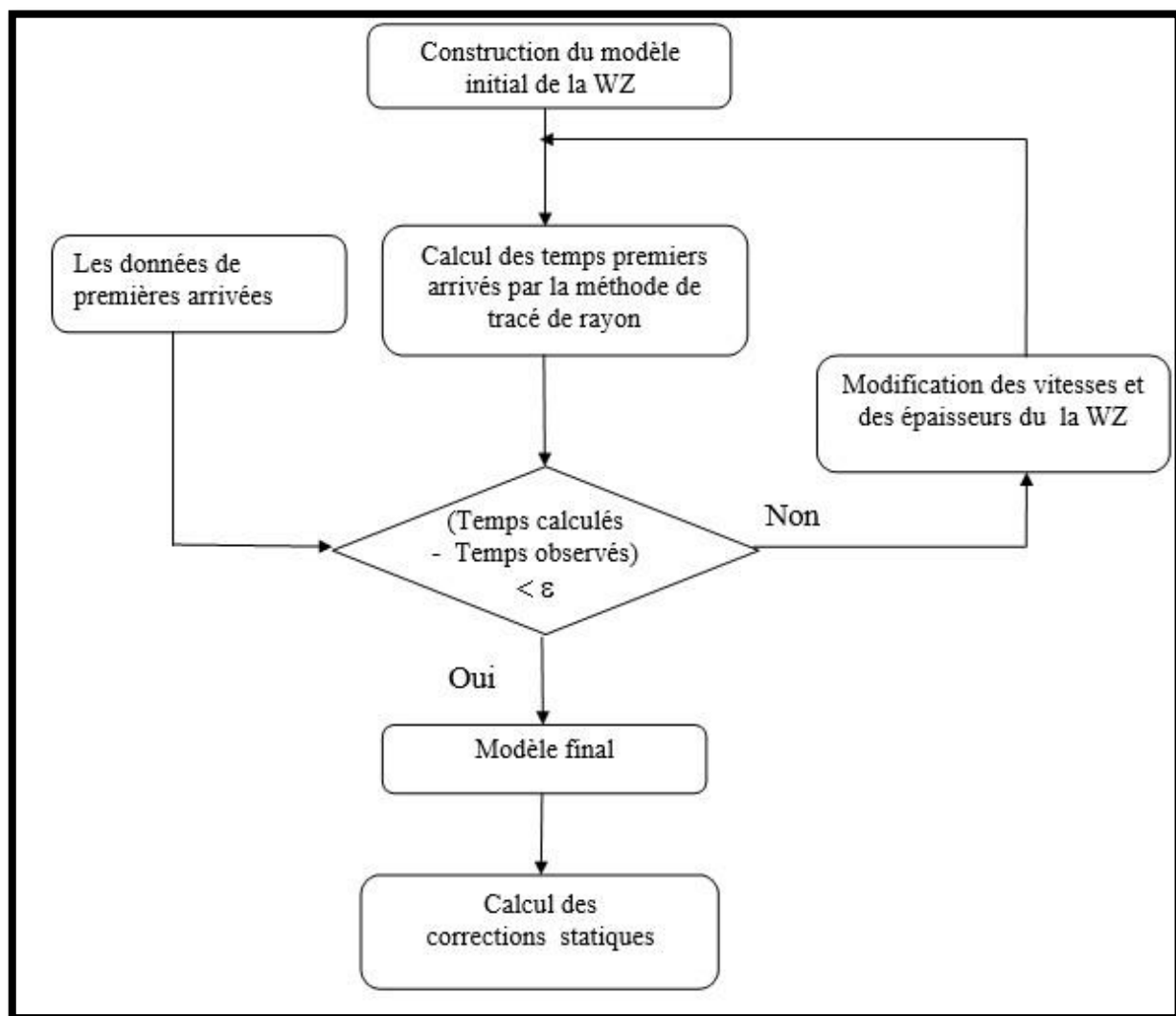


Figure I.15 Algorithme général de la modélisation itérative (GLI)

Chapitre 02

Généralité et théorie de la tomographie

sismique

II.1. introduction

L'imagerie tomographique des vitesses sismiques est une des techniques géophysiques. C'est probablement l'application la plus novatrice de la méthode sismique pour l'exploration et la surveillance à haute résolution du sous-sol.

Seismic tomography : art or science ? » telle est la question posée par Frederik J. Simons en introduction d'une présentation consacrée à la reconstruction tomographique .

La suite de cette présentation souligne la grande importance du savoir-faire du géophysicien dans la difficile résolution du problème tomographique non-linéaire et mal posé (Hadamard, 1902). De nombreuses recherches ont entrepris de faciliter et d'améliorer la résolution de ce problème. Certaines d'entre elles ont adopté une approche mathématique, par exemple sous la forme d'une régularisation (Tikhonov and Arsenin, 1977), d'autres ont choisi une approche physique, par exemple en considérant les volumes de Fresnel (Červený and Soares, 1992).

La méthode de tomographie ou d'imagerie est utilisée dans plusieurs domaines : médecine, sécurité, géophysique, ...

II.2. Définition de la tomographie

La tomographie est un mot issu du grec « **tomos** » signifiant littéralement « coupe » ou « tranche », et « **graphein** » signifiant « écrire ». Ce mot signifie donc littéralement représentation en coupes. D'une manière plus générale, on désigne par tomographie toutes les techniques qui consistent à reconstruire le volume d'un objet à partir d'une série de mesures déportées à l'extérieur de l'objet. Ces mesures peuvent être effectuées soit à la surface, soit à une certaine distance de l'objet. Le résultat obtenu est une reconstruction en 3D des valeurs prises par une grandeur physique caractérisant l'intérieur de l'objet ; la grandeur physique à caractériser dépend du type d'information que peuvent fournir les détecteurs utilisés (détection d'une particule, pression acoustique, atténuation d'un faisceau lumineux, différence de vitesses). Déportées à l'extérieur de l'objet. Ces mesures peuvent être effectuées soit à la surface, soit à une certaine distance de l'objet.

L'utilisation de la tomographie est majoritairement et historiquement connue dans le cadre de l'imagerie médicale pour laquelle l'objet à reconstruire est une partie humaine, mais elle est aussi pratiquée dans d'autres domaines très différents tels qu'en géophysique, pour reconstruire une structure géologique.

II.3. Comparaison des différentes méthodes d'inversion tomographique :

« Une comparaison des différentes méthodes d'inversion tomographique a été effectuée par Miranda (1989). En conclusion, on peut dire que l'ART doit être exempté de données théétiques. La DSIS devrait être utilisée pour les exemples de terrain et de données synthétiques. avec un bruit supplémentaire, parce que la technique a tendance à être robuste avec des données bruyantes.

‘Les principaux points pour le choix d'un algorithme d'inversion approprié peuvent être summa- Comme les données géophysiques ont tendance à être éparées et irrégulièrement échantillonnées en plus d'être contaminé par le bruit, les techniques de reconstruction itérative sont plus convient à la tomographie sismique plutôt qu'aux algorithmes analytiques qui sont plus convient au cas médical avec une géométrie fixe. En outre, la reconstruction itérative les algorithmes de structuration se prêtent mieux à l'incorporation d'informations préalables et l'inclusion de rayons incurvés dans la reconstruction (Krajewski et al.,1989). L'algorithme SIRT obtient les résultats les meilleurs et les plus stables. Avec cet algorithme les images ont une apparence plus lisse que les autres et le bruit n'est pas critique détériorer les images reconstruites. La rétroprojection montre principalement les contours de anomalies. L'algorithme LSQR fonctionne bien avec les données sans bruit, mais avec la contamination par le bruit. Il en va de même pour le traitement conjugué Les résultats de YOULA (Youla et Webb, 1982) sont étonnamment bons pour un algorithme basé sur Fourier appliqué à un problème géophysique où le levé

géométrie n'est pas aussi optimale que dans le cas médical.

Bien que le SIRT soit un peu plus lent que l'approche ART, le grand avantage du SIRT est qu'il ne dépend pas de l'ordre des trajectoires de rayons et est plus stable et robuste .

Il peut être généralisé et appliqué même lorsque les temps de trajet sélectionnés sont affectés par erreurs expérimentales et quelques erreurs.

II.4. Différents types de tomographie

II.4.1. Tomographie sismique

La tomographie sismique, tout comme la tomographie médicale, permet d'imager l'intérieur d'une structure. La technique utilise le principe de parcours des ondes sismiques a l'intérieur des matériaux.

De façon générale, les signaux sismiques sont générés à partir d'un trou de forage, puis enregistrés par un ensemble de géophones (ou d'hydrophones) dans un second trou de forage. Par des traitements mathématiques appropriés d'ensemble de données, une image 2D ou 3D de la répartition spatiale des vitesses de propagation des ondes sismiques est obtenue entre les deux forages.

La vitesse de propagation des ondes sismiques dans un matériau est relative à ses propriétés mécaniques.

La tomographie sismique permet d'imager le sous-sol, elle envahie un vaste champ d'application surtout avec le progrès mathématique et de nouveaux algorithmes pour le traitement des données géophysiques.

- Elle est utilisée pour La détermination du module d'élasticité des roches aux fondations des structures proposées en génie civil.

- La détection des cavités sous la construction civiles ou industrielles (bâtiment, usines, barrages, aéroports, ponts,)
- La détection directe des réductions de vitesses résultantes de la simulation explosive d'un réservoir géothermique.
- La possibilité de localiser les limites entre les types rocheux et la détection des failles, canaux souterrains, des fractures et des cosses de minerais.
- Le pouvoir de localiser les minerais de magnétite (roche de faible vitesse), du plomb, sulfates de zinc (Wong, 2000), du chromate (6500 m/s), des champs de charbon (2000 à 2600 m/s) et les mines de sel.
- La détermination des structures profondes du globe (la zone de transition manteau
- _noyau, position de discontinuité ...) par l'exploitation des enregistrements des répliques sismique.
- Détermination de vitesse d'anisotropie.
- La recherche pétrolière (caractérisation du réservoir pétrolier).

La détermination du modèle de vitesse de la surface proche (zone hétérogène) permet d'en corriger les effets sur le signal sismique enregistré (correction statique).

II.4.1.a. Différents types de tomographie sismique

- **Tomographie d'émission :**

La tomographie sismique par émission permet la reconstruction d'image 3D de la distribution des signaux acoustiques générés par des sources ou des sondages sismiques profonds. Les données d'entrée est le champ d'ondes enregistré par un profil sismique 2D ou 3D dont les sources sont à l'intérieur du corps à prospecter et les capteurs sont en dehors de celui-ci de sorte que les rayons sismiques traversent le milieu une seule fois. Un grand avantage de la tomographie par émission sur les autres méthodes est qu'il ne nécessite pas le pointer des temps d'arrivées sismiques ; ce qui exclut le traitement laborieux des données et permet de localiser avec succès les sources par des événements flous et parasites.

- **Tomographie de réflexion :**

Cette tomographie est un procédé de détermination du modèle de vitesse du sous-sol à partir des temps de trajet des ondes sismiques réfléchies sur des interfaces géologiques. Ici ; les sources et les capteurs sont disposés sur la même surface d'étude. Cette méthode présente plusieurs avantages :

- Flexibilité d'utiliser différents type de mesures des temps des trajets simultanément (réflexion primaires, et également les réflexions multiples, temps des trajets associés aux ondes-PS convertis, sismique de surface, sismique de puits) ; à condition que le tracé de rayon permette le calcul de ces données,

- temps de calcul faible dans l'étape du problème direct, en comparaison avec le temps nécessaire dans le calcul de la solution de l'équation d'onde.
- Réduction du nombre de minima locaux du problème inverse, en comparaison avec l'inversion sismique sur la base de la simulation de l'équation d'ondes (Sysmes, 1986).
- Capacité d'intégrer une information a priori géologique (via les formulations des moindres carrés).

- **Tomographie en transmission :**

Cette tomographie (crosswell seismic) implique l'utilisation de la sismique de puits où le dispositif récepteur est implanté dans un puits et les sources implantées dans un autre puits ou en surface comme en sismique réfraction.

Dans ce type de tomographie, on s'intéresse seulement aux premières arrivées sismiques car leur analyse est beaucoup plus simple comparée à celle du champ d'onde tout entier, c'est cette tomographie qui fera l'objet du présent travail.

II.4.1.b. Limite et difficultés :

Malgré les développements remarquables qu'a connus la tomographie sismique depuis sa naissance, des efforts supplémentaires restent à faire pour améliorer la résolution d'images de vitesse résultantes.

- Une couverture de rais insuffisante et incontrôlable. Les trajets sismiques sont focalisés dans les zones à vitesse élevée.
- Les modes dispersifs et anisotropiques de propagation de l'onde donnant naissance à des arrivées indésirables ou difficiles à en extraire de l'information. Par exemple, dans un environnement stratifié, les données vont contenir des arrivées multiples, des modes d'ondes guidées, des réflexions supercritiques ainsi que des modes de conversion d'ondes, la présence de ces arrivées comme première sur les enregistrements rend l'inversion erronée.
- Les rayons sismiques donnant les premières arrivées peuvent être en dehors du plan vertical contenant les deux puits ce qui faussera tragiquement les tomogrammes finals de vitesse.
- Les trajets donnant naissance aux premières arrivées peuvent aussi avoir des segments à l'extérieur de la grille établie. Les observations effectuées limites de la grille risquent beaucoup de subir cet effet ;
- Le choix de modèle initial de vitesse affecte fortement les tomogrammes résultants du fait de la non-linéarité trop forte du problème inverse posé ;
- L'application des opérations de lissage (smoothing) peut être effacée certaine anomalie de vitesse dues à des hétérogénéités réelles de la subsurface ;

- Limites de précision des outils mathématiques (de modélisation comme d'inversion) densités pour la résolution du problème inverse pose en tomographie sismique. Malgré les développements dans les deux outils, les images tomographiques produites ne sont pas toujours représentatives du milieu exploré.

II.4.2. Les étapes de la tomographie sismique :

La résolution du problème inverse tel que posé en tomographie sismique passe en général par trois étapes, à savoir : la paramétrisation, la modélisation et l'inversion. L'étape de paramétrisation est généralement effectuée une seule fois, néanmoins la modélisation et l'inversion peuvent être exécutées plusieurs fois pour fournir la solution du système à résoudre.

II.4.2.a. Paramétrisation :

En Mathématique, le paramétrage est un des procédés fondamentaux de définitions des chemins, courbes, surfaces et plus généralement des variétés.

En tomographie, pour mieux évaluer la qualité des images tomographiques, on doit prendre en compte non seulement la qualité des données et la précision numérique de la solution du problème direct et inverse mais aussi la pertinence de paramétrisation du modèle et l'affichage des résultats. La qualité de la solution en problème direct, en particulier, dépend fortement de la paramétrisation du champ de vitesses et est d'une grande importance à la fois pour le calcul des temps de parcours et les expressions aux dérivées partielles qui caractérisent le problème inverse.

Ceci, consiste à discrétiser la région à prospecter en une grille dans laquelle on choisit la forme et la dimension des cellules (longueur et largeur). La taille d'une cellule définit la résolution de l'image résultante, appelée tomogramme, ou plus précisément le plus petit élément que nous pouvons restituer après l'inversion.

D'autre part, l'augmentation du nombre de cellules dans une grille permet l'obtention d'une image tomographique de haute résolution sur laquelle on peut détecter les faibles changements de vitesse et mettre en relief les détails des anomalies présentes et la géométrie des interfaces séparant les différences couches.

Ainsi, le choix de la grille utilisée présente une importance capitale. On peut cependant discrétiser le milieu par une grille cartésienne ou polaire. Dans la première grille, les cellules sont de forme carrée ou rectangulaire, alors que dans la seconde elles sont des secteurs de cercle en 2D et des hexaèdres en 3D. Les grilles polaires, ayant pour paramètres : le rayon et la longitude trouvent une large application dans la tomographie à grande échelle (ex : tomographie du globe terrestre). Dans ce cas, l'utilisation de ce type de grille à la tomographie terrestre permet de repérer certaines discontinuités telles que le Moho et la limite noyau- manteau. L'inconvénient de ce type de grille est le temps de calcul et l'espace mémoire alloué comparativement à ceux requis pour une grille cartésienne.

II.4.2.b. Modélisation

La modélisation constitue une étape importante dans le processus d'inversion dont l'objectif est de reconstruire le sous-sol partant des mesures des temps de propagation des ondes de compression. Lors de cette étape, on calcule les temps de parcours théoriques sur un modèle de vitesse donné pour tout couple émetteur- récepteur. Ceci est obtenu par la détermination des cellules traversées par tout rayon sismique relatif & un couple émetteur-récepteur particulier avec indication de la longueur parcourue dans chacune de ces cellules. De la, la matrice de configuration du système 4 résoudre est formée.

II.4.2.c. Inversion

Ici, on doit alors résoudre un système d'équations linéaires très large. Ce système d'équations linéaires est en général mal-conditionné, voire même singulier. Ceci est la conséquence du caractère mal-posé du problème initial. La difficulté est alors d'obtenir une solution unique et acceptable pour ce système d'équations linéaires, en exploitant information a priori dont on dispose sur la solution.

Un tel système nécessite des algorithmes de résolution particuliers. Les méthodes itératives sont les plus répandues pour restituer les paramètres du modèle grâce à leur convergence rapide vers la solution optimale. Nous présentons ultérieurement les méthodes les plus utilisées pour résoudre les problèmes inverses posés en tomographie sismique.

Nous abordons dans le deuxième chapitre le développement de l'équation d'Eikonal dont la résolution numérique permet le calcul des temps de première arrivée pour un modèle de vitesse donné.

II.5. Les différentes méthodes de reconstruction tomographiques :

Les méthodes de reconstruction se répartissent en deux classes :

- La première classe de méthodes consiste à définir les équivalents contenus de la transformée de Radon ainsi que de l'opérateur de rétroprojection. Ce sont les méthodes analytiques, pour lesquelles il est nécessaire de connaître les projections de façon quasi continue sur 360° autour de l'objet.
- La seconde classe de méthodes de résolution de la tomographie consiste à exprimer le problème directement sous forme discrète, sous la forme d'un système d'équations linéaires. La résolution s'effectue ainsi selon une approche itérative, la résolution directe n'étant pas réalisable.

Dans la reconstruction tomographique il y'a des méthodes analytiques tell que :

- a. Algorithme de coupe- projection
- b. Algorithme par rétroprojection filtré

Et il y'a des méthodes algébriques

II.5.1. Méthodes algébriques :

Il y'a trois principales méthodes lesquelles : La méthode ART, la méthode SIRT et la méthode SVD , et dans l'application d'inversion tomographique généralement on utilise l'un des algorithmes ART ou SIRT .

II.5.1.a. La méthode ART (Algebraic Reconstruction Technique):

C'est une méthode itérative pour résoudre les systèmes d'équations linéaires $d = G \cdot m$, développée par le mathématicien polonais Stefan Kaczmarz en 1937. Elle a été redécouverte dans le domaine de la reconstruction d'images à partir des projections par Richard Gordon, Robert Bender, et Gabor Herman en 1970, ou on l'appelle la Technique Algébrique de Reconstruction (ART)

Chaque ligne de la matrice G définit une équation de rayon de projection. En partant d'une solution initiale $S^{(0)}$, on définit à la $K^{(ième)}$ itération le résiduel $r^{(K)}$ correspondant à la solution.

$$r^{(K)} = d_{obs} - d^{(K)} = d_{obs} - GS^{(K)} \quad (II.1)$$

Où d_{obs} représente le vecteur des observations et $d^{(K)}$ le vecteur des temps calculés ou prédits à travers le modèle $S^{(K)}$.

L'idée est de chercher dans le vecteur $S^{(K)}$ équation par équation les corrections $\Delta S^{(K)}$ jusqu'à ce que le vecteur des résidus $r^{(K)}$ s'annule. Donc, la méthodologie est de commencer par la première équation en calculant la correction $\Delta S^{(0)}$, puis on passe à la deuxième équation pour calculer $\Delta S^{(1)}$ et ainsi de suite pour toutes les équations du système. Ce processus se répète à nouveau jusqu'à ce que la solution ait convergé suffisamment.

Otons que les corrections $\Delta S^{(K)}$ sont en fonction des valeurs de la matrice $G = (l_{ij})$, calculées dans l'étape de modélisation, et du résiduel $r^{(K)}$. De plus, les éléments de la matrice G sont des longueurs de trajet. Donc, la formule de Kaczmarz appliquée à la $i^{ième}$ équation s'écrit :

$$\Delta S_j^{(K)} = \frac{l_{ij}^w r_i^{(K)}}{\sum_{m=1}^M l_{im}^{w+1}} \quad (II.2)$$

Pour le cas de la norme $l_2 (w = 1)$, l'expression de la correction prendra la forme finale suivante :

$$\Delta S_j^{(K)} = \frac{l_{ij} r_i^{(K)}}{\sum_{m=1}^M l_{im}^2} \quad (II.3)$$

L'algorithme ART est très utilisé en tomographie sismique, parce qu'il est très économique en coût de calcul du fait qu'à chaque itération une seule ligne est utilisée à la fois. Par contre, il est instable en présence de données bruitées. Pour remédier à ce problème, plusieurs variantes ont été développées en proposant l'utilisation des techniques de régularisation.

II.5.1.b. La méthode SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) :

La méthode SIRT a été développée en premier par Gilbert en 1972 pour des études de tomographie médicale. La première application de méthode en géophysique est due à Dines et Lytle en 1979. La méthode SIRT est aussi une méthode itérative comme l'ARTelle vient pour accélérer la convergence de la méthode ART par le calcul des corrections de lenteur en tenant compte de tous les rais (toutes les lignes de la matrice de configuration toutes les lignes de la matrice de configuration G), puis de moyenner ces corrections. Autrement dit, au lieu de procéder de rayon par rayon (méthode ART), elle procéde pixel par pixel et à chaque pixel, toutes les mesures de projection correspondantes à tous les rayons passant par ce pixel sont calculées et sommées. Un facteur de correction est appliqué à la densité des mesures de ce pixel. La formulation la plus utilisée pour cette méthode est donnée l'expression suivante :

$$\Delta S_j = \frac{1}{N_j} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{l_{ij} r_i}{\sum_{m=1}^M |l_{im}|^2} \right) \quad (\text{II.4})$$

Où N_j représente le nombre de rai parcourant la cellule j .

Bien que la méthode soit très utilisée dans la reconstruction des images tomographiques, de très nombreuses versions ont été développées. Ces versions sont généralement basées sur la formulation de Dines et Lytle (1979).

L'application de l'algorithme SIRT ou toute autre algorithme d'inversion itérative, donne lieu à des corrections de lenteurs moins importantes. Les itérations se poursuivent jusqu'à ce que l'erreur résiduelle les temps prédits et ceux observés cesse de diminuer de manière significative. parfois, on fixe un seuil, la séquence d'itérations s'arrête lorsque la variation de l'erreur atteint une valeur limite déterminée comme critère d'arrêt des itérations pour cela, des critères de convergence sont utilisés pour contrôler ce type des méthodes.

II.6. Algorithme d'inversion tomographique :

Dans le but de construire le modèle de lenteur S (ou de vitesse) à des temps de trajet observés et stockés dans un vecteur t_{obs} . Si on désigne par N_{iter} le nombre d'itérations, alors, les étapes à suivre sont :

1. Construire un modèle initial de lenteur S^0 ,
2. Calculer les temps prédits, $t^{(0)} = GS^{(0)}$. mettre $N_{\text{iter}} = 0$.
3. Calculer le vecteur résiduel, $\delta t^{N_{\text{iter}}} = t_{\text{obs}} - t^{N_{\text{iter}}}$ et la fonction coût.
4. Calculer la perturbation de lenteur, $\delta S^{N_{\text{iter}}} = [G^T G]^{-1} G^T \delta t^{N_{\text{iter}}}$. on suppose que le système est alors régularisé.
5. Résoudre ce système pour trouver $\delta S^{N_{\text{iter}}}$ en utilisons l'un des algorithmes itératifs comme ART ou SIRT.
6. Mise à jour du modèle de lenteur, $S^{N_{\text{iter}}+1} = S^{N_{\text{iter}}} + \delta S^{N_{\text{iter}}}$

7. Mettre $N_{iter} = N_{iter} + 1$
8. Retour à l'étape 1 ou $S^{N_{iter}+1}$ est utilisé comme nouveau modèle initial. On itère ce processus jusqu'à ce que la fonction coût cesse de diminuer.

Chapitre 03

**La tomographie des temps des premières
arrivées**

III.1. La tomographie des temps de première arrivée

La tomographie des temps de première arrivée cherche à estimer un modèle de vitesse de propagation des ondes sismiques à partir des temps de première arrivée pointés sur les sismogrammes. Le modèle de vitesse obtenu peut par exemple permettre une interprétation structurale du milieu [Improta et al., 2002], [Zelt et al., 2006] ou bien servir de modèle initial pour d'autres traitements de l'imagerie sismique [Operto et al., 2006], [Brenders and Pratt, 2007]. La tomographie des temps de première arrivée est généralement associée à des acquisitions de sismique réflexion terrestre. Les temps de première arrivée contiennent alors essentiellement de l'information sur la subsurface proche

III.2. L'objectif de la tomographie des temps de première arrivée

La tomographie des temps de première arrivée a pour objectif de retrouver un modèle de vitesse de propagation des ondes sismiques à partir de temps de première arrivée mesurés à la surface. Mathématiquement, cela consiste à résoudre un problème inverse, à savoir retrouver les paramètres d'un modèle physique qui expliquent au mieux les données observées. La résolution de ce problème nécessite une étape de modélisation, appelée problème direct, qui permet, à partir d'un modèle donné et en utilisant les lois de la physique, de simuler des données observées (Fig. III.1).

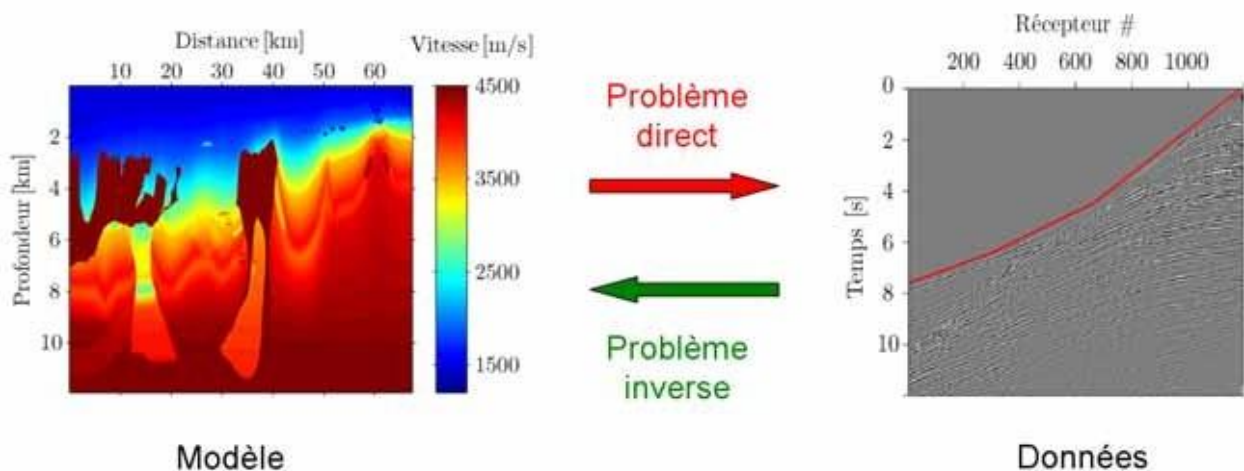


Figure III.1 Les problèmes direct et inverse en tomographie des temps de première arrivée relient un modèle de vitesse aux temps de première arrivée pointés (en ligne rouge) sur un sismogramme.

III.3. Le problème direct

L'objectif de cette partie est de déterminer la relation physique $\mathbf{g}$ qui existe entre les données $\mathbf{d}$ et le modèle physique étudié $\mathbf{m}$

$$\mathbf{d} = \mathbf{g}(\mathbf{m}) \quad (\text{III.1})$$

Les données sont les temps de première arrivée et le modèle étudié est un modèle de vitesse de propagation des ondes sismiques. Les données observées d_{obs} correspondent aux temps de première arrivée pointés sur les sismogrammes T_{obs} . Les données synthétiques $\mathbf{d}$ sont les

temps de première arrivée t_i calculés pour un modèle s donné par la résolution de l'équation d'Eikonale. On peut alors établir la relation entre le temps de première arrivée T_i , le modèle de lenteur S_j et les longueurs des segments du rai l_{ij} dans chaque maille du milieu discrétisé

$$T_i = \sum_j l_{ij} s_j \quad (\text{III.2})$$

En utilisant une notation matricielle, on obtient la formule suivante :

$$T = L \cdot s \quad (\text{III.3})$$

Avec L la matrice des longueurs de rais. Cette équation correspond à la formulation du problème direct.

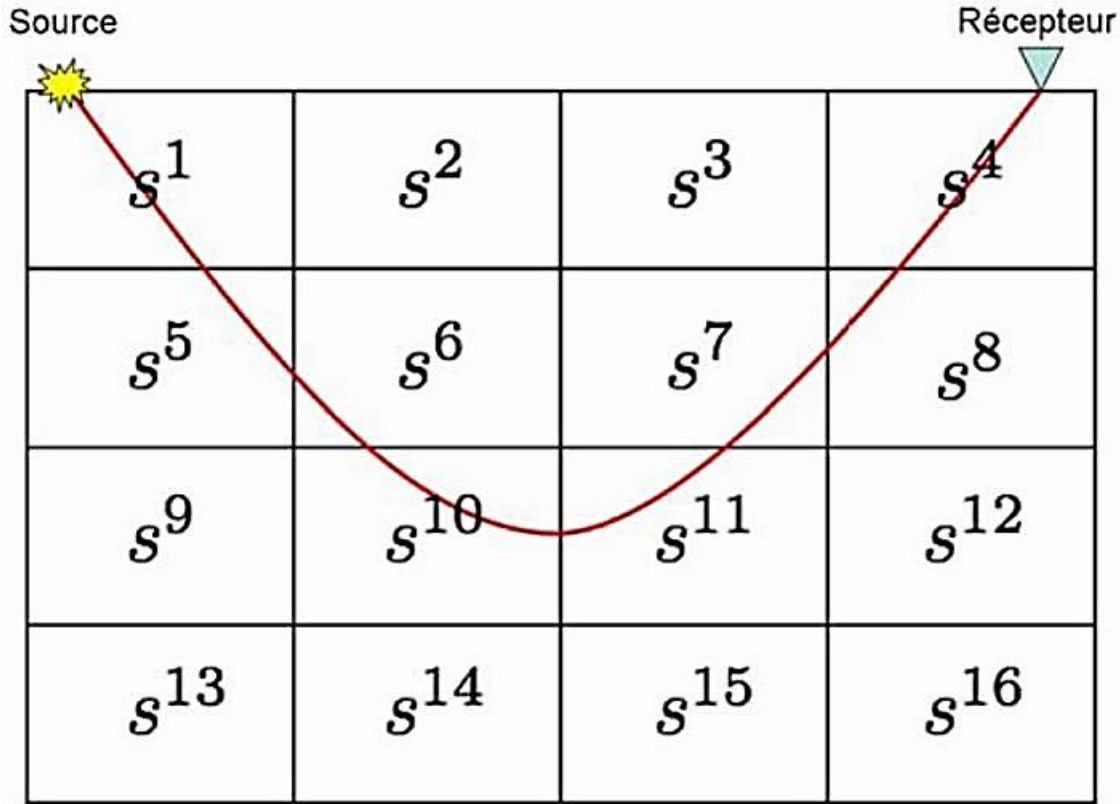


Figure III.2 *Schéma* illustrant la discrétisation en grille cartésienne d'un modèle de lenteur S_j et la trajectoire d'un rai entre une source et un récepteur.

III.4. Le problème inverse

La résolution du problème inverse se propose de retrouver les paramètres physiques permettant d'expliquer au mieux les données observées. Le principe est de considérer le problème inverse en terme d'états de connaissance a priori et a posteriori sur les données et les modèles. Ce formalisme permet la prise en compte de l'information a priori et des statistiques des incertitudes, expérimentales et théoriques, sur les modèles et les données. A partir d'hypothèses faites sur la

nature de ces incertitudes il est possible de définir une fonction coût, dite des moindres carrés, qui mesure l'écart entre les données observées et celles théoriques obtenues pour un modèle donnée. La minimisation de cette fonction coût permet alors de déterminer le modèle qui explique au mieux les données observées au sens des moindres carrés.

III.4.1. La fonction coût des moindres carrés :

Le modèle de vitesse m le plus vraisemblablement à l'origine des données observées d_{obs} se situe alors au minimum de la fonction coût C , aussi appelée fonction des moindres carrés.

$$F_c(m) = \frac{1}{2} [(g(m) - d_{obs})^T C_D^{-1} (g(m) - d_{obs}) + (m - m_0)^T C_M^{-1} (m - m_0)] \quad (III.4)$$

m_0 : représente le modèle à priori

m : Le modèle à posteriori

d_{obs} : Les données observées

$g(m)$: Le modèle direct

g : La fonction mathématique reliant les données et le modèle.

C_M : Matrice de covariance sur le modèle.

C_D : Matrice de covariance sur les données.

T : désigne l'opérateur transposé.

Notons que cette fonction $F_c(m)$ comporte deux termes importants :

la matrice C_D qui est une matrice de pondération et le terme :

$$R(m) = (m - m_0)^T C_M^{-1} (m - m_0) \quad (III.5)$$

qui est l'opérateur de régularisation. Notons voulons chercher la solution S par minimisation de la fonction coût définie dans l'équation (III.4). Pour cela, nous faisons quelques simplifications de cette relation. Supposons qu'on a aucune information à priori, $C_M^{-1} = 0$ et les données sont indépendantes et possèdent la même variance égale à 1, $C_D^{-1} = I$ matrice identité.

Dans ce cas, le problème inverse peut être écrit comme suit :

$$C(m) = \frac{1}{2} (GS - t_{obs})^T (GS - t_{obs}) \quad (III.6)$$

G ; La matrice des longueurs de rais.

S : La lenteur

t_{obs} : Le temps observé

T : Désigne l'opérateur transposé.

$C(m)$: La fonction coût.

III.5. Méthode de Turing Ray Tomographie (TRT) :

La TRT est connu comme une tomographie de réfraction, utilisant le temps de trajets des premières arrivées comme des paramètres d'entrée pour produire un modèle de vitesse d'intervalle des couches superficielles. La solution implique la minimisation entre le temps de trajets observés et ceux prédits par tracé de rayon à travers un modèle initial approximatif. (Geophysical Prospecting 1987)

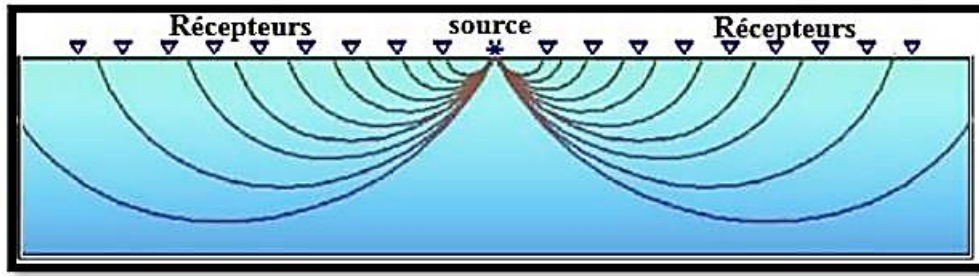


Figure III.3 Trajets de rayon en turning ray tomographie (D. Epili, J. Criss, D. Cunningham, 2001)

Comme toutes techniques d'inversion tomographique, la TRT passe par les trois étapes suivantes :

- Paramétrisation.
- Modélisation.
- Inversion.

III.5.1. Paramétrisation :

Dans cette étape on s'intéresse à la détermination des propriétés de la grille à construire sur le modèle initial du milieu étudié, ces propriétés sont : le nombre, la forme et la dimension (la largeur et la longueur) des tomogrammes (cellules) de la grille. Cette étape est exécutée une seule fois durant toute l'inversion.

III.5.2. Modélisation :

L'étape de modélisation est le problème direct de la tomographie .on calcule le temps des premières arrivées simulées sur une vitesse pour tous couples émetteur- récepteur qui est construit à partir du log sonique, du carottage (VT) ou d'une simple interprétation des première arrivées. Ce calcul est fait à l'aide des algorithmes de tracé de rayons (GRT).

III.5.3. Inversion :

Cette dernière étape est le noyau de résolution du problème inverse tomographique ; elle permet de calculer la variation de la lenteur (l'inverse de la vitesse) verticalement et horizontalement dans la région étudiée, afin de reconstruire le modèle réel de vitesse. La vitesse le long des trajets des rayons est ajustée (mis à jour) en utilisant le résidu entre le temps de trajet pointé (réel) et celui prédits. Ce processus permet de minimiser l'erreur calculée à chaque itération en utilisant l'algorithme de reconstruction itérative simultanée (SIRT). La modélisation et l'inversion sont exécutées durant toutes les itérations du programme jusqu'à l'obtention du modèle finale.

III.5.3.a. Etapes d'exécution :

La technique de Turning Ray Tomography, utilise les temps des premières arrivées comme un paramètre d'entrée. La solution implique la minimisation de la différence entre le temps de trajet observée et ceux calculés par le tracé de rayon sur un modèle subdivisé en grille.

Elle comprend les étapes suivantes :

- 1- Pointé des premières arrivées observées (figure (III-4)), cette étape à laquelle la procédure d'inversion tomographique est très sensible exigée une analyse minutieuse du pointé.

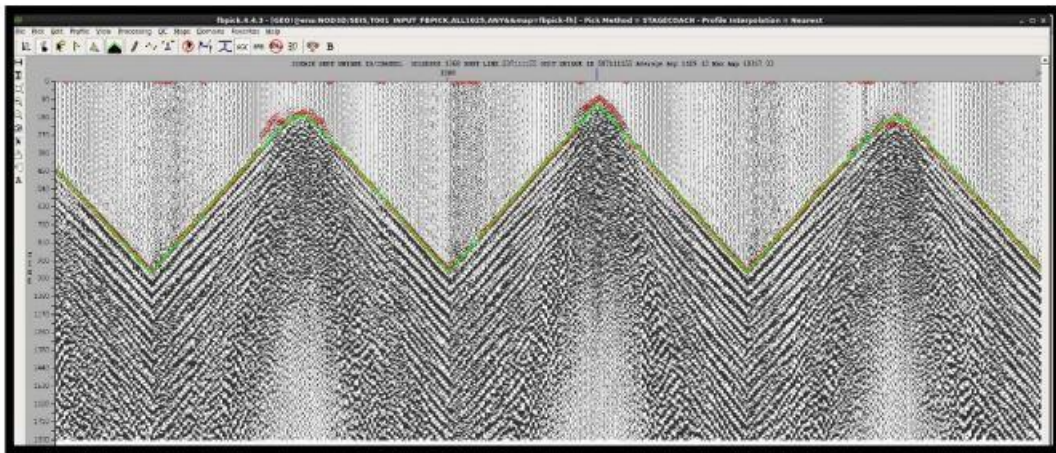


Figure III.4 Exemple de pointé des premières arrivées sur des shots (tutoriel et guide , geostar 2013,CGG)

- 2- Construction du modèle initiale de vitesse, ce modèle est inspiré de l'interprétation direct des premières arrivées avec une introduction des données soit de carottage vertical CVT, log sonique ou donnés de puits. La figure (III-6) montre un modèle initial de vitesse.
- 3- Prédiction des premières arrivées par le tracé de rayons. La figure (III-5) montre les premières arrivées prédites et réelle.

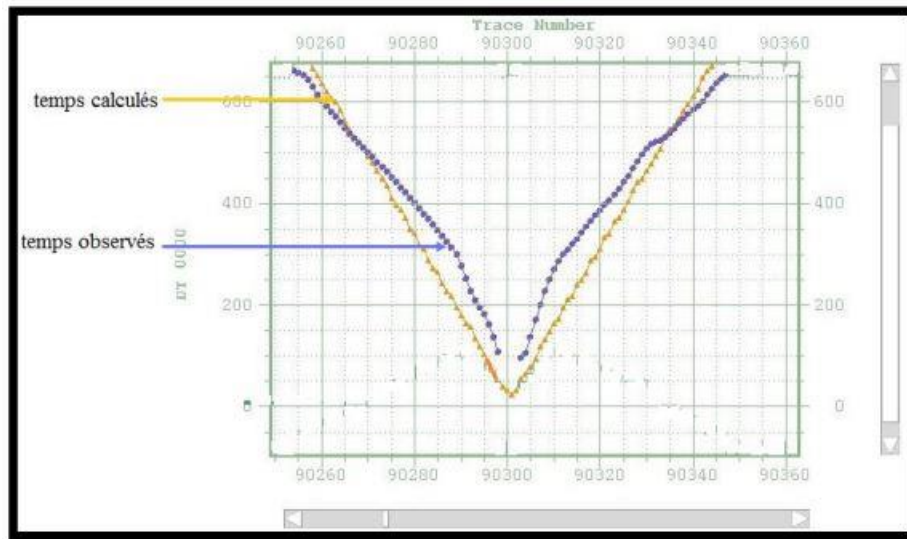


Figure III.5 Courbe des temps de premières arrivées prédits et réelles (tutorial et guide ,geostar,2013,CGG)

4-Calcul des temps résiduels (résidu entre les temps réels et prédits).

5-Inversion tomographique (mis à jour du modèle de vitesse initial).

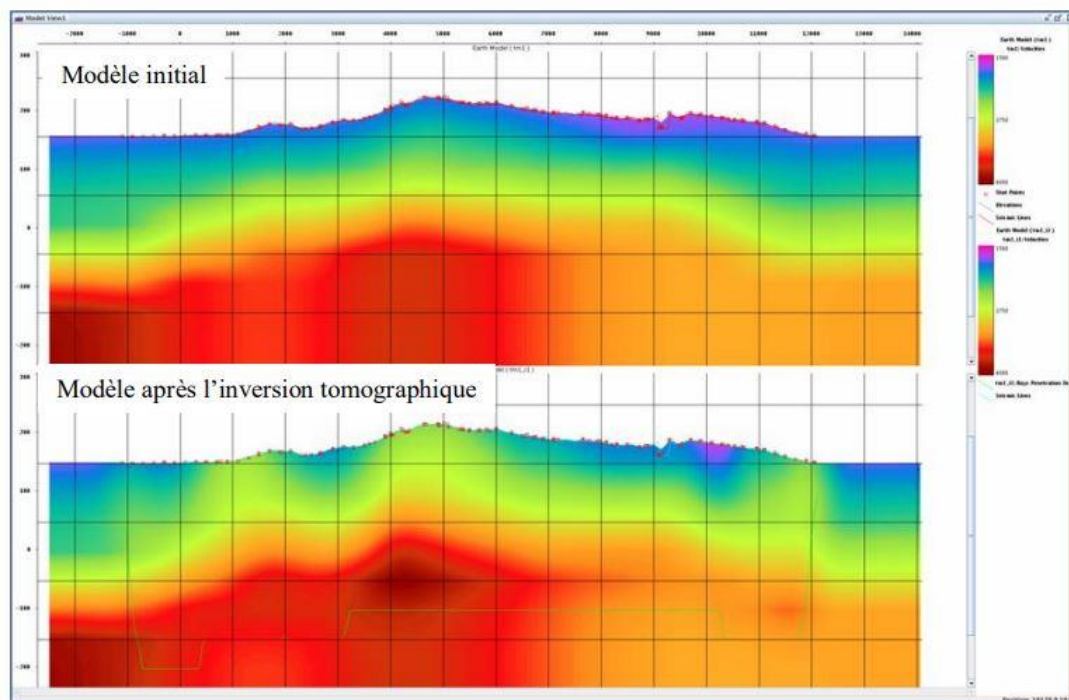


Figure III.6 Exemple d'un modèle de vitesse initial et un modèle final après l'inversion tomographique (tutorial et guide , geostar 2013,CGG)

6-Application des corrections statiques sur le modèle issu de la TRT. L'organigramme suivant représente les étapes de construire un modèle de vitesse qui permet de calculer les corrections statiques à partir de la méthode Turning Ray Tomography (figure (III-7)).

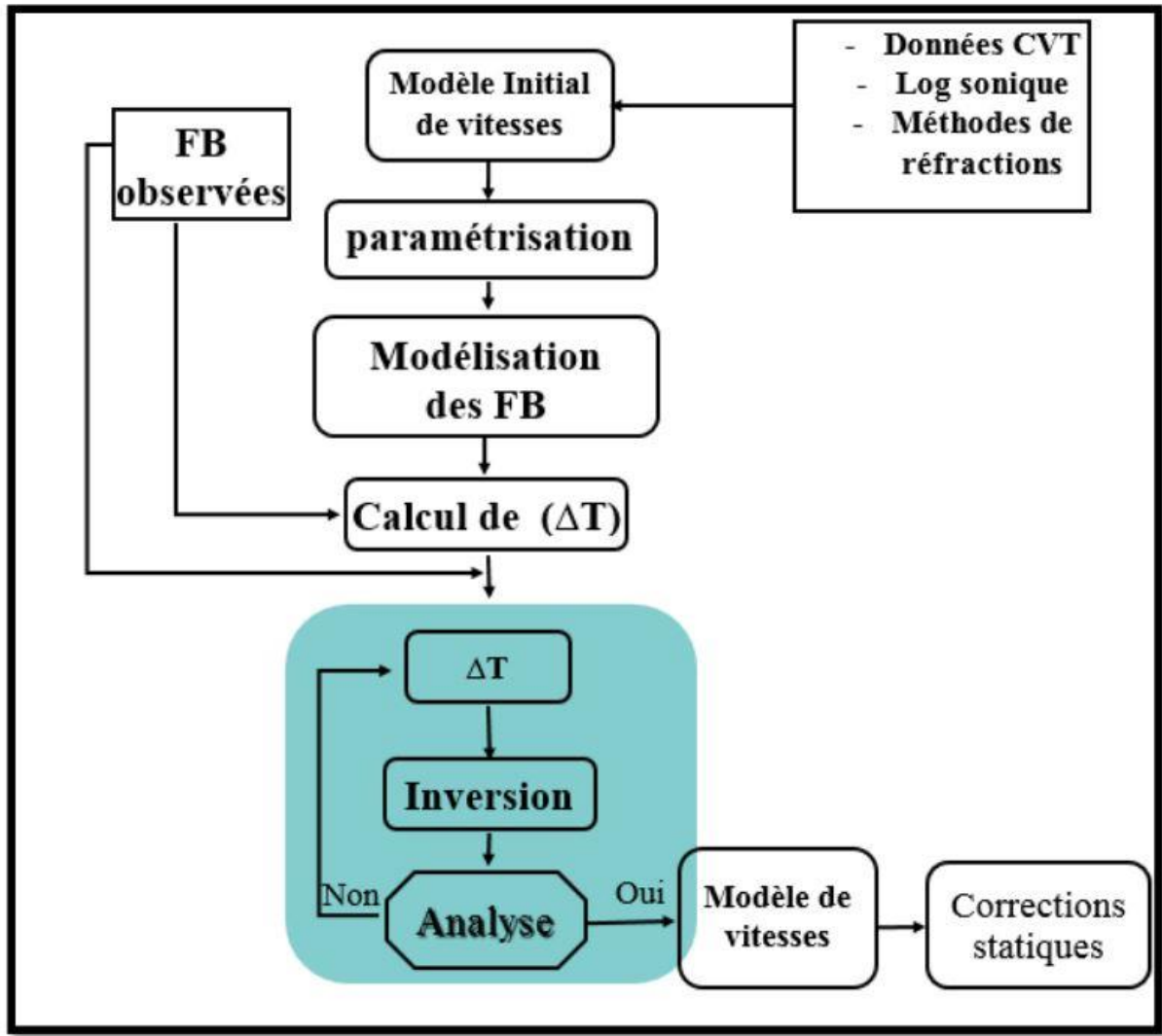


Figure III.7 Organigramme de la méthode TRT (tutoriel et guide , geostar 2013,CGG)

Chapitre 04

Contexte géologique de la région d'étude

IV.1. Introduction générale à la géologie de l'Algérie :

Le territoire algérien s'étend sur 2 381 741 km², ce qui en fait le plus grand pays d'Afrique et du monde arabe. Les limites naturelles de l'Algérie sont la mer Méditerranée au nord avec 1 200 km de côtes, le Maroc à l'ouest, la Mauritanie et le Sahara occidental au sud-ouest, le Mali et le Niger au sud, et enfin la Tunisie et la Libye à l'est.

Sur le plan morphologique, quatre domaines se distinguent du nord au sud :

- L'Atlas tellien, ensemble de reliefs escarpés et de plaines littorales dont les plus riches sont la Mitidja au centre, le Chelif à l'ouest et le Seybouse à l'est.
- L'Atlas saharien, longue suite de reliefs orientés NE-SO s'étendant de la frontière marocaine à celle de la Tunisie.
- Le Sahara, siège de l'essentiel des ressources en hydrocarbures, désert formé de grandes étendues de dunes (Ergs oriental et occidental), de plaines caillouteuses (regs), et parsemé d'oasis où les agglomérations sont de plus en plus importantes.
- Les massifs des Eglab au sud-ouest et du Hoggar au sud.

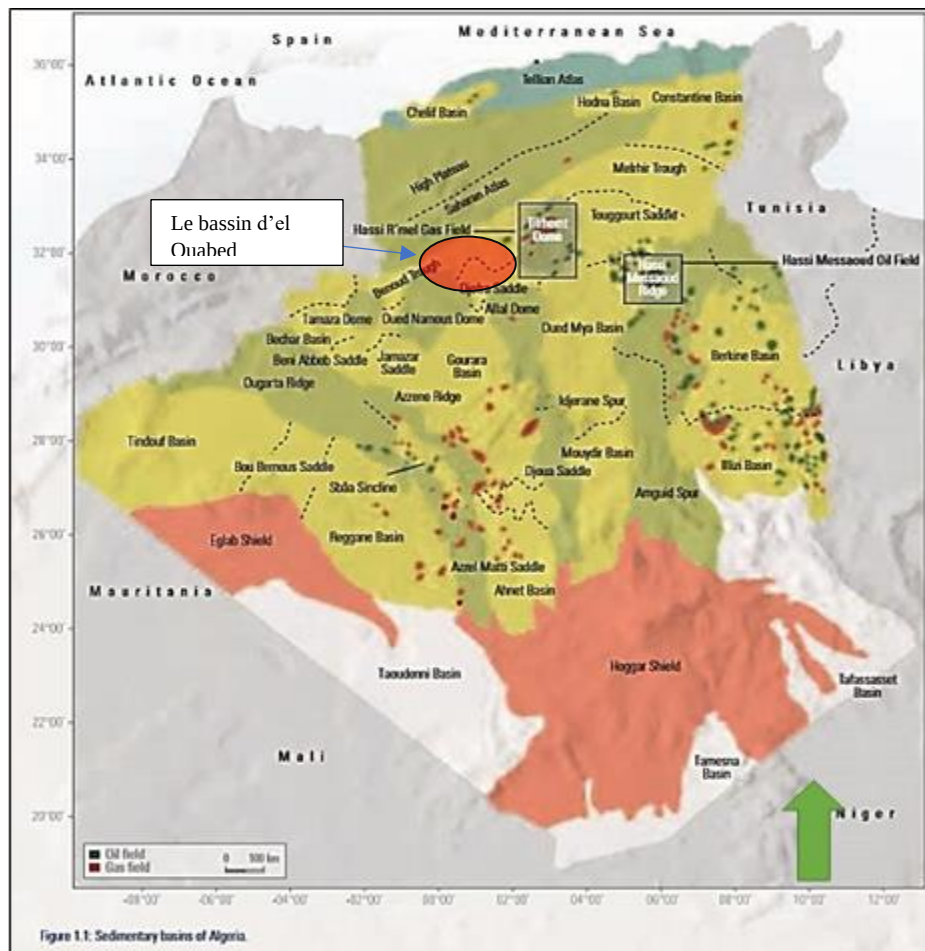


Figure IV.1 Carte des bassins sédimentaire d'Algérie (WEC 2007)

Sur le plan structural, l'Algérie est subdivisée en deux unités tectoniques majeures séparées par la faille sud atlasique :

- Au nord, un domaine alpin marqué par des chaînes de montagnes d'âge tertiaire résultant de l'orogénèse alpine.
- Au sud, la plate-forme saharienne, domaine relativement plus stable constitué d'un socle précambrien sur lequel se sont déposées d'épaisses séries sédimentaires dans des bassins structurés essentiellement durant le Paléozoïque.

D'un point de vue pétrolier, le domaine minier algérien est subdivisé en trois provinces :

- La province orientale : Englobe les bassins d'Illizi, Berkine, Oued Mya et le môle Amguid- Messaoud. C'est au sein de cette province, où se trouvent les gisements géants de Hassi Messaoud (huile) et HassiR'mel (gaz), que l'essentiel des découvertes d'huile et de gaz ont été réalisées jusqu'à aujourd'hui.
- La province occidentale : La province ouest englobe les bassins de l'Ahnet, Timimoun, Béchar- Tindouf, Taoudeni et Sbâa. Cette province, essentiellement à gaz sec. Le potentiel en gaz des pièges aussi bien conventionnels que non conventionnels, notamment les objectifs associés aux pièges subtils, les « tight réservoirs » et les « basin-centered gas accumulations » (BCGAs), confère à cette région du domaine minier algérien une place de premier ordre en termes de prospectivité.
- La province du nord : Englobe les bassins du Sud-Est Constantinois–Melrhir, du Hodna, du Chelif, de l'offshore et de l'Atlas saharien. À cause de son Extrême complexité géologique, cette province n'a pas connu une grande activité d'exploration. Néanmoins, les travaux réalisés jusque-là ont permis la mise en évidence de gisements d'huile, montrant ainsi un potentiel certain dans le nord de l'Algérie.

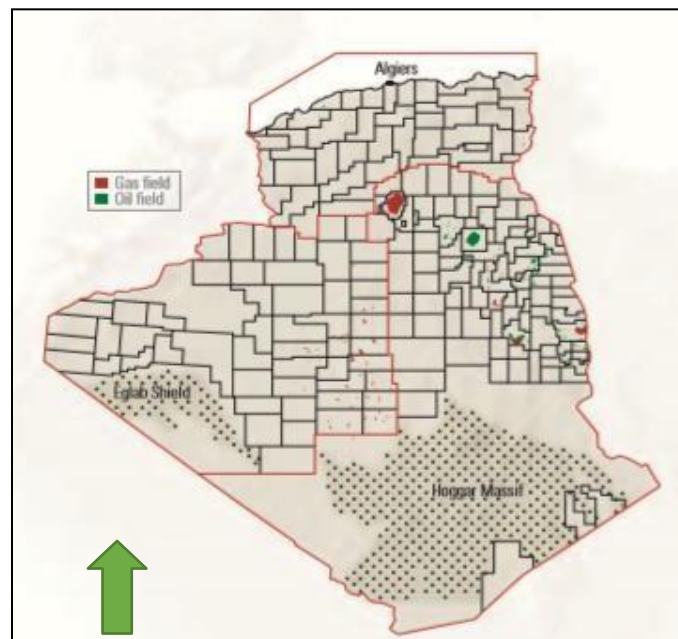


Figure IV.2 carte des gisements pétroliers (WEC 2)

IV.2. Principaux gisements d'hydrocarbures de l'Algérie :

Les bassins les plus productifs d'hydrocarbures demeurent ceux de l'Oued Mya où se trouvent les gisements géants de Hassi Messaoud et de Hassi R'mel, et de Berkine où se trouvent les gisements d'Ourhoud et Hassi Berkine Sud.

Quant aux bassins du Sud-Ouest, ils constituent un pôle d'exploration gazière relativement important, ainsi que de développement tout aussi important avec la mise en production des gisements gaziers de la région d'In Salah, et de la région d'Adrar.

Plus de deux cents gisements sont aujourd'hui reconnus. Les réservoirs sont gréseux dans leur quasi-totalité et se trouvent essentiellement dans les niveaux du Cambro-Ordovicien, du Siluro-Dévonien, du Carbonifère et du Trias.

Les hydrocarbures produits sont très largement soutenus par des opérations de récupération assistée, tant par injection d'eau que par injection de gaz.

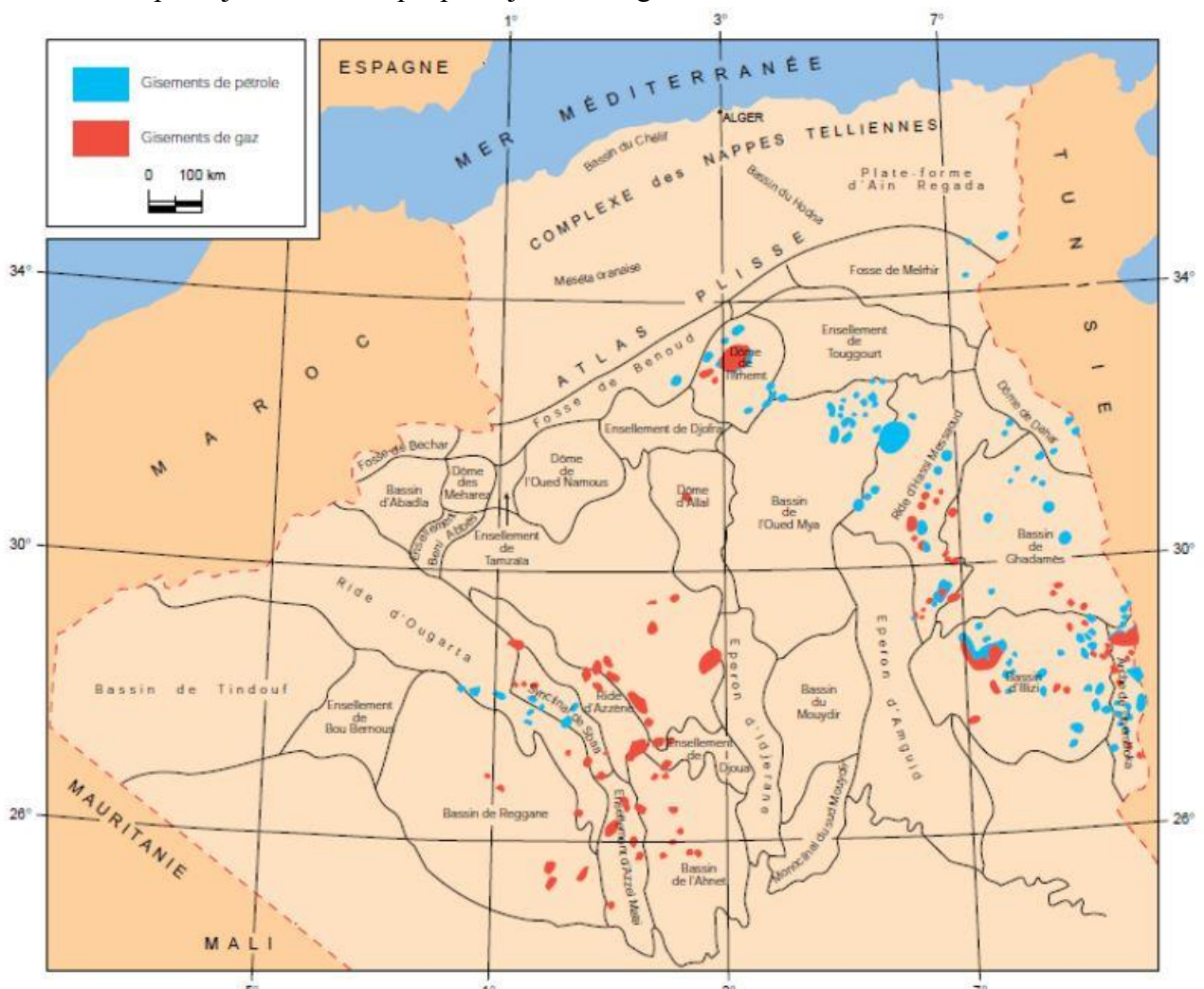


Figure IV.3 Carte des principaux gisements pétroliers en Algérie – Réf : WEC 2

IV.3. Historique de l'exploration géophysique :

Les premières reconnaissances sismiques effectuées par les compagnies pétrolières durant les années 60 ont permis l'implantation d'un certain nombre de forages dont HAID-1, réalisés en 1964 au centre de la dépression.

IV.3.1. Les bassins sédimentaires et province pétrolières de l'Algérie :

Les bassins sédimentaires algériens couvrent plus de 1,5 million km². Ils sont classés sous trois grandes provinces :

1. la province du Nord de l'Algérie ;
2. la province Est de la Plate-forme Saharienne ;
3. la province Ouest de la Plate-forme Saharienne.

IV.3.2. Bassins de la province Ouest de la plate-forme :

La province est essentiellement à gaz sec, elle englobe les bassins suivants :

- le bassin de l'Ahnet ;
- le bassin de Timimoune ;
- le bassin de Béchar-Oued Namous ;
- le bassin de Reggane ;
- le bassin de Tindouf ;
- le bassin de Taoudéni ;
- le bassin de Sbâa.

Ces bassins se répartissent sur une superficie de plus de 650 000 km². Les premiers indices d'huile ont été rencontrés dans les bassins de Reggane et de Tindouf dès le début de l'exploration en 1950 et la première découverte d'huile en quantité commerciale a été réalisée, au début des années 80, dans le grès du Carbonifère de Sbâa, et le Dévonien supérieur.

IV.4. La région d'étude :

Le périmètre de recherche El Ouabed couvre la quasi-totalité du sillon de Benoud, ce périmètre de recherche est traversé par deux routes principales, route nationale N107 qui relie El Bayadh à Ghardaïa et la route N59 et N6b qui relie El Bayadh à Béchar.

IV.4.1. Cadre géographique :

Le sillon de Benoud est situé dans la partie nord-ouest de la plateforme saharienne (passage vers l'Atlas Saharien occidentale), direction NE-SO, s'étend sur une superficie de 23980,62 km², se situe entre 00°30'-02°40' longitude est et 32°30'-33°40' latitude nord. Il s'étale sur territoire des wilayas d'El Bayadh, Béchar, au Sud Laghouat et Nâama au Nord, les localités les plus importantes aux alentours sont Tadjrouna (wilaya de Laghouat et Brezina wilaya d'El Bayadh).

IV.4.2. El Ouabed (El Bayadh)

Du point de vue régional, le périmètre EL Ouabed est limité au Sud par l'ensellement de Djofra, au Nord par l'Atlas Saharien, à l'Est par le dôme de Tilrhemt et à l'Ouest par le Bassin de Béchar et la voûte d'Oued Namous elle contient du pétrole et du gaz associé lors du forage du puits d'exploration Ouled Sidi Cheikh-1 (OSC-1). Les tests de production réalisés ici ont permis de relever des débits de 925 barils/jour de pétrole et 6 456 m3/jour de gaz.

Situation géographique du périmètre EL OUABED

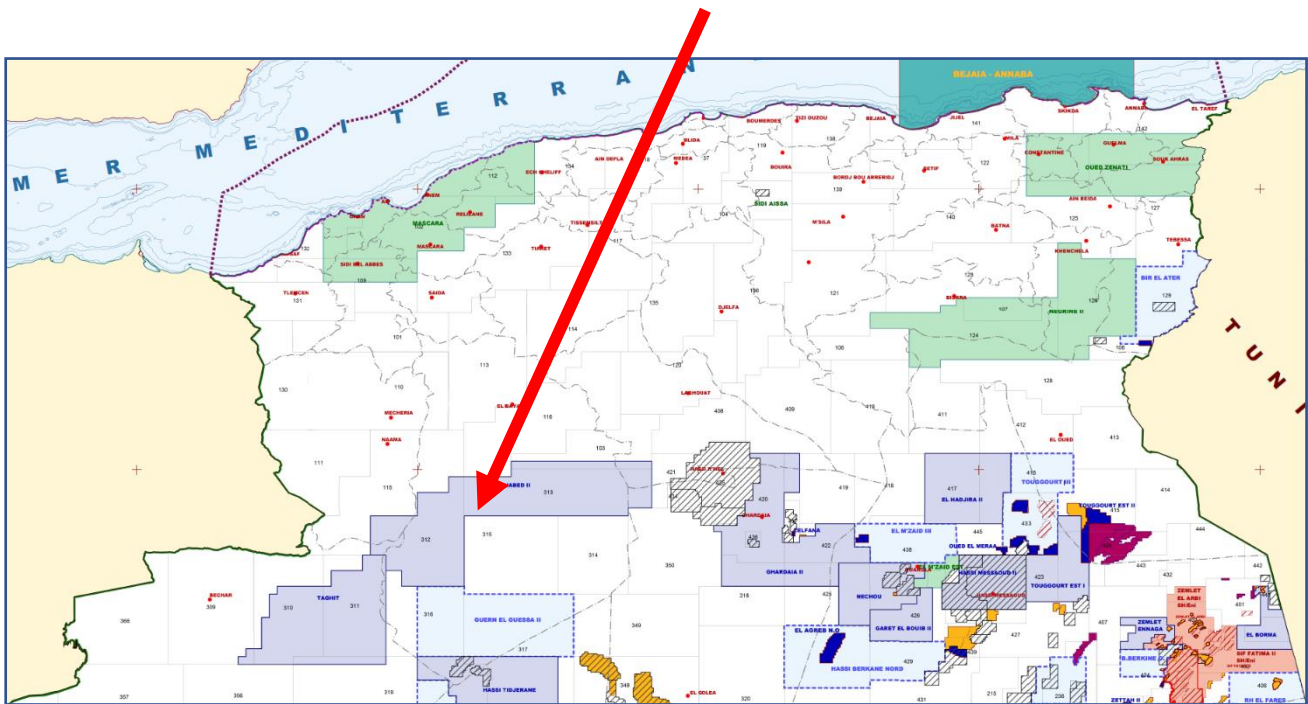


Figure IV.4 Carte de situation géographique du périmètre EL OUABED (ENAGEO, 2021)

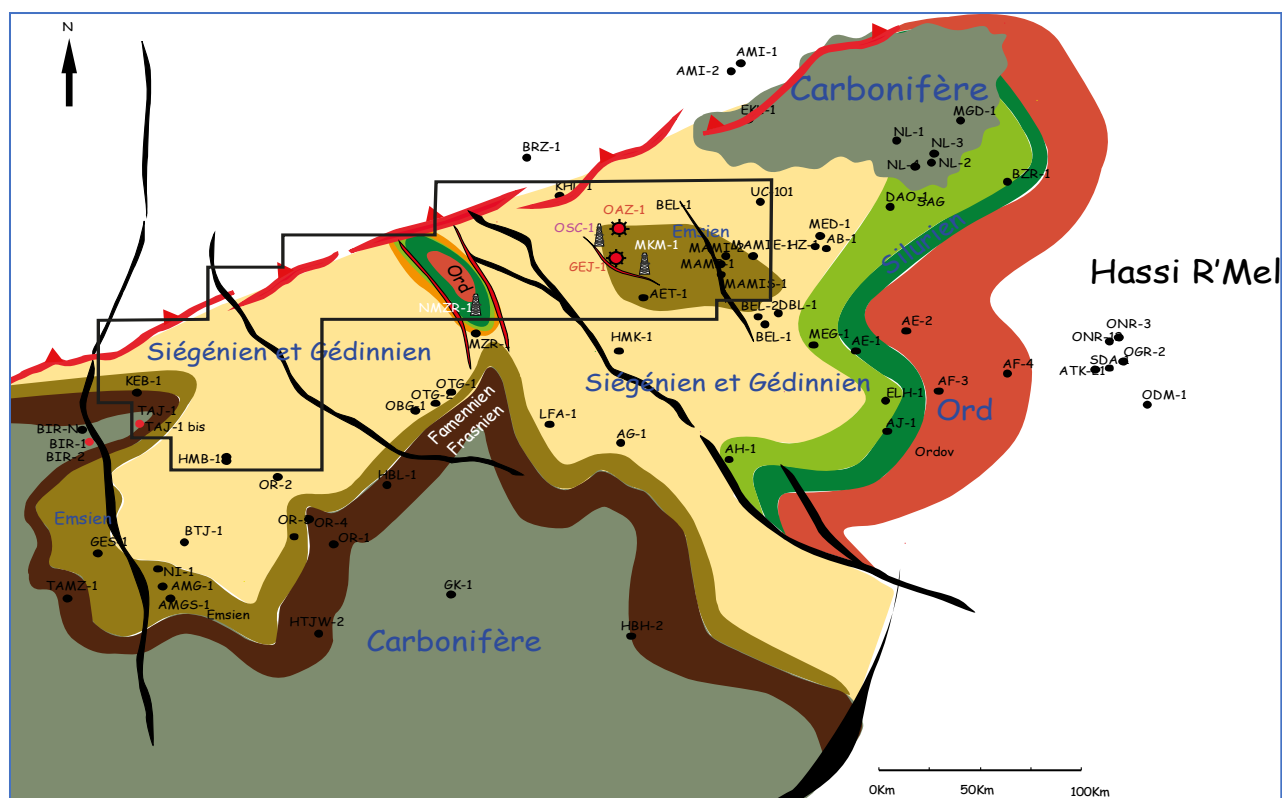
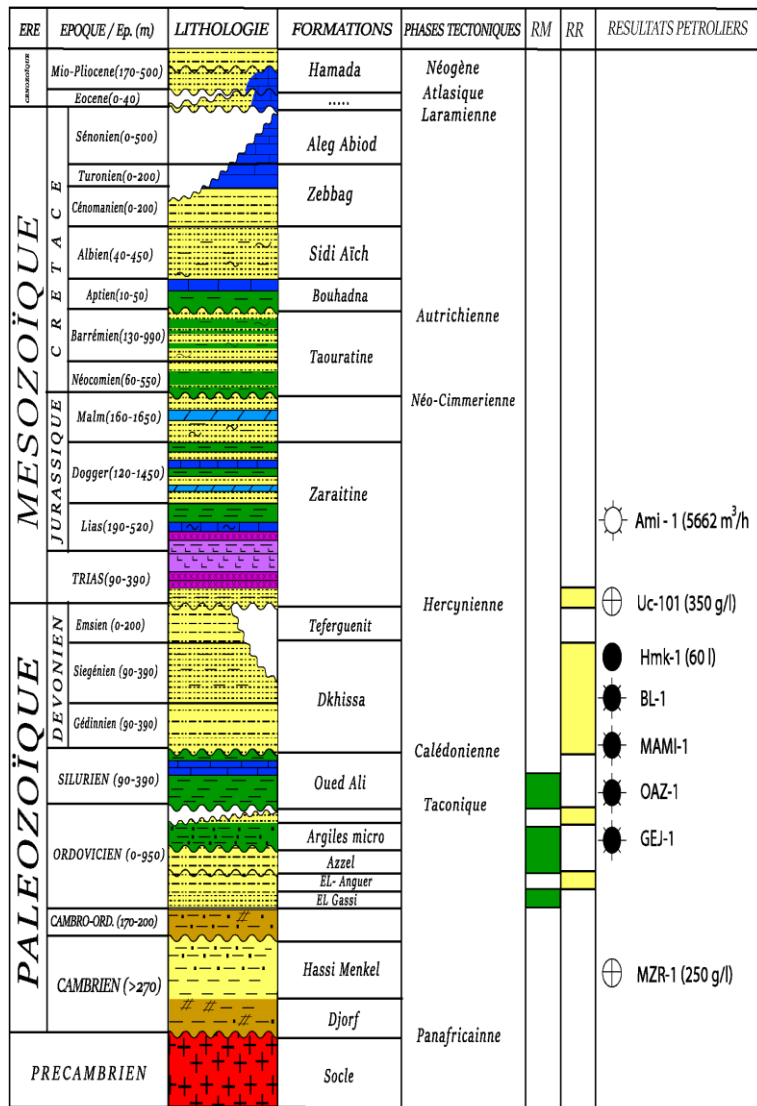


Figure IV.5 Carte de situation géologique du périmètre EL OUABED el bayedh (ENAGEO,2021)

IV.4.3. Colonne litho-stratigraphique type du Périmètre EL OUABED



LEGENDE :

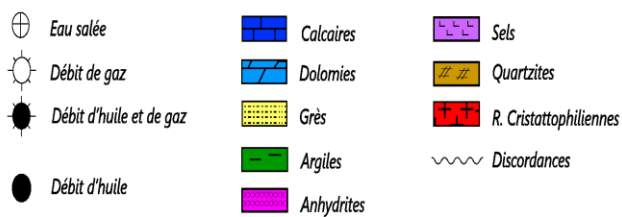


Figure IV.6 colonne litho- stratigraphique type du périmètre EL OUABED (ENAGEO, 2021)

Chapitre 05

Application de la tomographie des temps des premières arrivées sur des données réelles

V.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons appliquer les corrections statiques issues de la tomographie sur les données d'une étude 3D (2021-2022) située dans la région d'El BAYEDH (le bassin de EL OUABED) .

L'application a été effectuée à l'Entreprise National de Géophysique (ENAGEO) à Boumerdes, sur le logiciel GEOSTAR. En utilisant la station de traitement sismique Geovation.

Le but de notre travail est de déterminer des informations sur les structures correspondant aux couches superficielles. Ces informations sont des modèles de type vitesse-profondeur. Cette zone altérée de subsurface est souvent non consolidée. Elle est caractérisée par des couches à faible vitesse qui peuvent engendrer des retards en temps des ondes sismiques. Ceci peut conduire à la dégradation de l'image sismique à cause des problèmes des corrections statiques, alors c'est très important de créer un modèle de vitesse de la subsurface le plus précis que possible.

Après la construction de modèle, les corrections statiques sont calculées et appliquées sur les données de sismique réflexion pendant la première phase du traitement sismique.

Pour ce faire, nous avons suivi la méthodologie de l'inversion tomographique que l'on résume par les étapes suivantes :

- Pointer des temps des premières arrivées.
- Construction d'un modèle initial (profondeur-vitesse) obtenu par l'interprétation des temps observés avec insertion des points de contrôle. Choisis sur le pointé des arrivées premières (First Break).
- Paramétrisation du modèle initial par discrétisation en utilisant des cellules a trois dimension (x, y, z).
- Calcul des temps théorique du trajet des premières arrivées sur le modèle initial par la résolution de l'équation d'Eikonal par les différences finies pour chaque couple émetteur récepteur. – Calcul du temps résiduel qui représente la différence entre les temps théoriques et les temps observés. – Mise à jour des paramètres (les vitesses) du modèle initial.

V.2 Paramètres d'acquisition

Nous avons utilisé les données de deux modèles réfraction que nous noterons modèle 1 « XL5000 » orienté NE-SW et modèle 2 « IL4384 » orienté NW-SE (2020-2021) (figure : (V.32) et (V.33)).

Template information	
Number of reciver lines in template	28
Number of recivers per line	324
Number of reciver in template	9072
Number of shots in salvo	12
In line template roll (m)	150
Cross line template roll	300
Station information	
Total reciver lines	245
Max recivers per line	2289
Reciver line interval (m)	300
Reciver interval (m)	25
Reciver line orientation	160°
Station dansity (st/sq.km)	133.33
Live stations	333702
Total length (km)	8336.43
Source information	
Total source lines	416
Source line interval (m)	150
Source interval (m)	25
Source line orientation	70°
Source dansity (shots/sq.km)	266.67
Live shots	667401
Fired shots	667401
Total length (km)	16674.83

V.3 DISPOSITIF D'ACQUISITION DE LA ZONE D'ETUDE

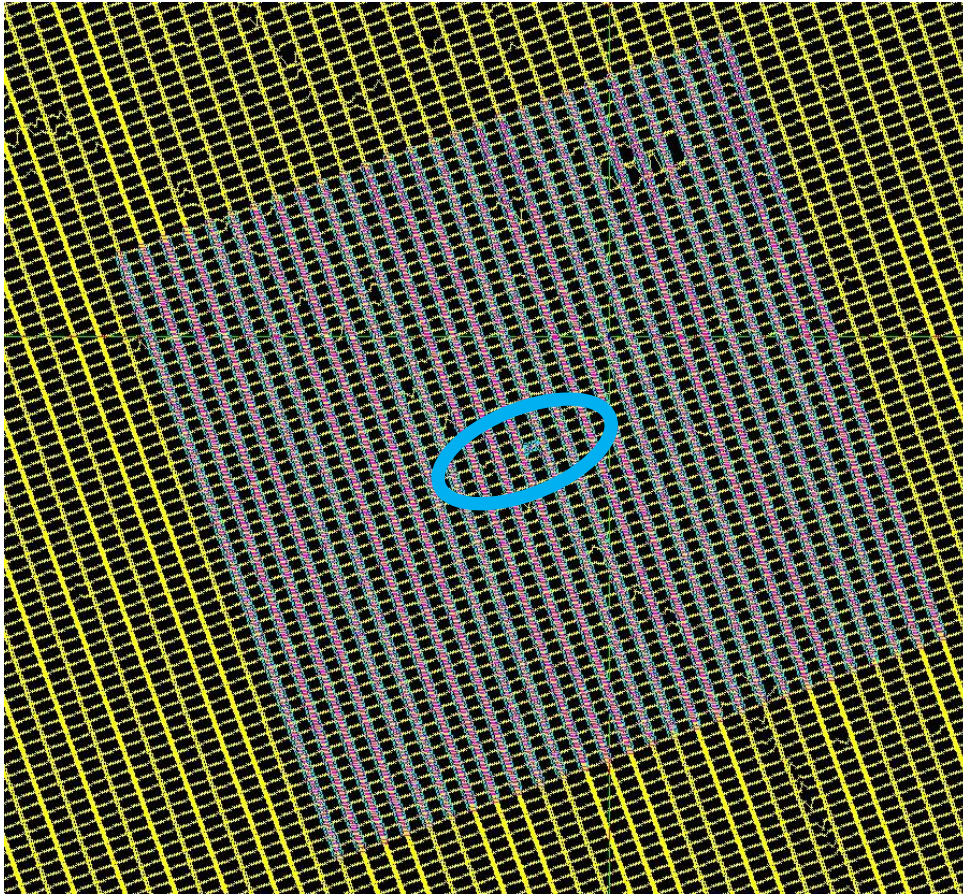


Figure V.1 dispositif d'acquisition (ENAGEO 2021)

V.4 Schéma descriptif des paramètres d'acquisition :

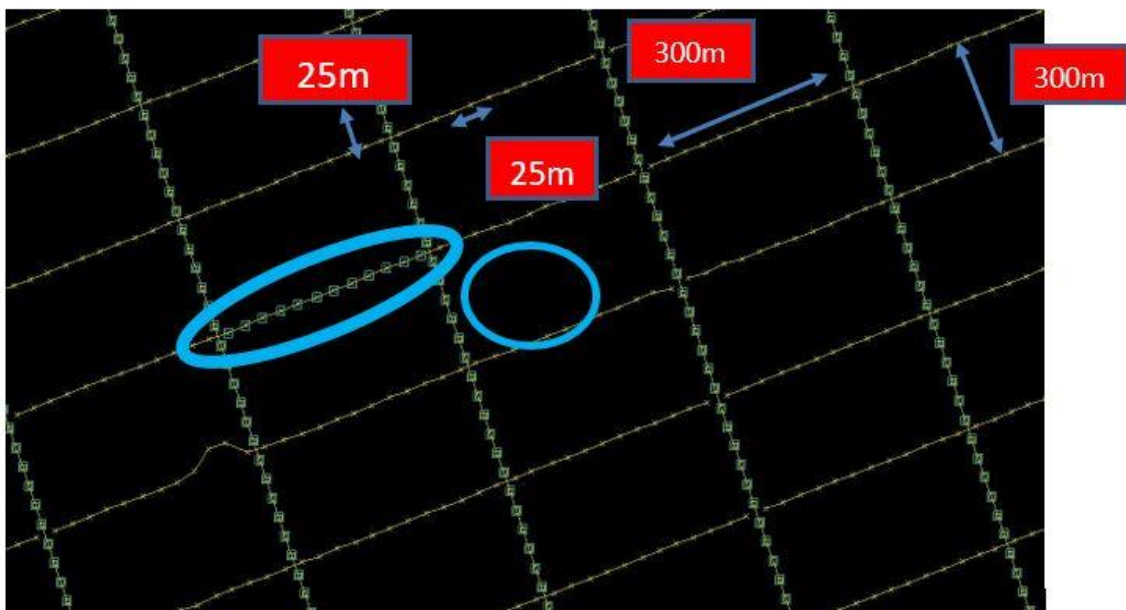


Figure V.2 Schéma descriptif des paramètres d'acquisition (ENAGEO 2021)

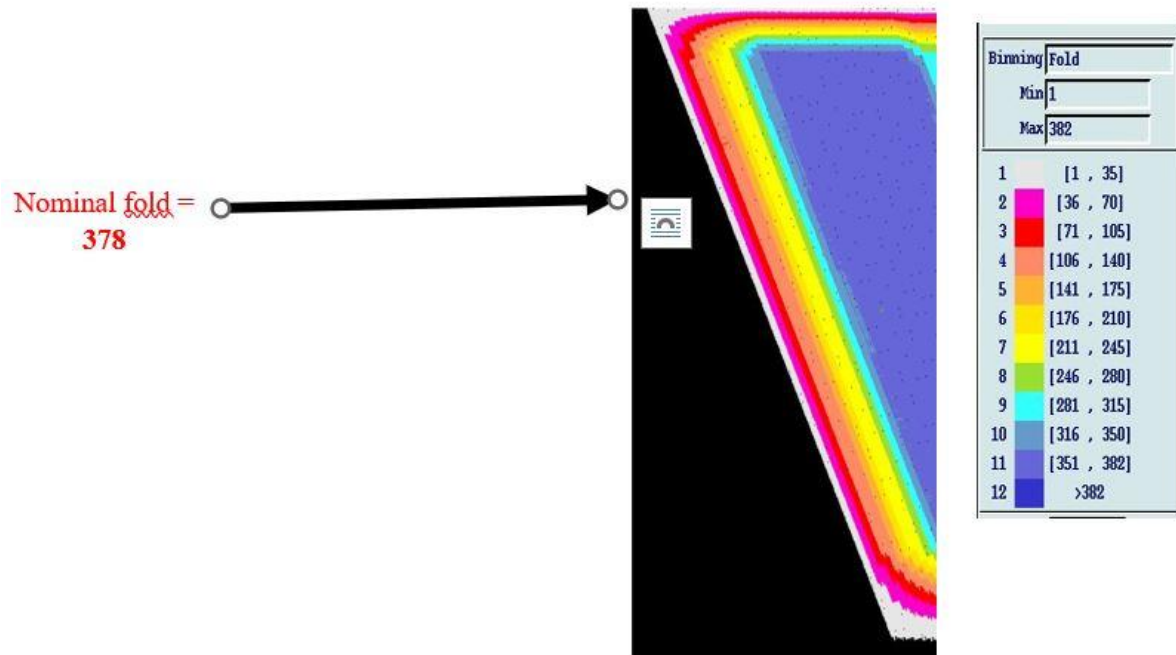


Figure V.3 Distribution de la couverture de l'étude (ENAGEO 2021)

V.5 Présentation de logiciel GEOSTAR

V.5.1 Description des fenêtres principale de Geostar

a) Présentation de MODULE GEOSTAR

Geostar est une application intégrée pour la modélisation des couches superficielle et la réfraction 3D. pour le calcul des corrections statiques il y'a plusieurs outils dans le Geostar, il construit et affine un modèle des couches altérées (WZ) et crée des corrections statiques en utilisant des paramètres d'acquisition et des informations des premières arrivées sismiques (first break).

Pour le lancement de l'application Geostar Cliquez une fois sur l'icône GEOSTAR pour lancer la session comme la figure suivante :

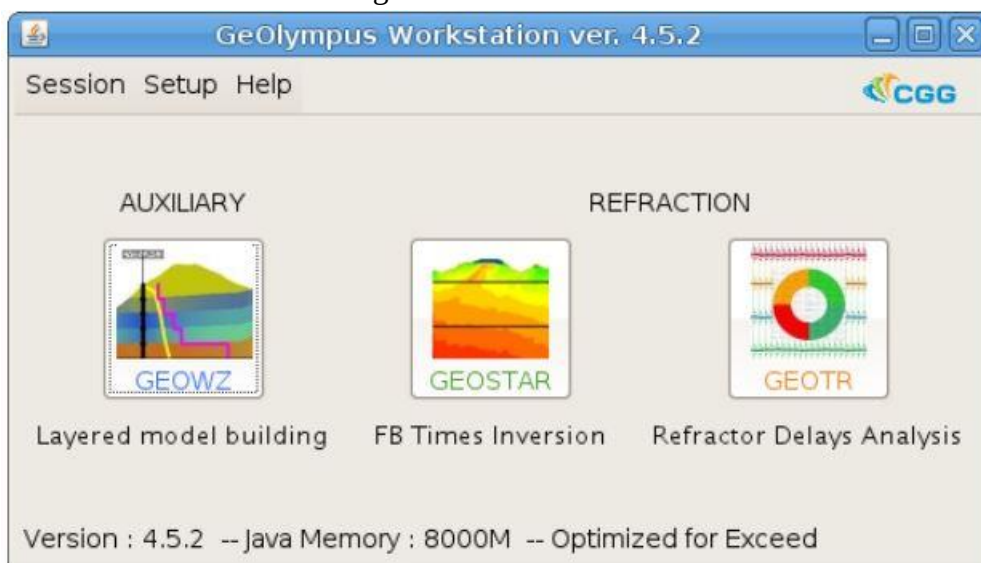
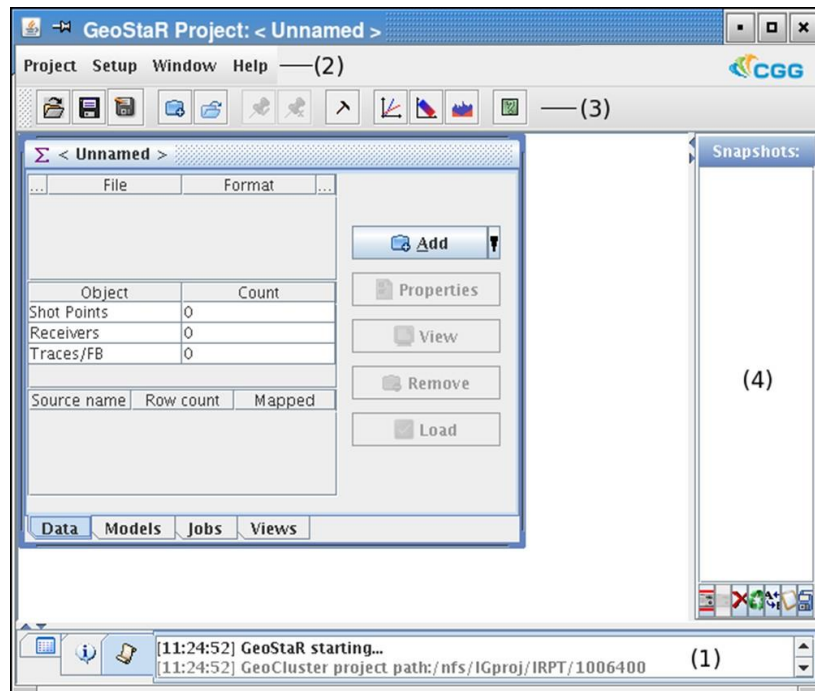


Figure V.4 Lancement de l'application Geostar (guide du geostar)

Une fenêtre d’affichage typique du Geostar est donnée par la figure (V-1)



FigureV.5 La fenêtre principale de Geostar (guide du geostar)

b) L'utilisation de L'application Geostar

Par L'application de Geostar on peut : (tutoriel et guide, Geostar, 2013, CGG)

- Effectuer un pointé (pick) interactive des premières arrivées en mode manuel, semi-automatique ou automatique et exporter les pointés (picks).
- Charger et exporter la géométrie et les temps des premiers pointé à partir des différents formats de données.
- Construire un modèle initial des couches de la WZ.
- Effectuer les mises à jour du modèle initial par inversion tomographique ou par l'inversion GLI.
- Exporter les modèles des vitesses et calculés les corrections statiques avec divers formats pour une utilisation ultérieure.

La figure (V.2) illustre les étapes suivies sur l'application Geostar pour le calcul des corrections statiques par l'inversion tomographique.

Voici un aperçu du flux de travail Geostar décrit dans ce chapitre

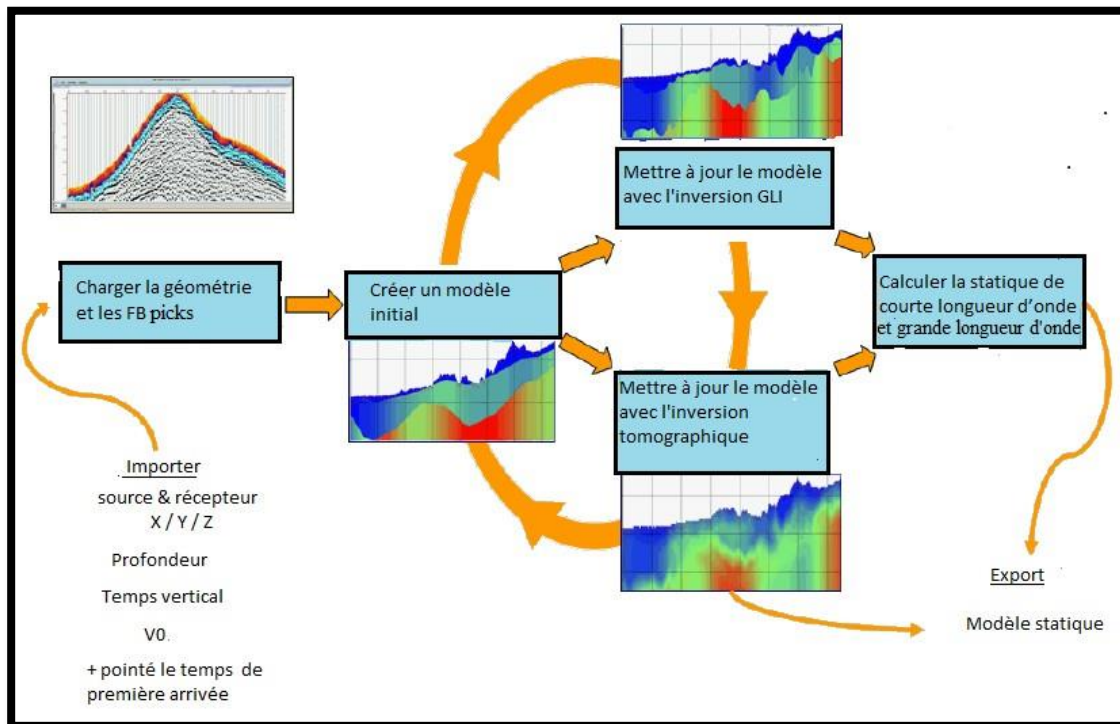


Figure V.6 Schéma Synthétique des étapes de l'application sur Geostar pour le calcul des corrections statiques (tutoriel et guide, Geostar, 2013, CGG)

V.6 Application des corrections statiques :

Nous avons appliqué ces corrections statiques avec un DP de 700 m et une vitesse de comblement de 2200 m/s, des modèles ont été réalisés et différentes solutions de statiques sont testées :

- Solution Altimétrique.
- Solution CVT interpolés (Hwz et Vwz).
- Solution GLI (Generalized Linear Inversion).
- Solution TOMO

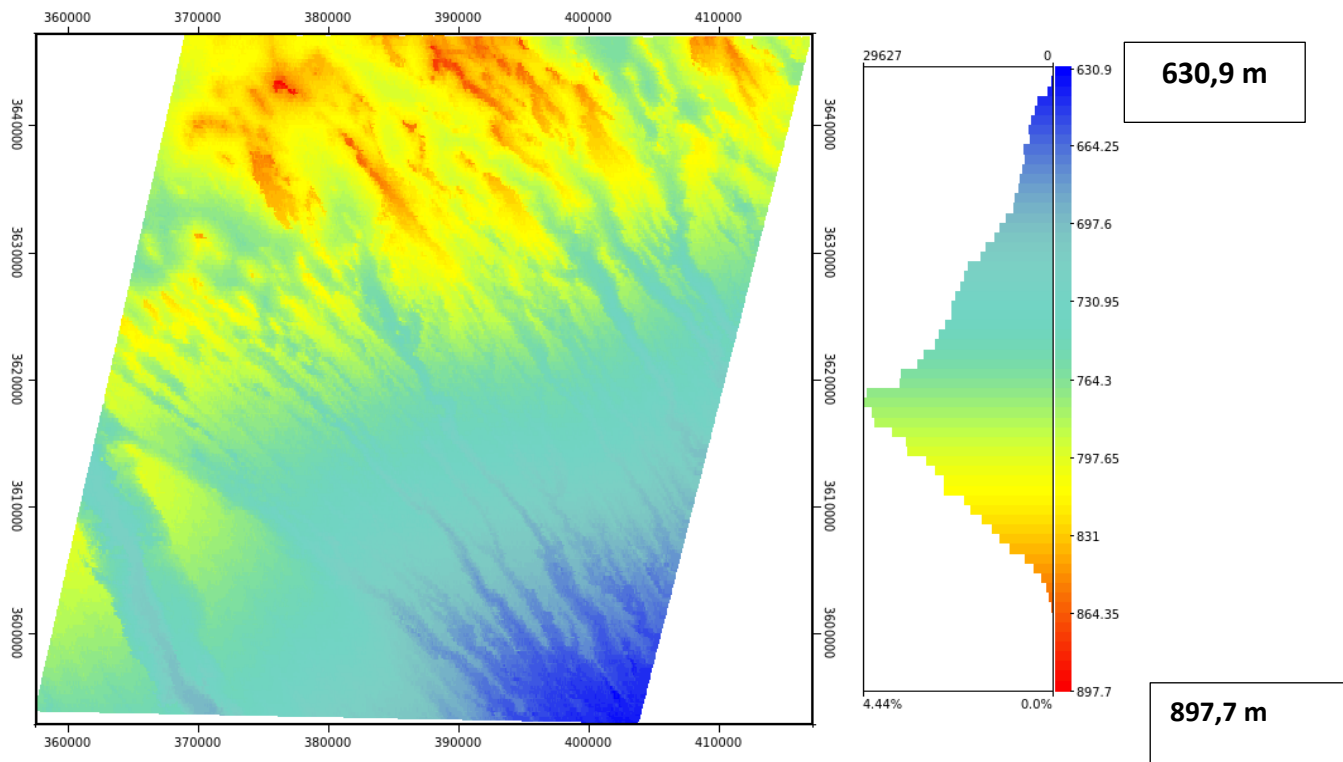
La même gamme d'offset a été pointée sur toute l'étude :

- Datum plan : DP = 700m
- Vitesse de comblement : $V_c = 2200$ m/s

V.7 Etapes d'applications de la méthode tomographique sur les données réelles :

Dans ce chapitre nous appliquons la tomographie sur des enregistrements d'une étude sismique 3D dans le bassin de El Ouabed (2020-2021).

- **La carte d'élévation et carte de distributions des CVT's :**



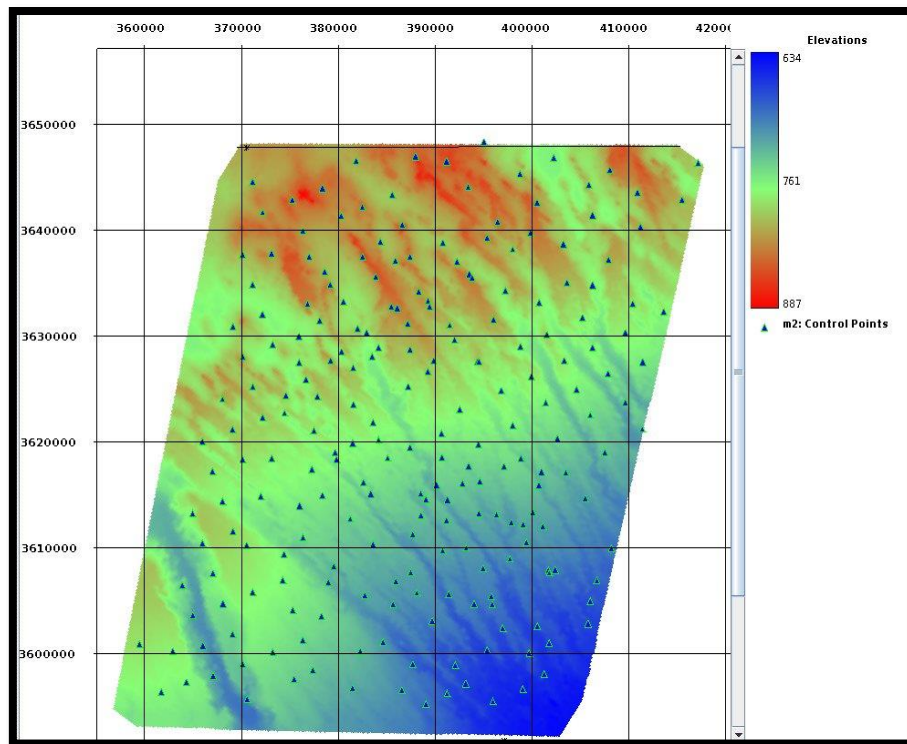


Figure V.8 Distribution des CVT's

- **Cartes de vitesse (WZ)**

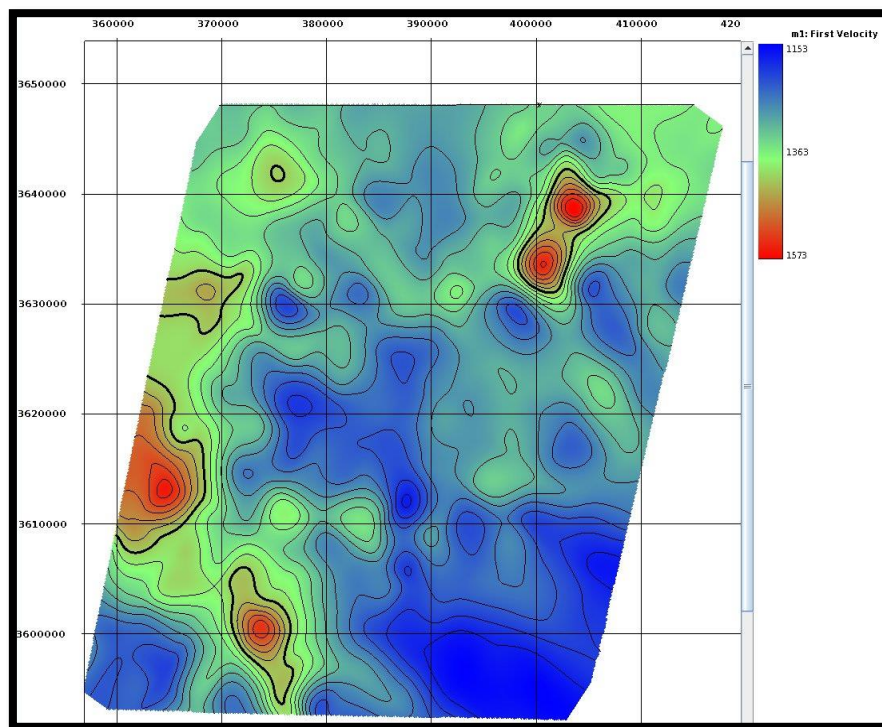


Figure V.9 Carte de vitesse de la WZ en CVT

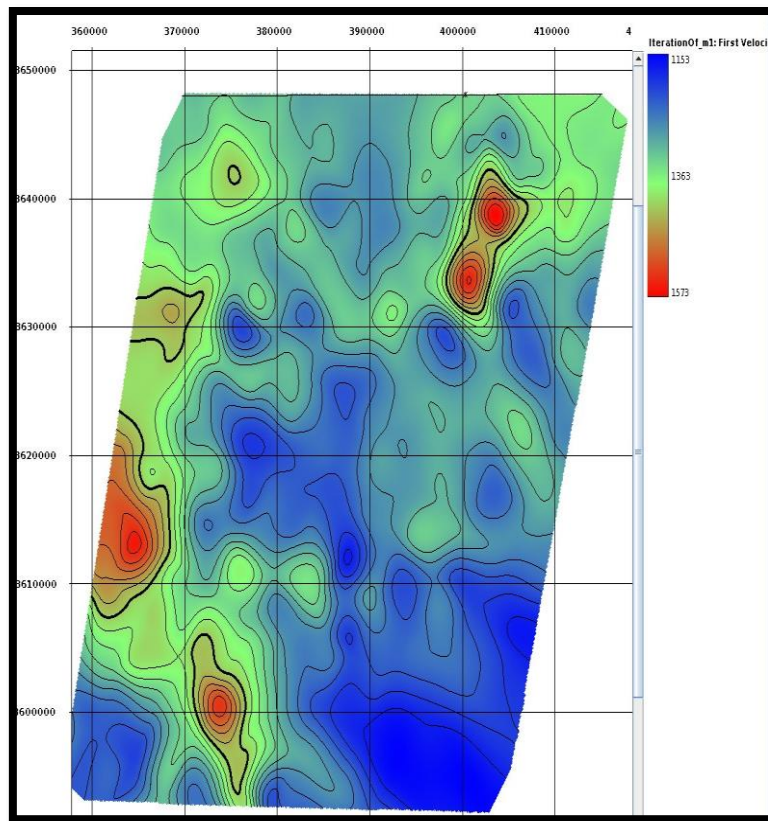


Figure V.10 Carte de vitesse de la WZ en GLI (offset 600 – 1600)

- **Cartes de vitesse du milieu rapide**

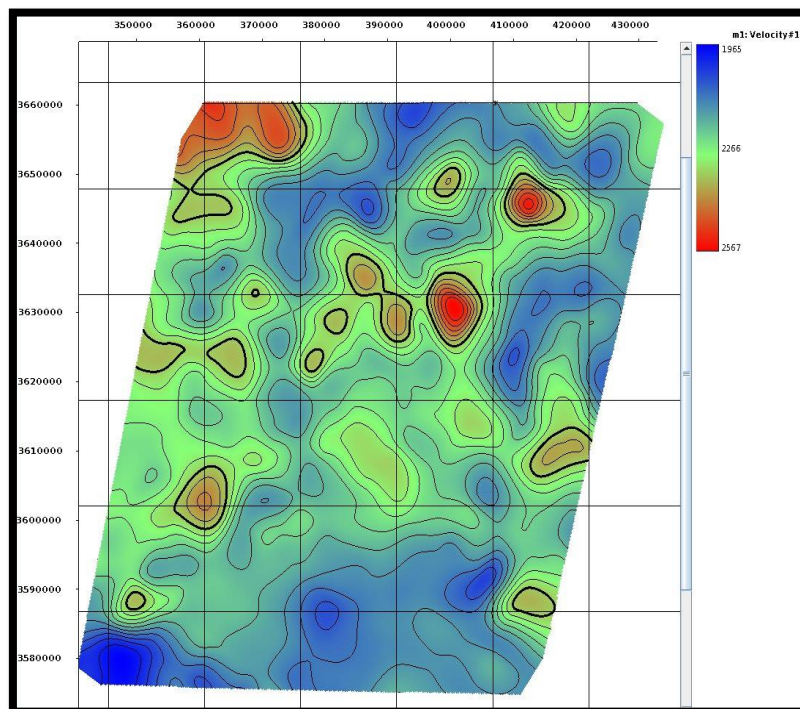


Figure V.11 Carte de vitesse du milieu rapide en CVT

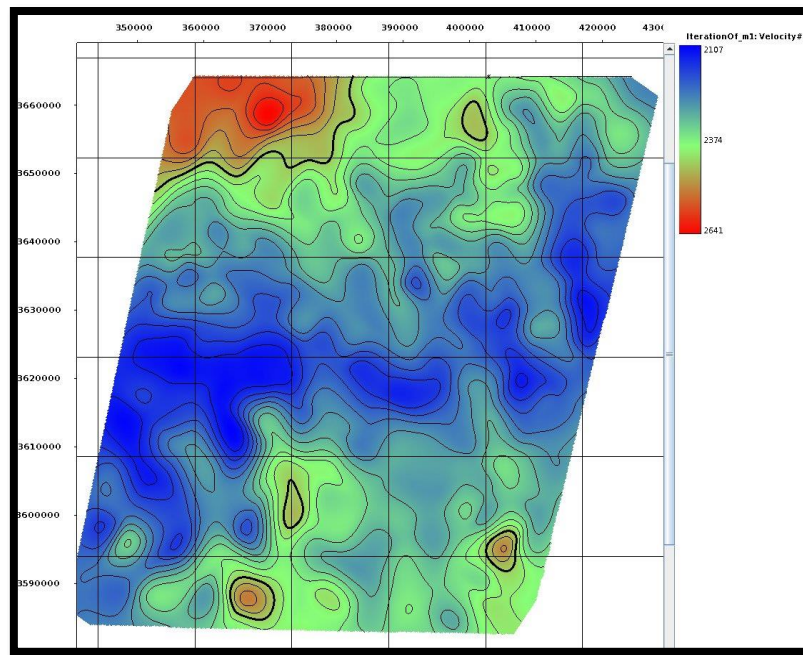


Figure V.12 Carte de vitesse du milieu rapide en GLI (offset 600-1600)

- **Cartes d'épaisseurs (WZ)**

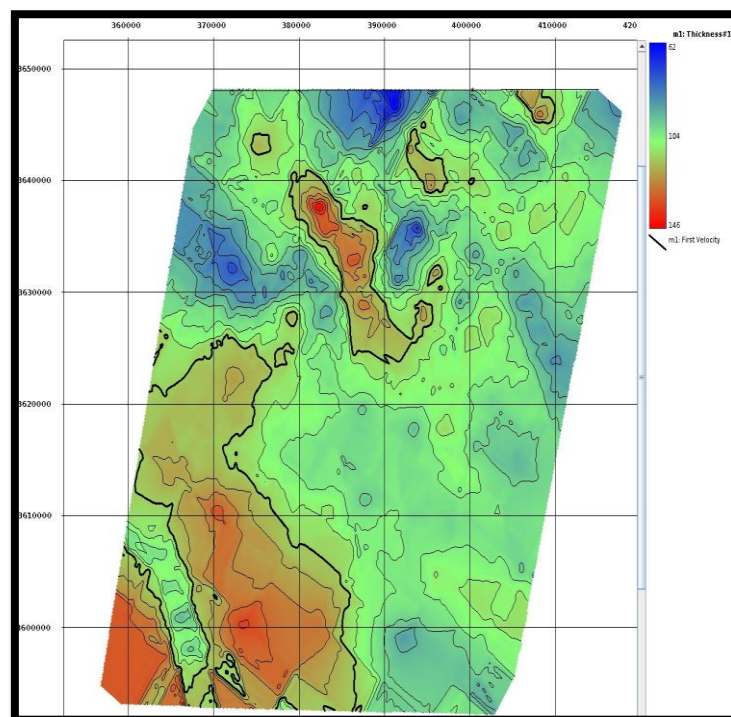


Figure V.13 Carte d'épaisseur en CVT

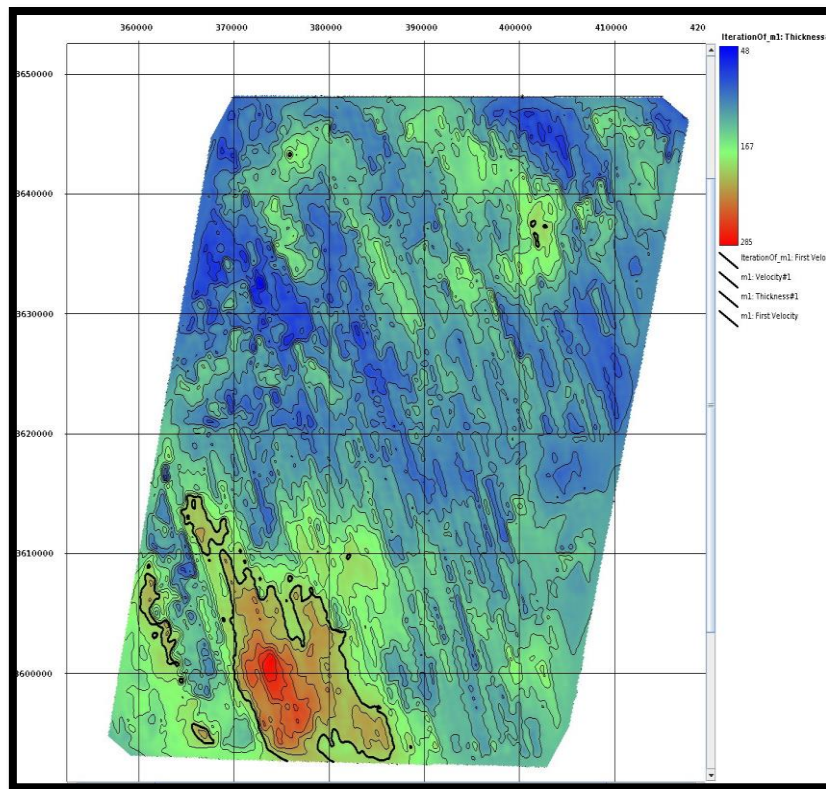


Figure V.14 Carte d'épaisseur en GLI (offset 600 – 1600)

V.7.1 Pointer des premières arrivées :

Les premières arrivées représentent l'énergie réfléchie se propageant dans la subsurface le long du chemin le plus rapide avant d'arriver à la surface. Le pointé de leurs temps d'arrivée dépend essentiellement de l'utilisateur et nécessite un bon rapport signal sur bruits. Cette phase est souvent la phase la plus délicate et la plus long car elle nécessite un contrôle de qualité particulièrement sévère. Dans le cadre de ce travail nous utilisons un outil de pointé semi-automatique appelé FB Pick. Ces temps sont représentés dans figures (V.15 et V16), où l'axe vertical représente le temps en (ms) et l'axe horizontal représente le nombre des traces.

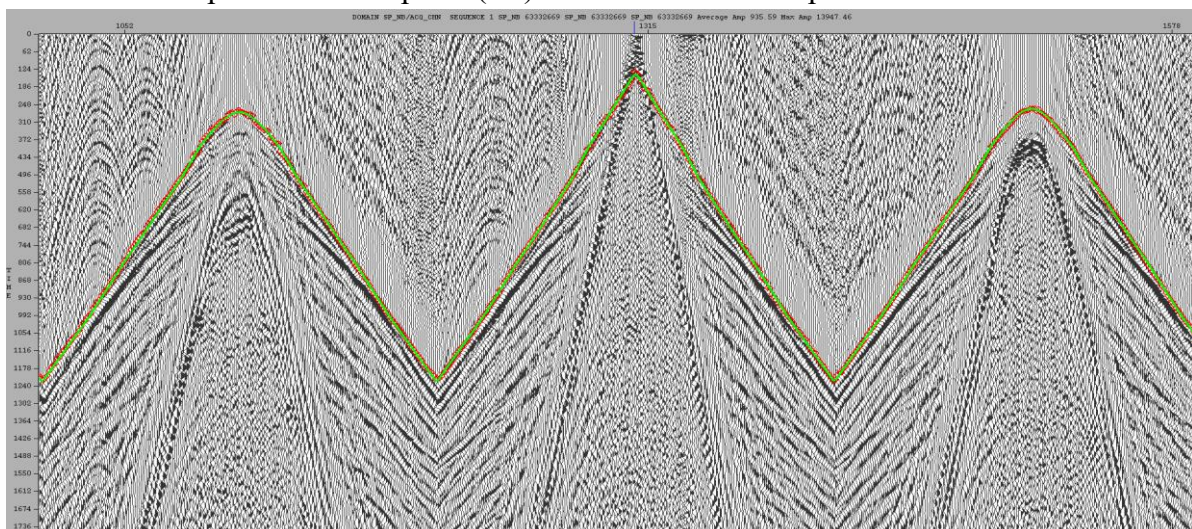


Figure V.15 Enregistrement montrant le pointé de premières arrivées réalisées sur l'application FB Pick

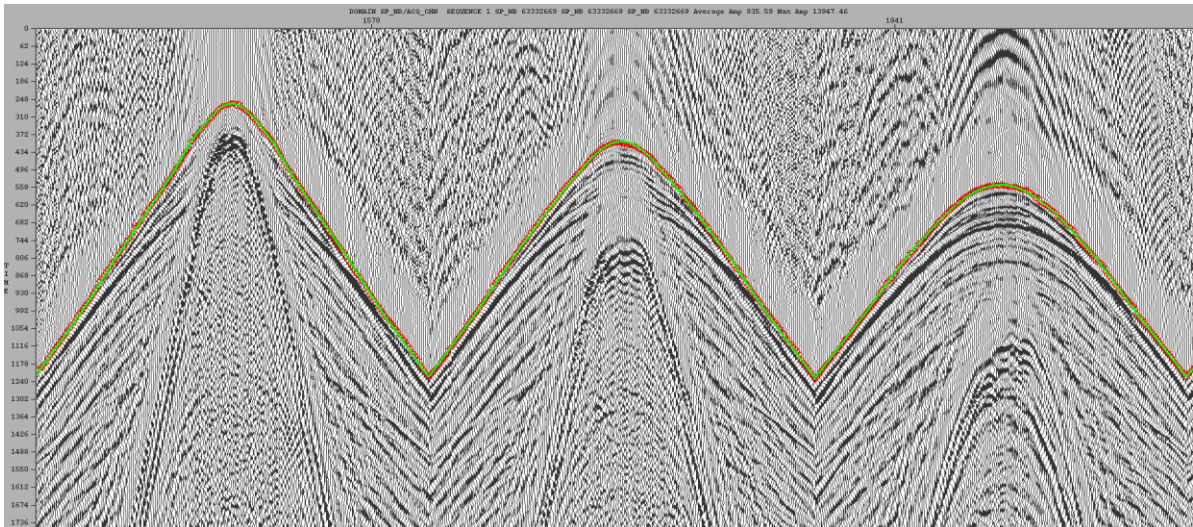


Figure V.16 Enregistrement montrant le pointé de premières arrivées réalisées sur l'application FB Pick

V.7.2 Construction du modèle initial de vitesses :

La solution du problème inverse n'est pas unique dans les problèmes complexes en géophysique. Etant donné que le problème direct est défini par une équation non linéaire, en revanche, sa résolution est souvent faite par un procédé d'inversion linéaire. Donc, nous ne pouvons jamais affirmer que la solution obtenue représente vraiment le minimum absolu de la fonction objective. Pour cette raison, le modèle initial estimé peut avoir une influence capitale sur la solution finale. Dans le cadre de cette application, nous avons construit un modèle initial de vitesses pour la prédiction des premières arrivées par l'algorithme de tracé de rayons sur Geostar. Ce modèle est inspiré d'une simple interprétation des premières arrivées observées en utilisant des points de contrôle (figure (V-17)).

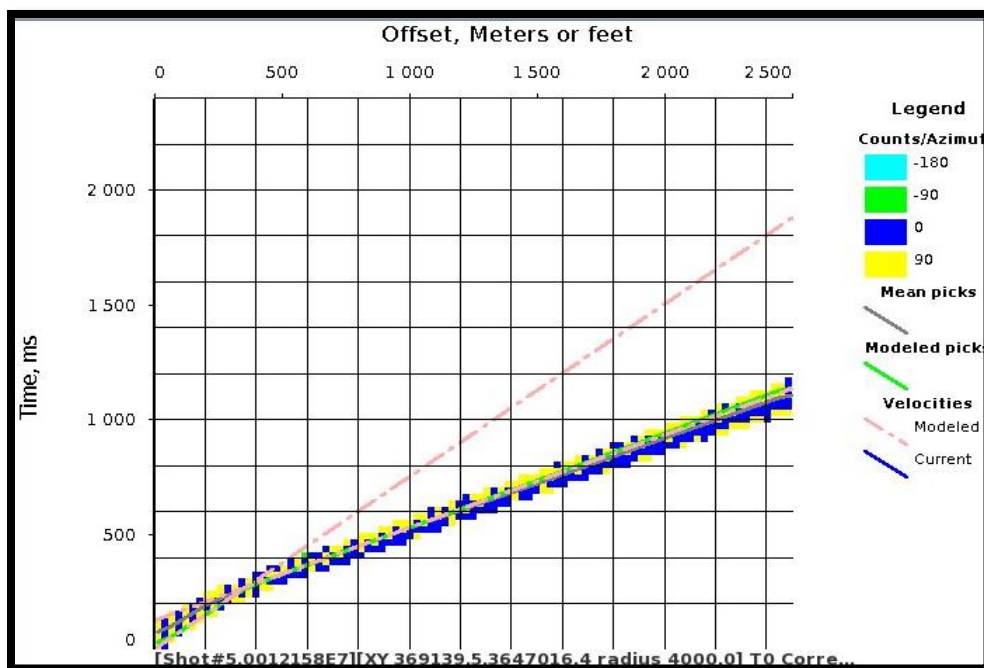


Figure V.17 Schéma des points de contrôles

Les paramètres utilisés dans le modèle initial sont :

- Données obtenues par l'interprétation des premières arrivées observées. .
- Altitude du Datum plan : 700m.
- Choix de la méthode d'interpolation, on cite deux cas : Smooth thickness et Smooth élévation, on parle dans notre projet à propos smooth élévation :

Smooth élévation :

dans ce cas on aura un lissage entre les différentes limites (base de la WZ) de couche obtenues par les points de contrôle .

- Fixer une vitesse de comblement ($V_c = 2200$ m/s).
- Nombre de couche de la WZ : 2 couches.

Les planches suivantes représentent un modèle initial de vitesses à 2 couches
Nord/Est

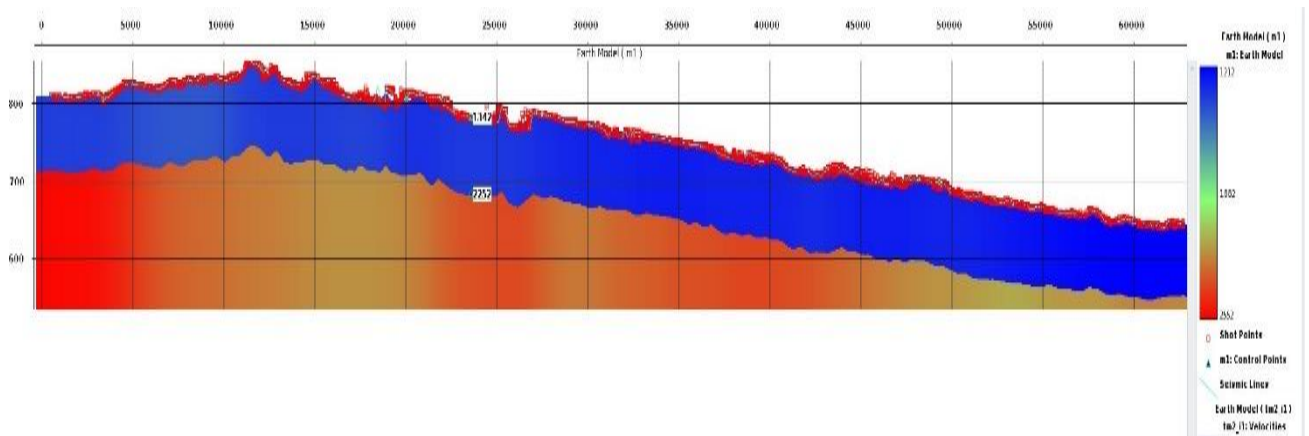


Figure V.18 modèle initial de vitesses nord / est

Nord/Ouest

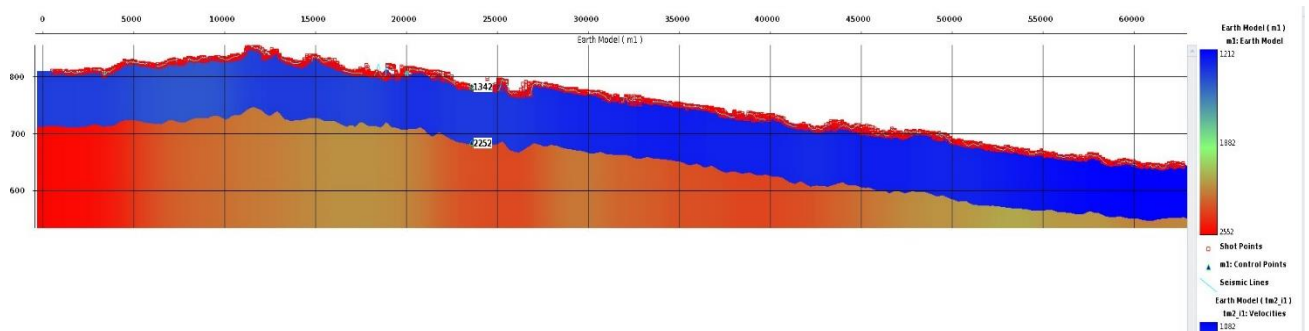


Figure V.19 modèle initial de vitesses nord / ouest

V.7.3 Inversion

L'inversion Tomographique est basée sur : le tracé des rayons, le calcul de temps de réfraction, la comparaison des temps calculés avec les temps observés et la minimisation de l'erreur afin d'obtenir une modélisation du modèle en cellule.

L'application Geostar calculera les temps d'arrivées premières sur la base de ce modèle et les comparera aux temps d'arrivées observés. L'application cherchera à minimiser la différence entre les temps d'arrivée observée et les temps calculés en variant le paramètre du modèle initial (la vitesse), ici maximum déviation de vitesse est 150m/s à la fin on aura un modèle final de vitesse. Pour lancer le programme d'inversion on doit importer deux fichiers dont l'un contient le pointer des premières arrivées, et l'autre contient les coordonnées x, y des sources et récepteurs avec l'altimétrie et un offset minimal.

Dans notre application nous avons effectué des tests d'inversion tomographique, au cours de chaque profil on fait varier les paramètres d'inversions (nombre d'itérations ou bien les dimensions des cellules ou bien la base du modèle).

Initial model	GLI (layered model)
Cell size	X=25, Y=25, Z=25
The model Base élévation	340m
Itérations	9
Offsets	600 m -1600 m

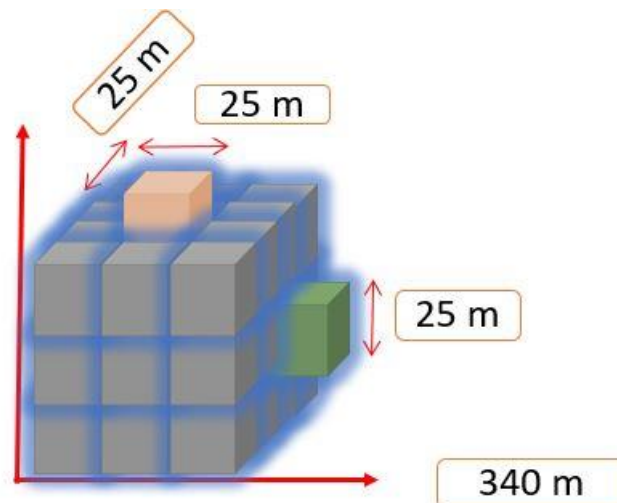
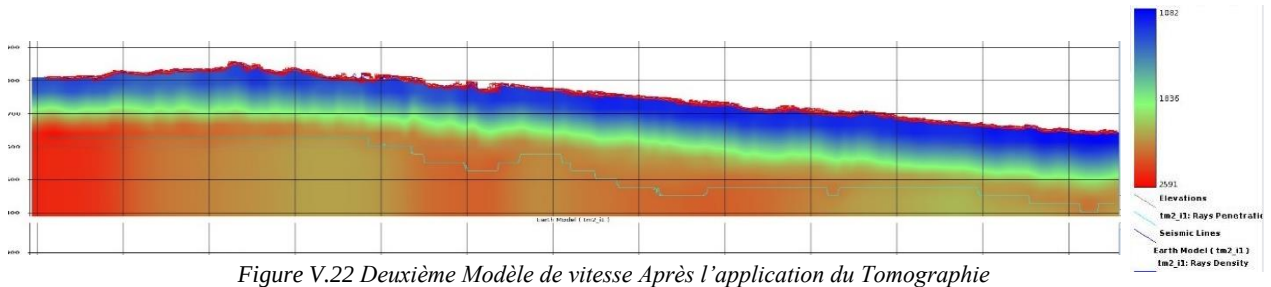
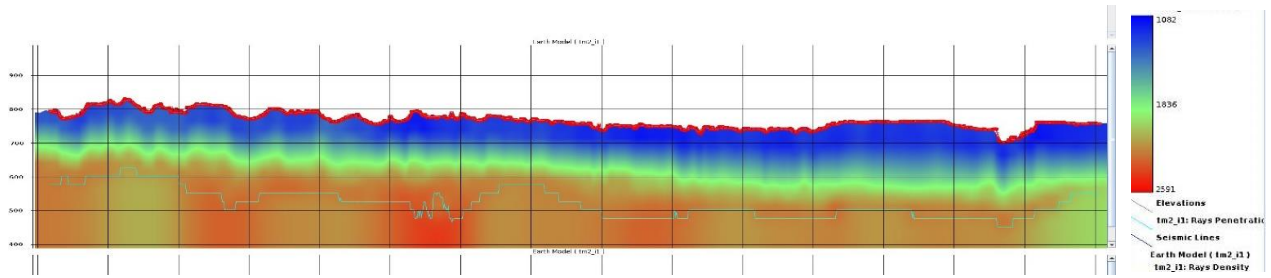


Figure V.20 modèle en cellule tomographie

Les planches suivantes représentent un modèle de vitesse après l'application de l'inversion sismique :



V.7.4 Contrôle de qualité :

Pour montrer la stabilité et la robustesse de la solution de l'inversion par la méthode tomographie, cette dernière exige un certain contrôle de qualité.

Les paramètres à contrôler sont :

- L'erreur moyenne ($T_{\text{calculé}} - T_{\text{obs}}$).
- La densité des rayons.

a) L'erreur moyenne :

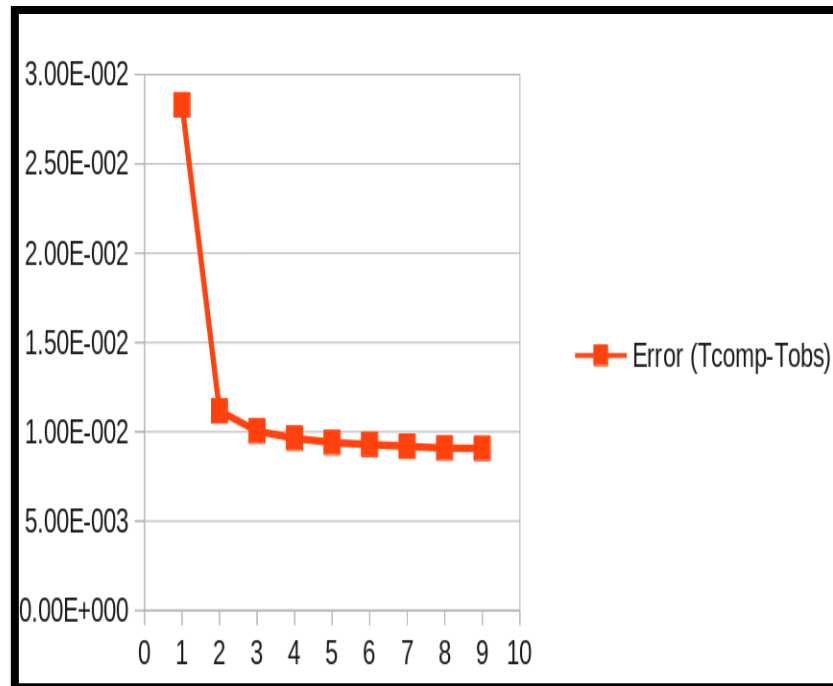


Figure V.23 Courbe de variation de l'erreur moyenne

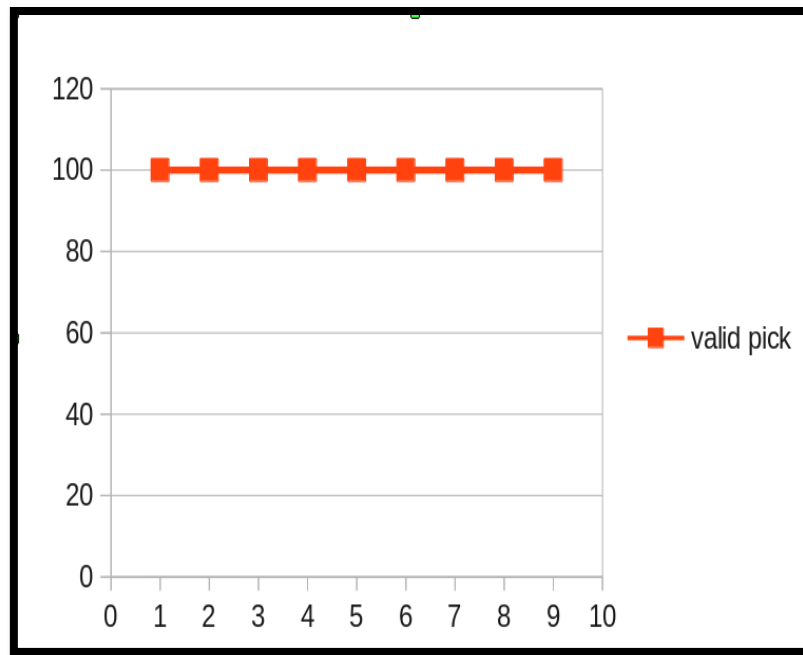


Figure V.24 Nombre de Pick valide

b) La densité des rayons :

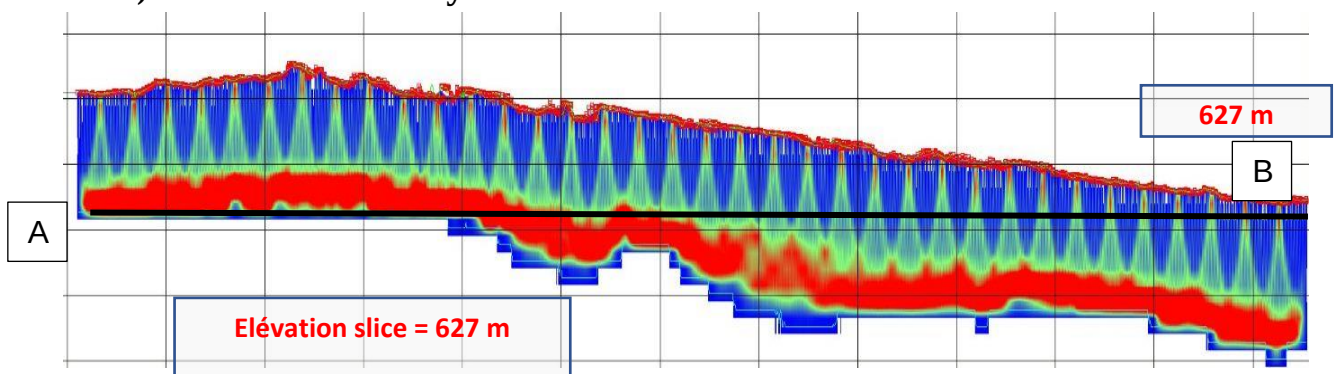


Figure V.25 modèle de densité des rayons

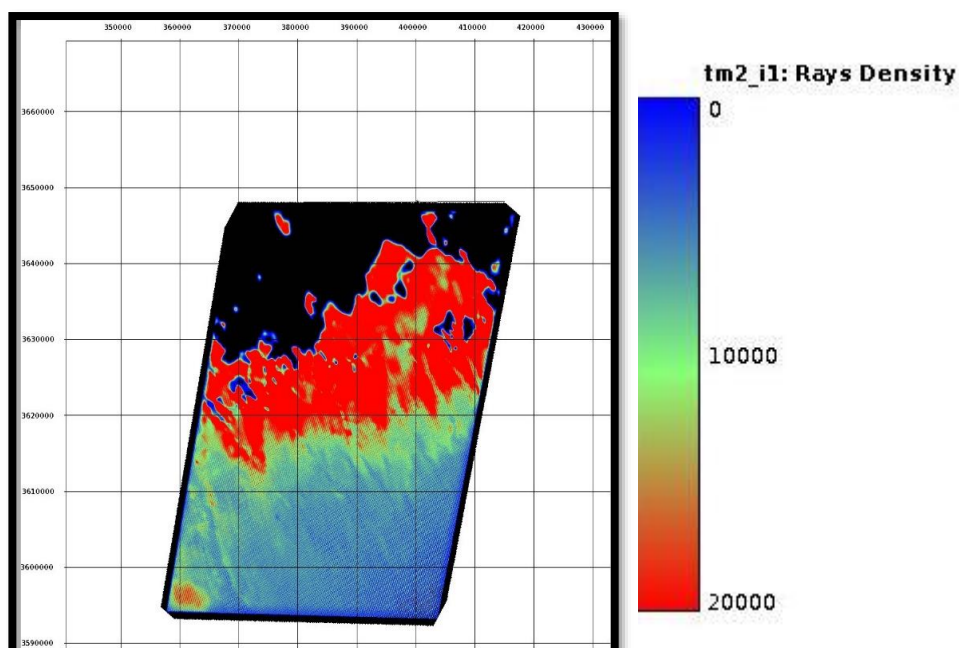


Figure V.26 carte de densité des rayons

Calcul des corrections statiques :

- Carte des statiques élévation**

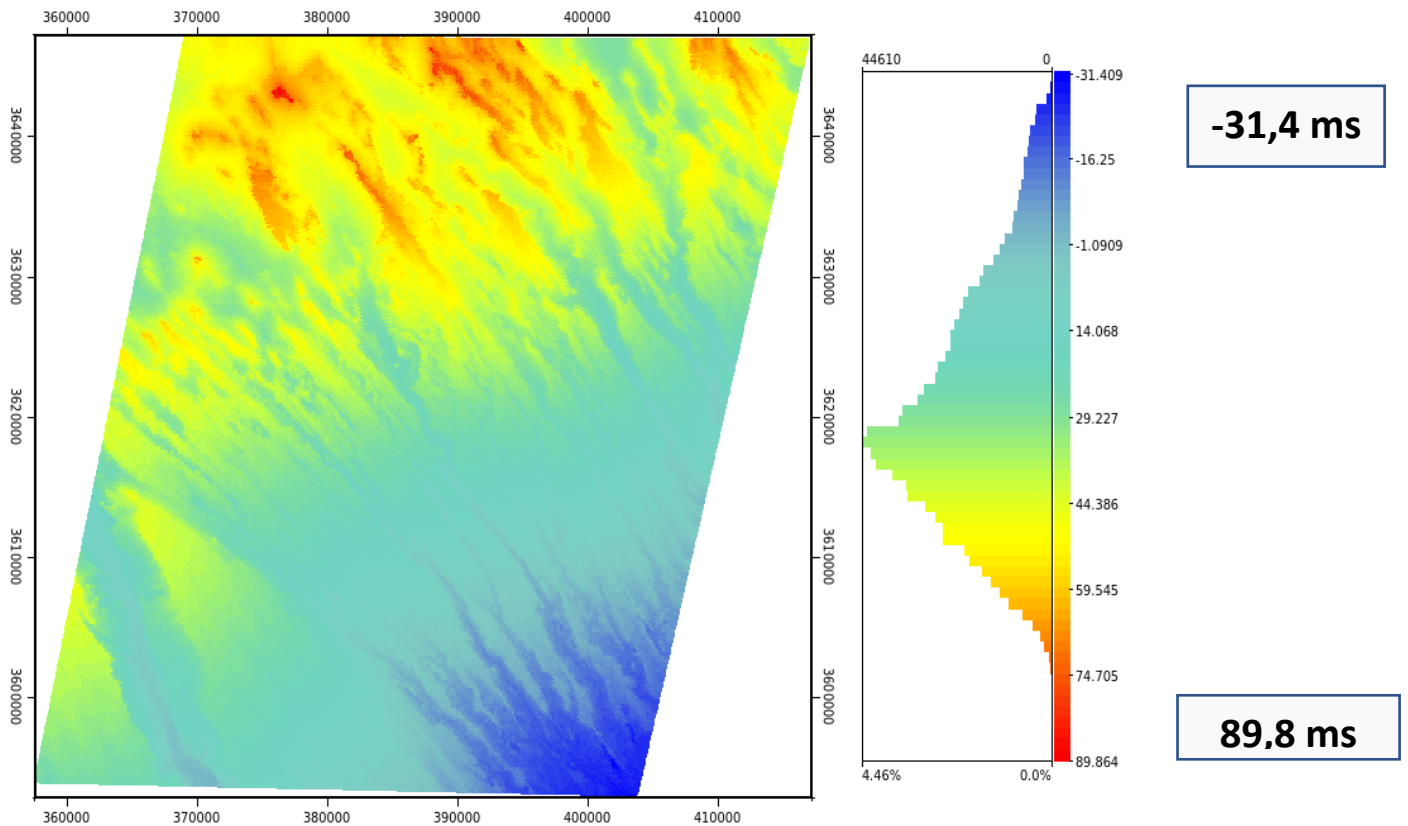


Figure V.27 carte des statiques d'élévation

- Carte des statiques a base des CVT's**

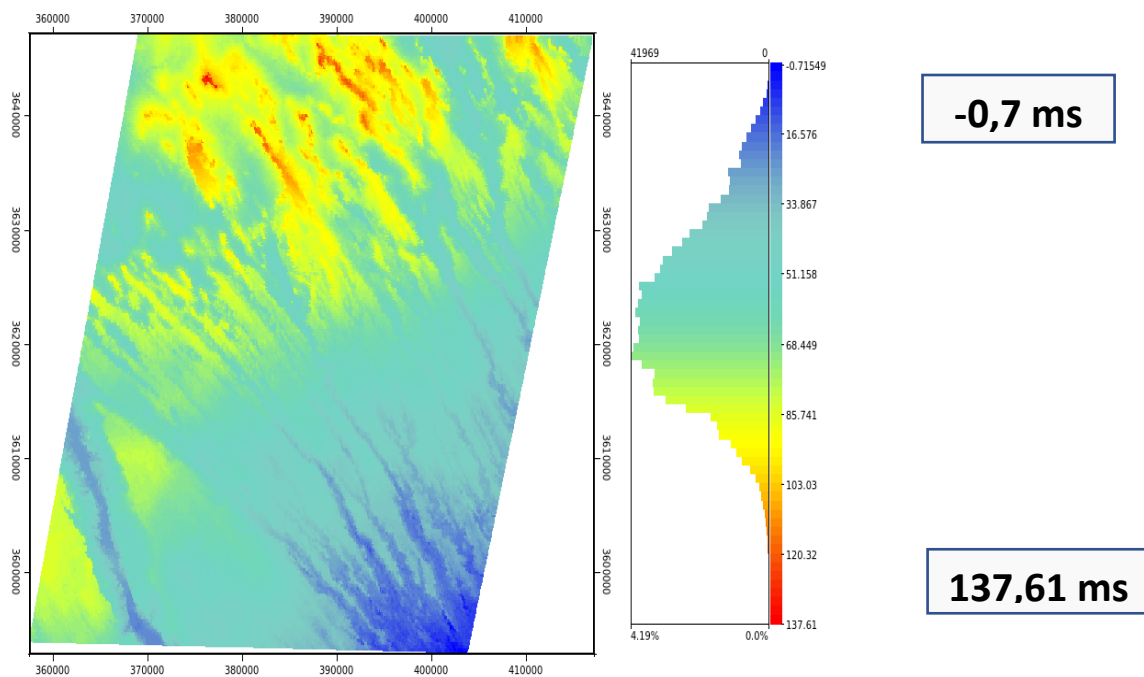


Figure V.28 carte des statiques à base des CVT's

- Carte des statiques a base du model GLI**

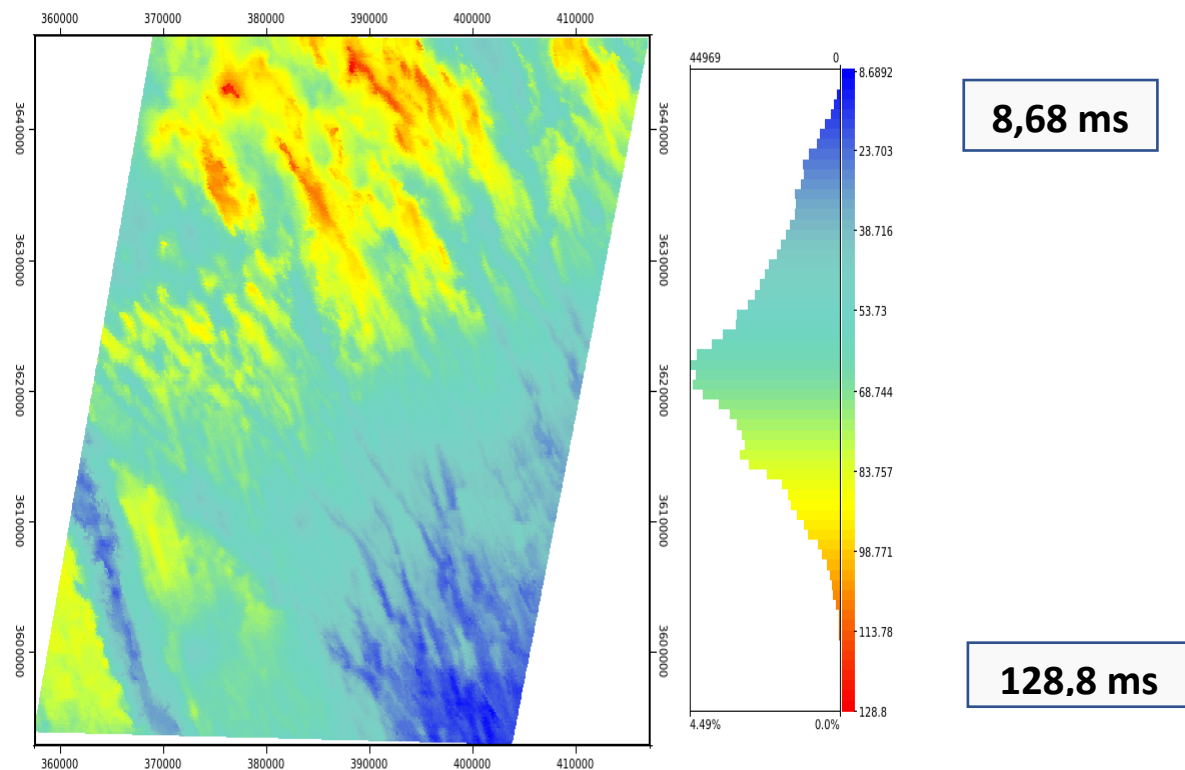


Figure V.29 carte des statiques a base du model GLI

- Carte des statiques a base du model TOMO (offsets 600-1600)**

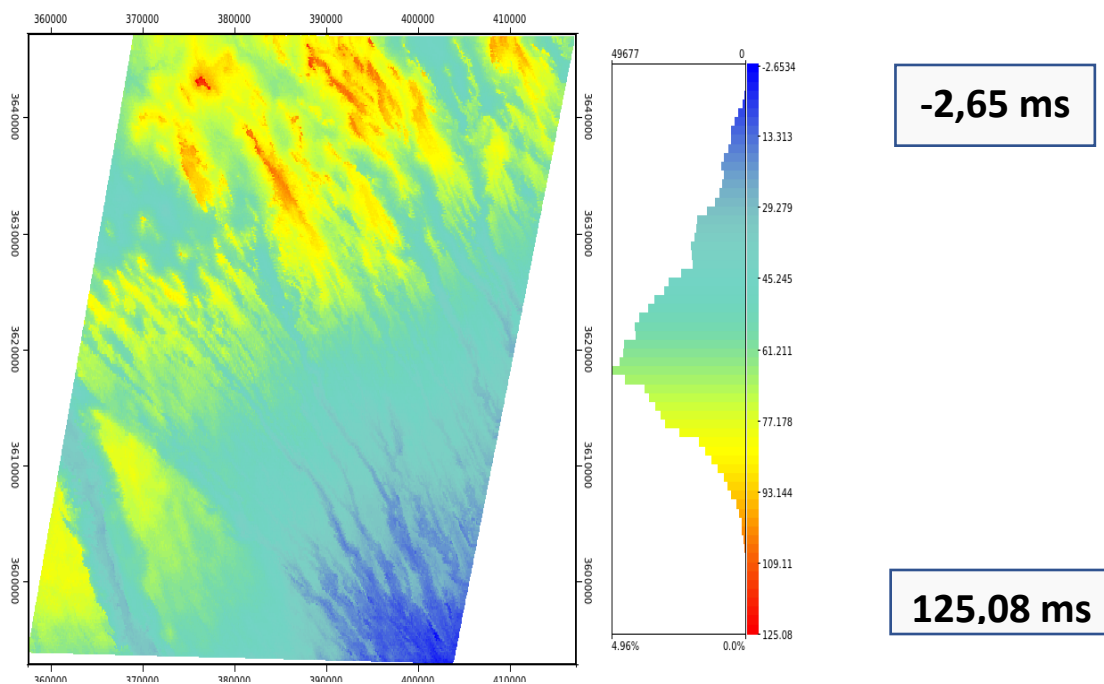


Figure V.30 carte des statiques à base du model TOMO (offset 600-1600)

- **Visualisation du data (INL, CRL)**

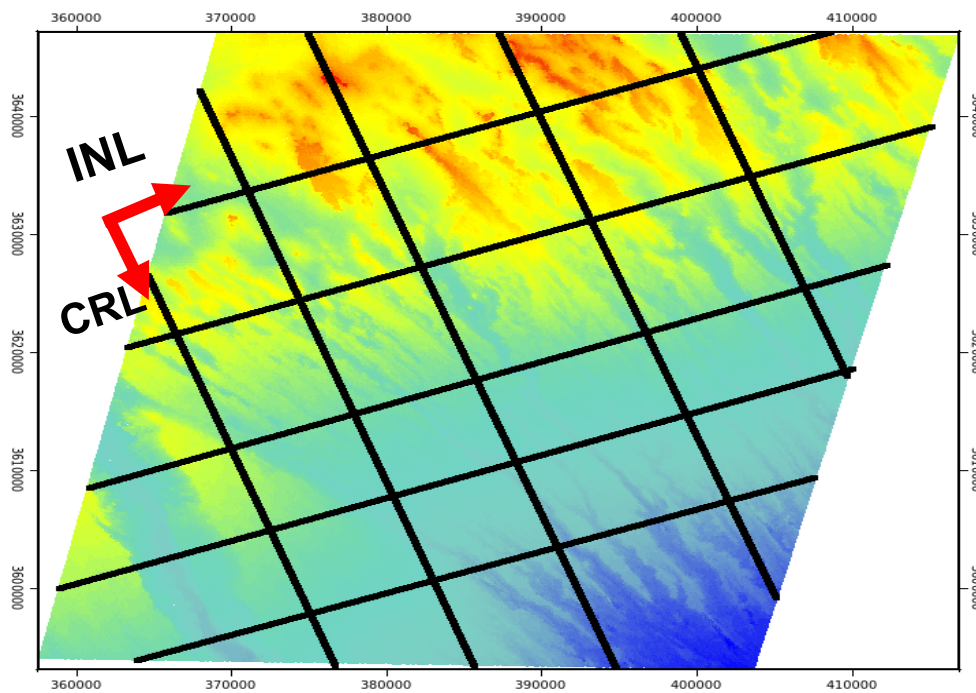


Figure V.31 Visualisation du data (INL, CRL)

Geostar calcule les corrections statiques sur les modèles finaux obtenus par l'inversion tomographique.

En analysant les courbes des corrections statiques.

V.7.5 Application des corrections statiques :

Nous avons appliqué les valeurs des courbes obtenues par les deux modèles, à partir des résultats de l'application de ces corrections statiques avec un DP de 700 m et une vitesse de comblement de 2200 m/s,

Ces deux figures représentent les cartes des deux profiles qu'on a fait la correction statique

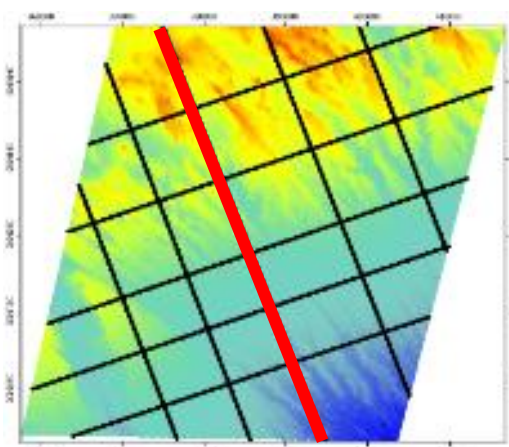


Figure V.32 modèle 01 : nord-ouest – sud est

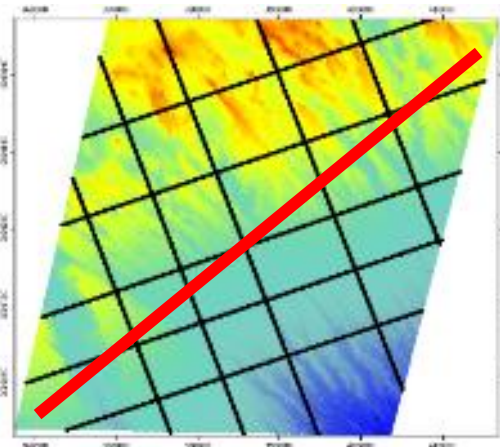
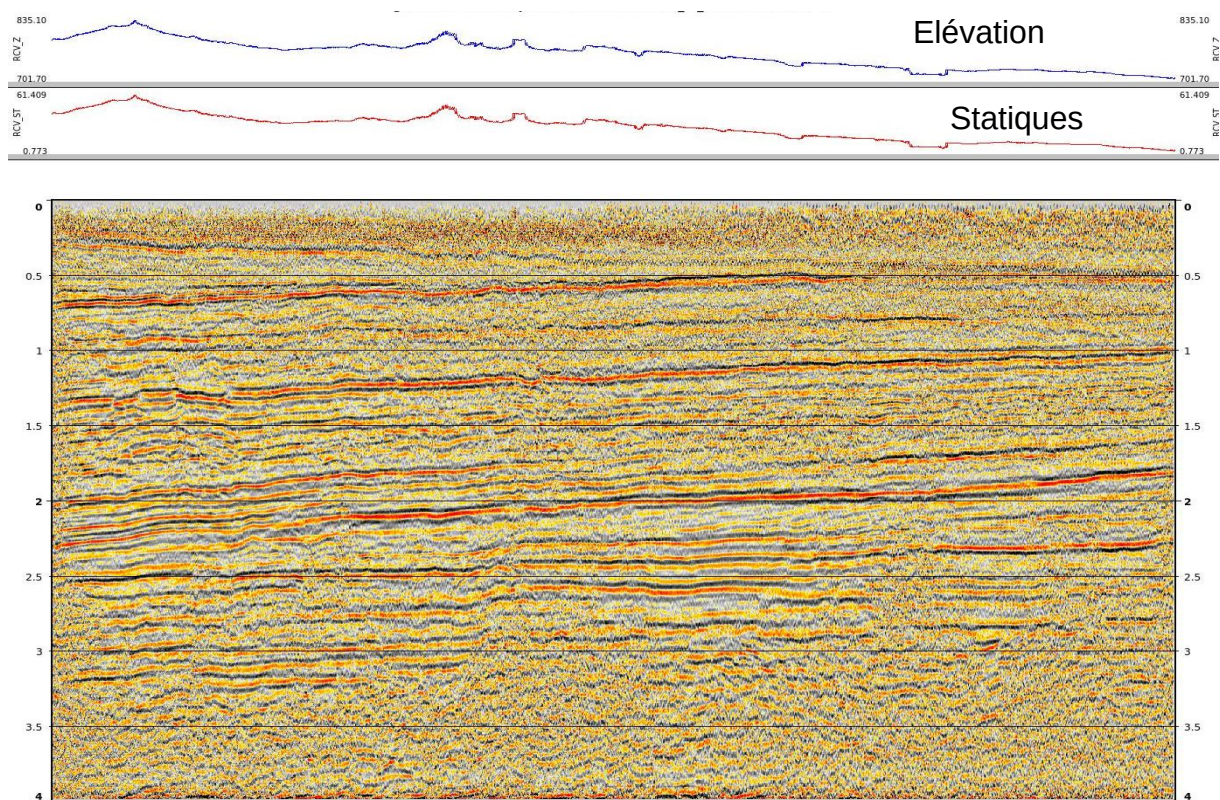
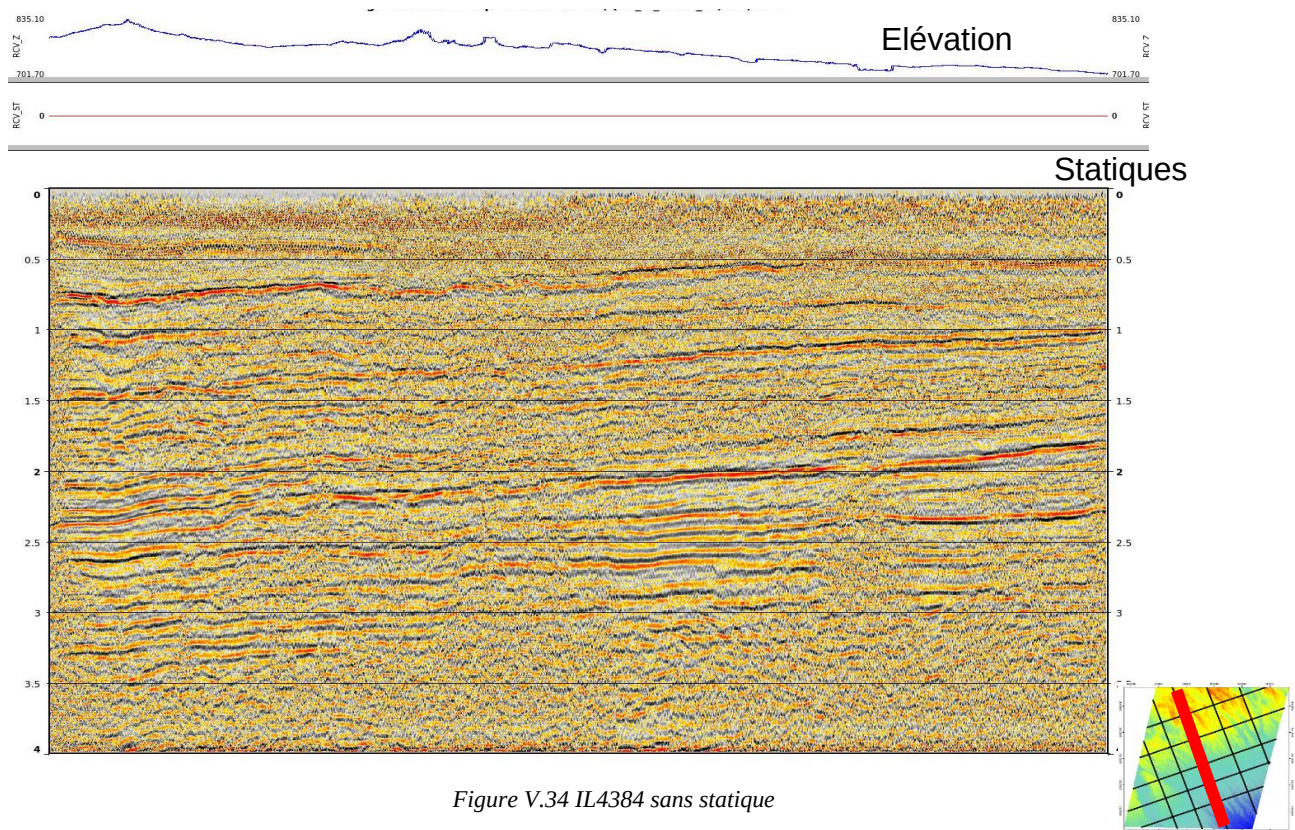


Figure V.33 modèle 02 : nord est – sud-ouest

Des sections sismiques ont été réalisé sur les figures suivantes.



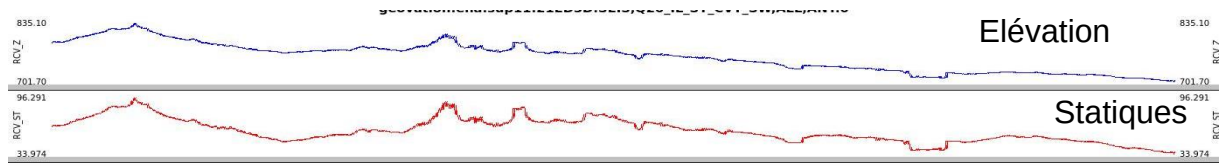


Figure V.36 IL4384 avec CVT interpolé

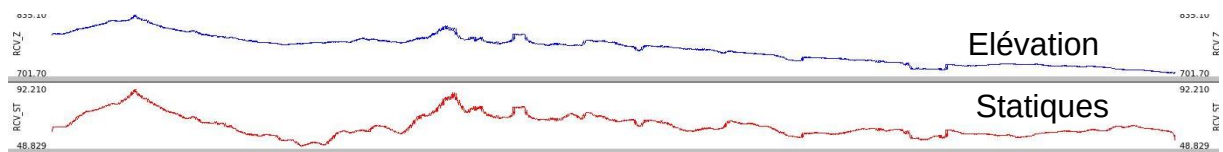
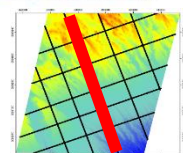
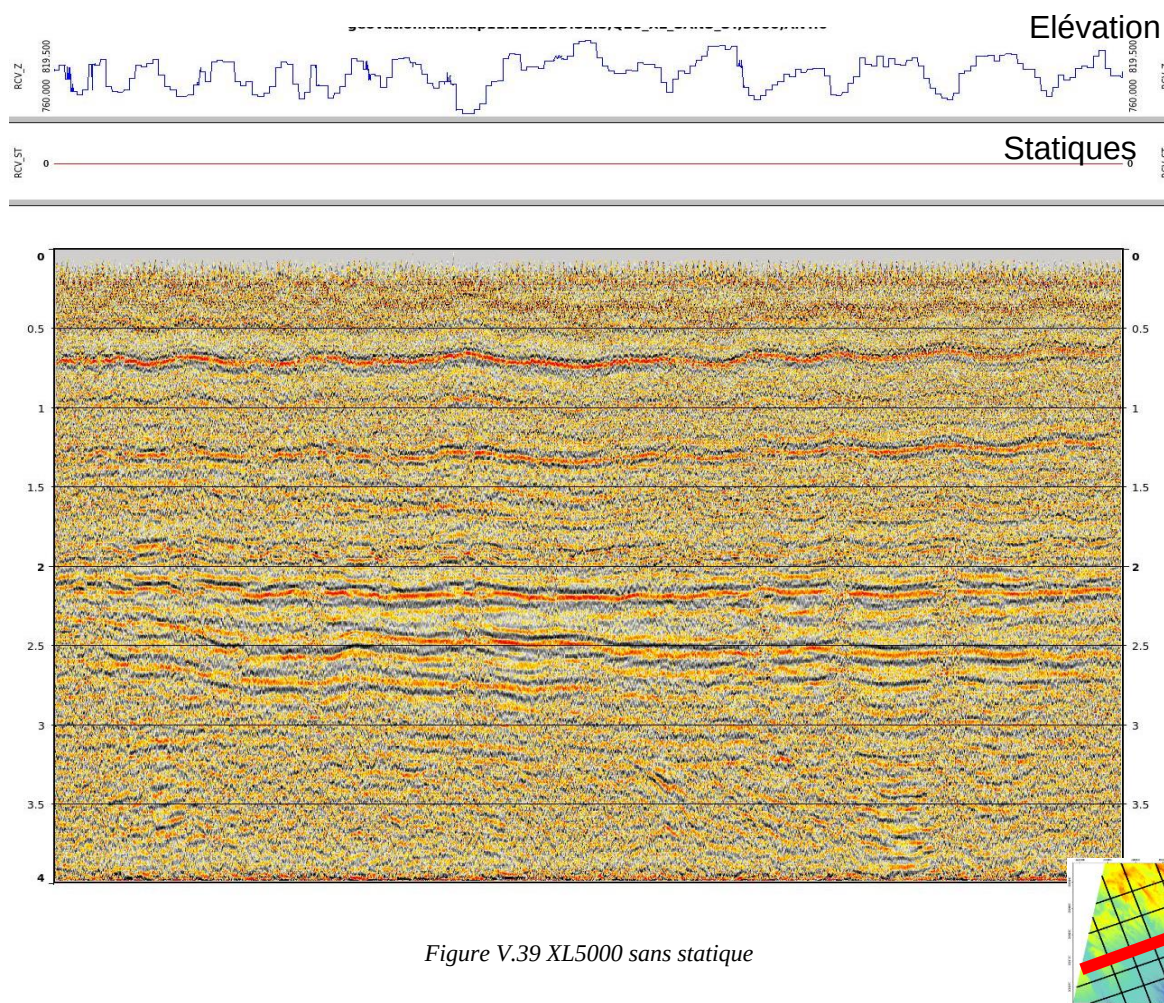
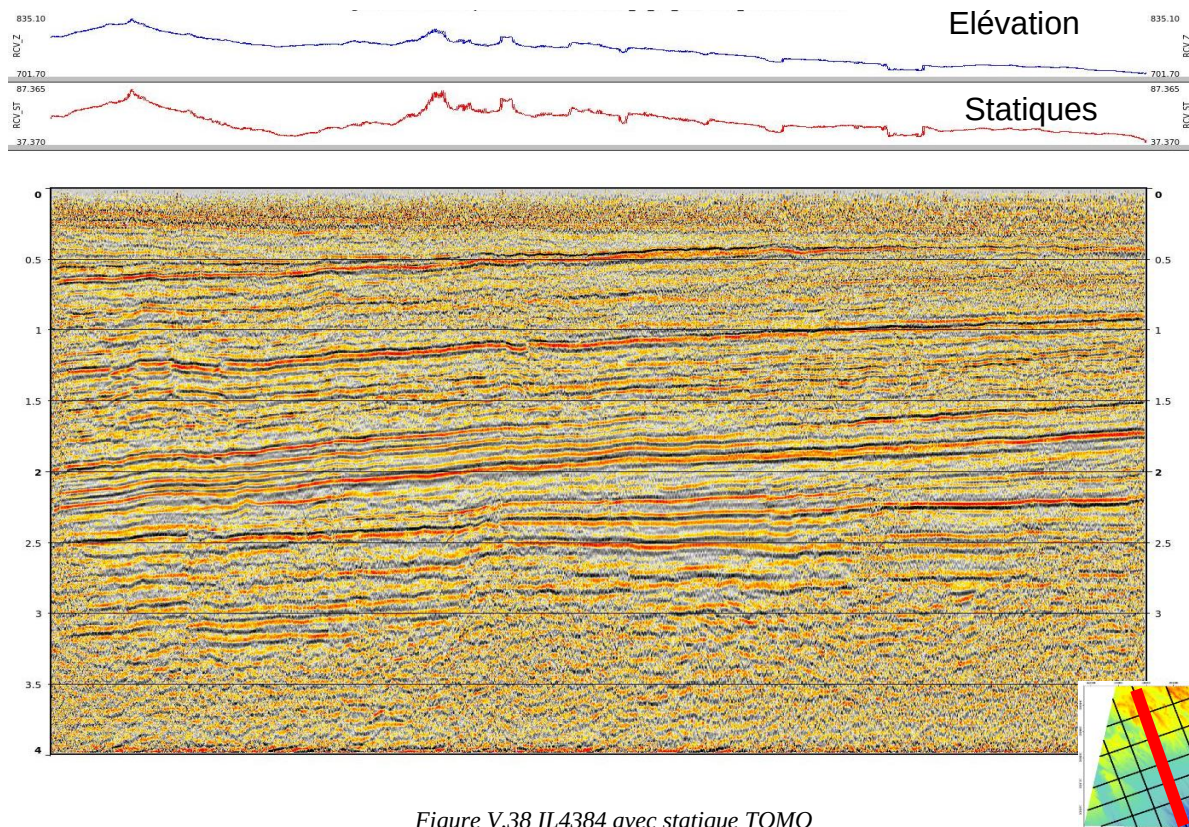


Figure V.37 IL4384 avec GLI





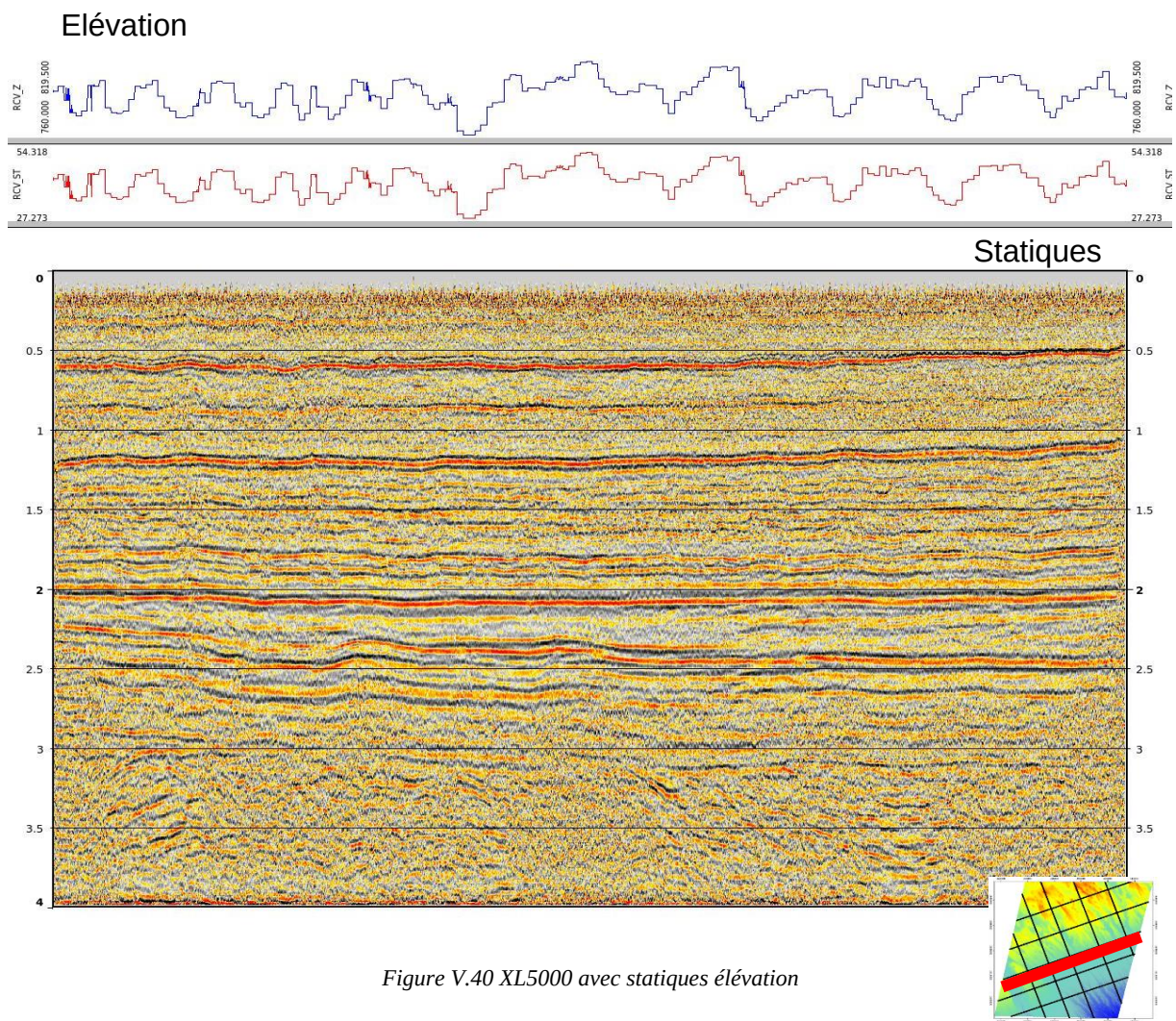
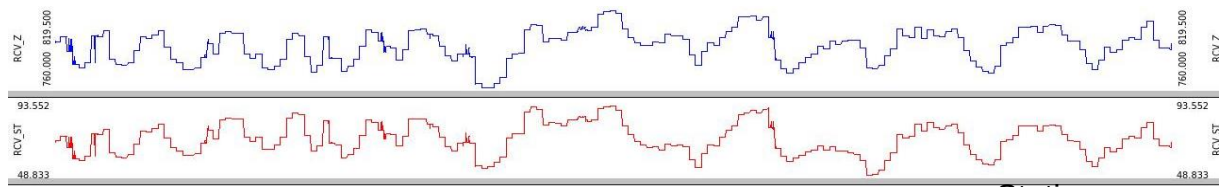


Figure V.40 XL5000 avec statiques élévation

Elévation



Statiques

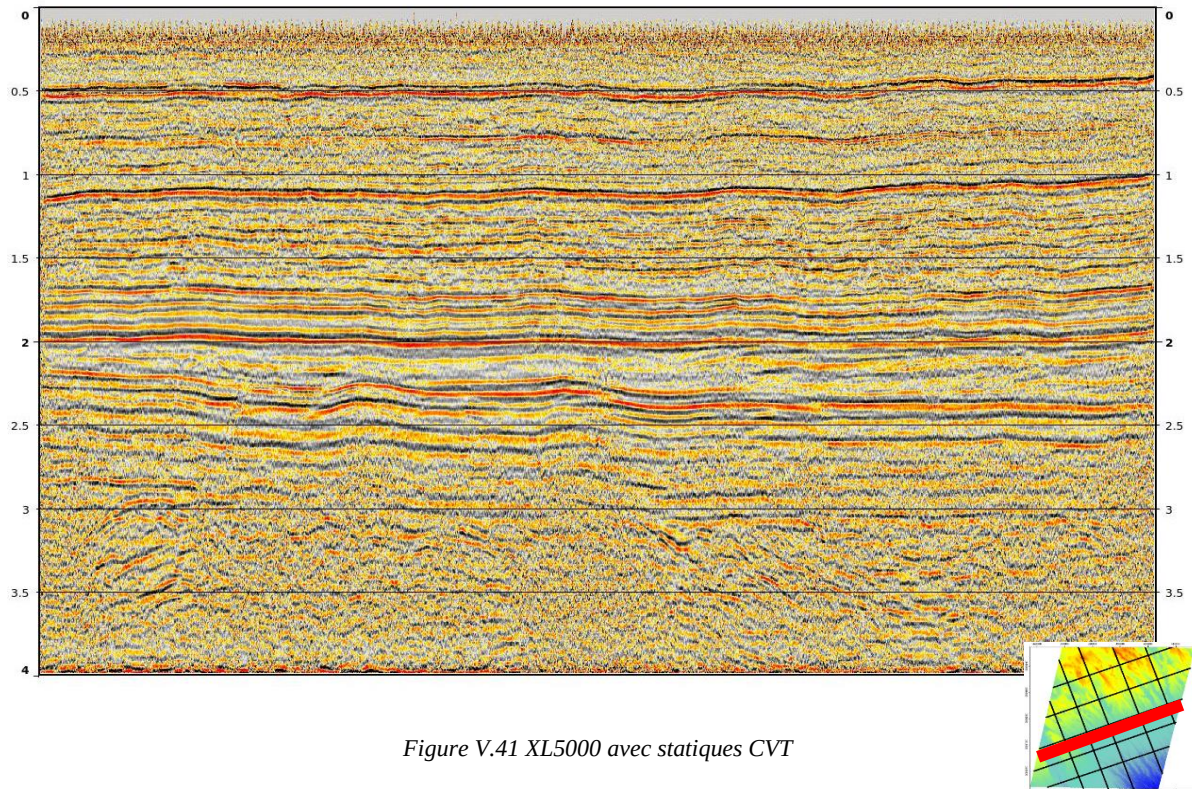
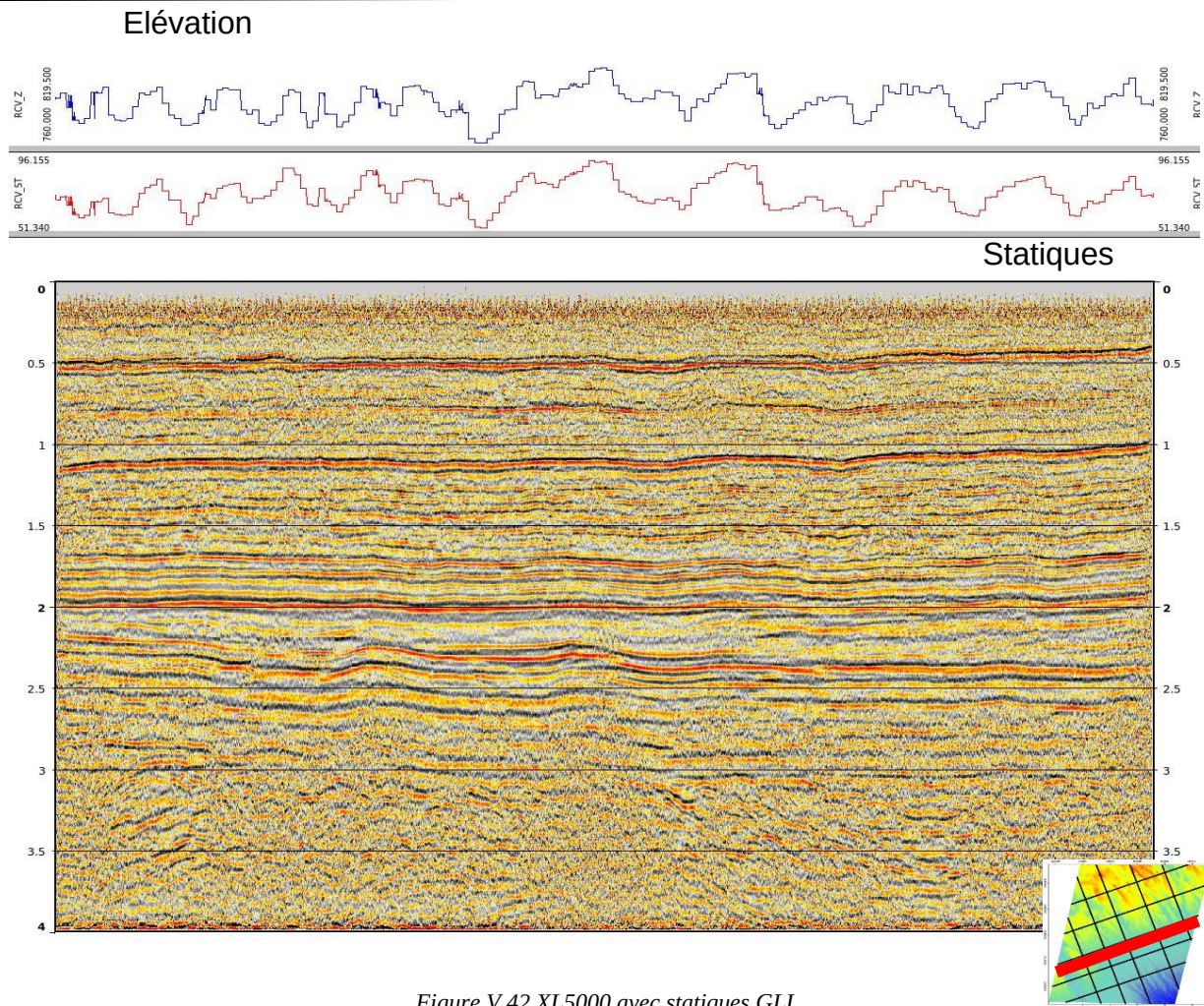


Figure V.41 XL5000 avec statiques CVT



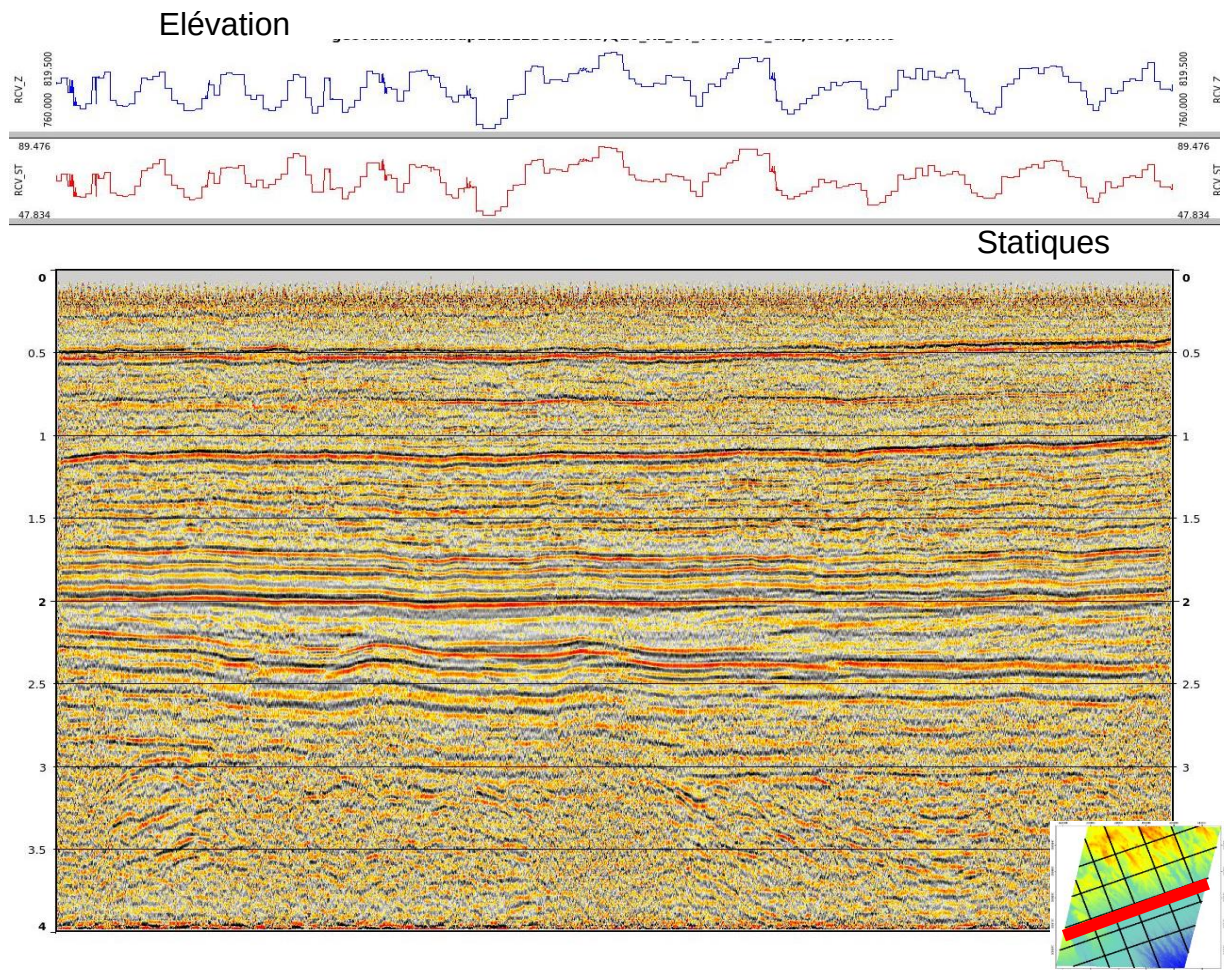


Figure V.44 XL5000 avec statiques TOMO

Pour l'obtention d'un meilleur modèle de vitesses pour calculer les statiques, il faut bien concentrer sur le choix de : nombre d'itérations, dimension des cellules et la base du modèle.

Les quatre figures suivantes représentent la section sismique du modèle (IL4384), la première figure sans correction statique, la deuxième avec le carottage sismique (CVT), la troisième avec la méthode de GLI, et la dernière représente la section du même profil avec Correction Statique Tomographie, on remarque une grande amélioration entre la première section sismique et la section sismique final.

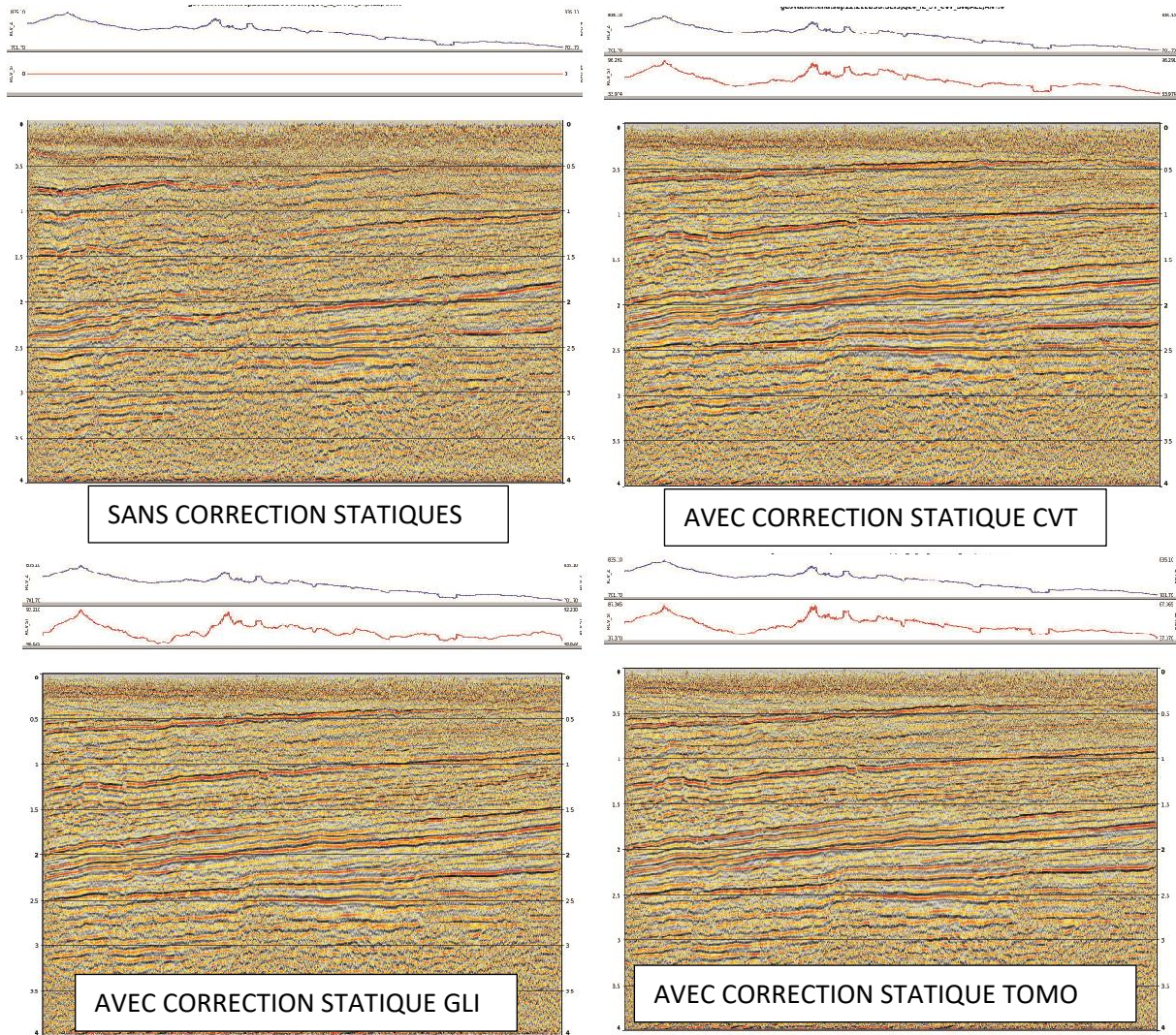


Figure V.45 LES résultat avant et après corrections statique CVT , GLI, Tomo du modèle "IL4384"

Les quatre figures suivantes représentent la section sismique du model (XL5000), la première figure sans correction statique, la deuxième avec le carottage sismique (CVT), la troisième avec la méthode de GLI, et la dernière représente la section du même model avec Correction Statique Tomographie, on remarque une grande amélioration entre la première section sismique et la section sismique final.

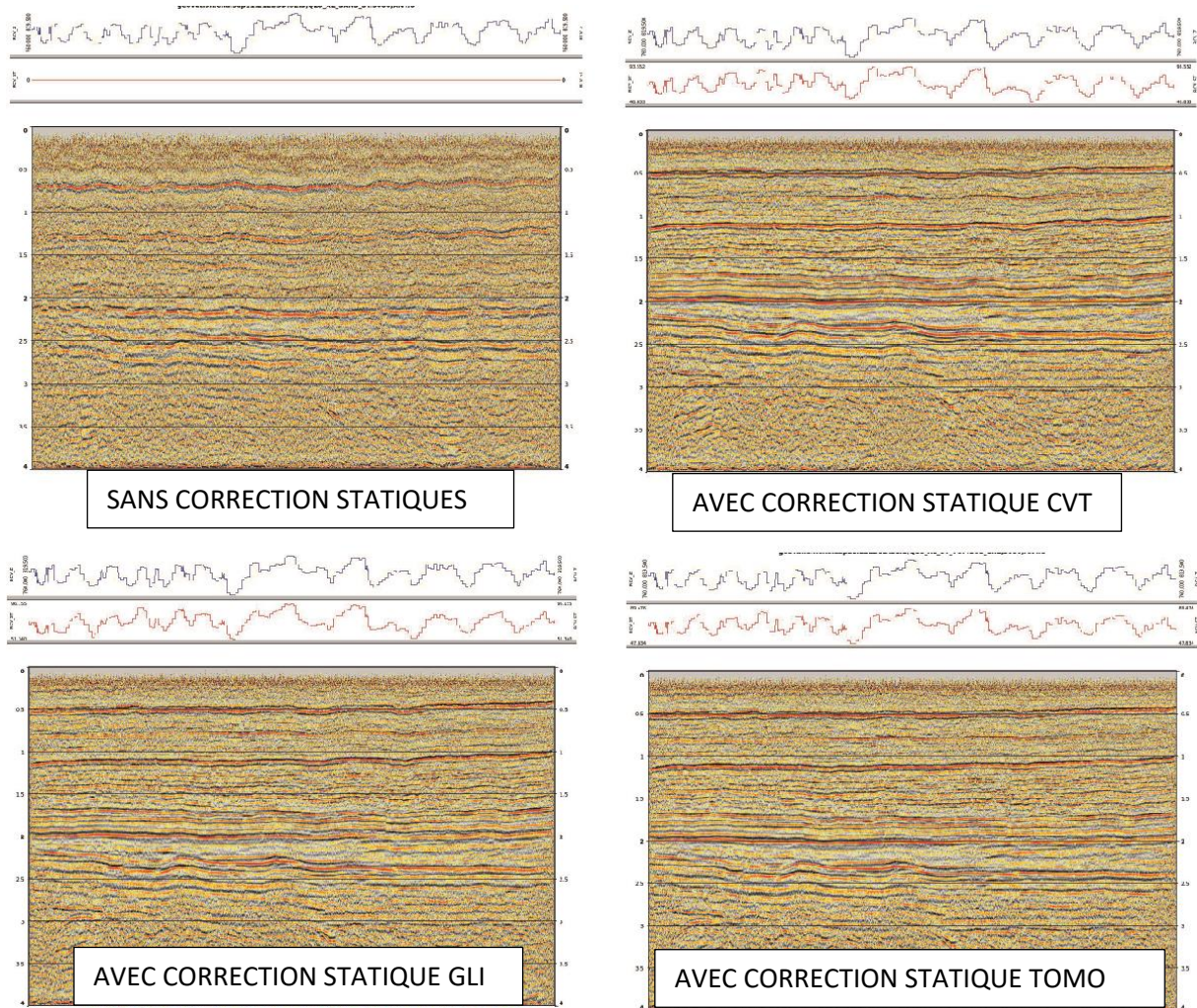


Figure V.46 LES résultat avant et après corrections statique CVT, GLI, Tomo du modèle "XL5000"

V.8 Comparaisons des sections obtenues par l'application de la méthode GLI et la tomographie

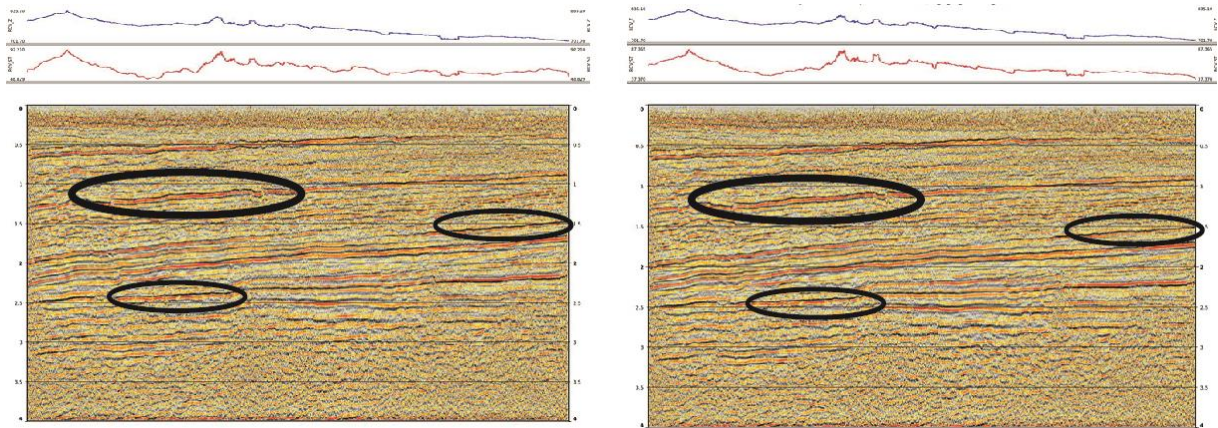


Figure V.47 Comparaison entre la section sismique après corrections statique GLI et Tomographie du modèle "IL4384"

La première figure représente la section sismique du model (IL4384) avec correction statique en méthode GLI. La deuxième figure représente la section du même model avec Correction Statique Tomographie. On remarque une nette amélioration sur la qualité de l'image.

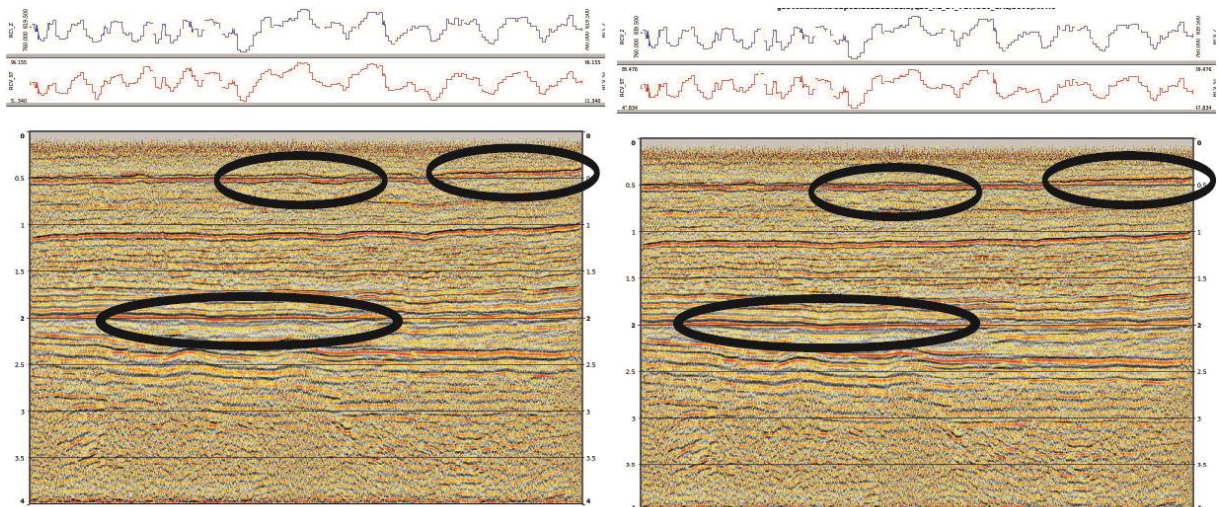


Figure V.48 Comparaison entre la section sismique après corrections statique GLI et Tomographie du modèle "XL5000"

La première figure représente la section sismique du model (XL5000) avec correction statique en méthode GLI. La deuxième figure représente la section du même profil avec Correction Statique Tomographie. On remarque une nette amélioration sur la qualité de l'image.

- On remarque la présence d'anomalies de grandes longueurs d'onde. Ces dernières se traduisent par des oscillations sur les horizons superficiels.

En tenant compte des remarques déjà faites sur les sections sismiques obtenues par la tomographie on peut faire la conclusion suivante :

- La méthode tomographique des corrections statiques a permis d'éliminer les anomalies de grandes longueurs d'ondes.

La comparaison des résultats obtenus respectivement par la tomographie et la méthode GLI à montres une nette atténuation des grandes longueurs d'ondes sur les sections obtenues par la tomographie.

Conclusion

Dans notre travail, nous avons appliqué la méthode de tomographie sismique sur deux modèles (XL5000 et IL4384) au niveau du département de traitement des données sismiques de l'ENAGEO.

Le but étant de calculer les corrections statiques pour trouver des modèles de vitesse pour une structure de subsurface cohérente.

Nous avons utilisé aussi la méthode GLI et nous avons comparé ses résultats à ceux de la tomographie sismique.

Nous avons constaté que l'Inversion tomographique des temps de premières arrivées permet d'estimer les structures géologiques des couches superficielles définies par les vitesses et les épaisseurs de meilleure façon que par la méthode GLI. Cela, par ce que les vitesses estimées par l'inversion tomographique sont généralement plus précises immédiatement en dessous du relief.

Nous avons constaté que les bons résultats de la méthode de tomographie sont limités quand la qualité de l'acquisition est mauvaise, la faible couverture et les paramètres de la WZ présente une variation rapide.

Bibliographie

- A.Bitri J.Perrin A.beauce (1996) , La sismique de réflexion haute résolution : Principes et applications, Rap BRGM. R 39220.
- BELHADJ Jihane (2016), Modèles paramétriques pour la tomographie sismique bayésienne, thèse doctorat. École doctorale Géosciences Ressources Naturelles et Environnement Préparée à MINES ParisTech.
- Bernard Giroux (2019), Méthodes sismiques, Corrections statiques, Institut national de la recherche scientifique Centre Eau Terre Environnement.
- Bertrand IOOSS (2001), thèse doctorat Tomographie statique en sismique réflexion : Estimation d'un modèle de vitesse stochastique, l'École des Mines de Paris.
- Cedric Taillandier (2008), thèse doctorat formulation de la tomographie des tempsdes premières arrivées à partir d'une méthode de gradient : un pas vers une tomographie interactive, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Červený V. and Soares J.E.P., 1992: Fresnel volume ray tracing.*Geophysics*
- Djeddi Mabrouk (2022), Interprétation structurale des donnes de sismique de réflexion, université de Boumerdès.
- Frederic Delbos (2004), thèse doctorat Problèmes d'Optimisation Non Linéaire avec Contraintes en Tomographie de Réflexion 3D, l'École Doctorale de Sciences Mathématiques de Paris Centre L'université Pierre et Marie Curie (Paris VI).
- Frédérique FOURNIER (1990), thèse doctorat Application de l'analyse des Données a l'exploration pétrolière, caractérisation des facies sismiques par analyses statiques multivariables, L'institut national polytechnique de LORRAINE.
- Jean-Luc Mari, Christophe Vergniault (2018), Sismique en forage et diagraphies acoustiques : État de l'art du domaine géotechnique et transferts méthodologiques possibles du domaine pétrolier. EDP science
- Jaques Hadamard (1902): Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique. *Princeton University Bulletin*,
- Krajewski et al (1989), Geophysical Prospecting
- Mender Mourad (2015), mémoire de magister application des méthodes algébrique(ART, SIRT) aux problèmes de reconstruction d'images tomographiques en sismique UMBB.
- Miranda, F., 1989, Geophysical Tomographic Reconstruction of Travel-Time and Amplitude Anomalies, PhD Thesis, Université de Swansea, Université du Wales, Dept. de sciences de la terre .
- Riadh Ben-Salah (2015), thèse doctorat Élaboration d'une méthode tomographiquede reconstruction 3D en velocimétrie par image de particules basée sur les processus ponctuels marqués, École doctorale Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Énergétique et Aéronautique (SI-MMEA).
- Tikhonov, A. N.; Arsenin, V. Y. (1977). Solutions of Ill-Posed Problems. New York: Winston.

- Tutorial et guide Geostar (2013), CGG.
- Xiaosan Zhu, Rui Gao, Qiusheng Li, Ye Guan, Zhanwu Lu, Haiyan Wang (2014), Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
- Yilmaz, O. (2001). Seismic data Analysis, volume 1. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma