

Livrable L5.5



Exploitation des données sismiques et sismologiques acquises sur le glissement de terrain de Séchilienne

ANR SLAMS

Pascale Sénéchal

en collaboration avec S. Garambois & J. Virieux

Juillet 2013.

Table des matières

Introduction.....	3
1. Données sismiques utilisées.....	3
2. Tomographie sismique.....	6
2.1. Pointés des premières arrivées et détermination du T0 en utilisant l'onde sonore.....	6
2.1.1. Méthode 1: T0 déterminé à partir d'une estimation de l'onde sonore.....	6
2.1.2. Méthode 2 : Essai de détermination du T0 par régression linéaire.....	8
2.1.3. Conclusion et méthode utilisée.....	10
2.2. Représentation des temps pointés en fonction de la distance de propagation.....	12
2.3. Tentative d'inversion 3D avec TOMO-TV.....	14
2.3.1 Modèle initial utilisé.....	14
2.3.2 Études des résidus après modélisations directes.....	14
2.3.3. Tentative d'inversion de PS1-PS7.....	30
2.3.4. Tentative de modélisation avec les profils PS1-PS7 et les stations sismologiques.....	32
2.3.5. Tentative d'inversion avec une correction de 30 ms sur les données issues des stations sismologiques.....	35
2.3.6. Tentative d'inversion en mode « Blast ».....	36
2.3.7. Conclusions.....	39
3. Tomographie 2D avec les Profils PS1 à PS7.	40
3.1. Comparaison des modèles obtenus avec deux modèles à gradient différents :.....	40
3.2. Comparaison des résultats de la tomographie 2D avec modèles initiaux homogène et à gradient.....	43
4. Résultats en sismique réflexion.....	55
4.1. Analyse spectrale, tentative de rehaussement des hautes fréquences et filtrage FK.....	56
4.2. Modélisation avec le logiciel skb2.....	58
4.2.1. Influence de la fréquence dominante du signal.....	59
4.2.2. Comparaison entre points de tirs réels et synthétiques.....	65
4.2.3. Conclusions.....	68
4.3. Traitement en sismique réflexion.	68
5. Analyses et inversion des ondes de surface:.....	77
5.1. Analyses du profil PS1PS2.....	78
5.1.1. Essais d'analyse pour obtenir un modèle moyen sur PS1.....	79
5.1.2. Essais d'analyse pour identifier d'éventuelles variations latérales de vitesses au niveau de PS1:.....	81
5.1.3. Essais d'analyse pour obtenir un modèle moyen sur PS2.....	83
5.2. Analyses du profil PS3PS4.....	85
5.2.1. Essais d'analyse pour obtenir un modèle moyen sur PS3PS4.....	86
5.3. Analyses des profils PS5, PS6 et PS7.....	88
5.3.1. Essais d'analyse pour obtenir un modèle moyen sur PS5, PS6 et PS7.....	89
5.4. synthèse des résultats.....	92
6. Conclusions.....	93
Références :	94

Introduction

Dans l'optique de caractériser en 3 dimensions le mouvement de terrain des "Ruines de Séchilienne" afin d'obtenir un modèle 3 dimensions de la zone en mouvement et la répartition spatiale des vitesses d'ondes P et S au sein de ce mouvement, nous avons tenté d'exploiter l'ensemble des données sismiques et sismologiques à notre disposition. Une tomographie sismique en 2D et en 3D du mouvement a été effectuée et est basée sur la combinaison de plusieurs campagnes de mesures sismiques actives le long de profils 2D qui ont permis d'obtenir un premier éclairage sur l'épaisseur de la zone déstructurée et les gammes de vitesses des ondes P. Dans le but de densifier ces données, d'avoir la possibilité d'obtenir un modèle de vitesse sismique en 3 dimensions et de bénéficier d'illuminations différentes (notamment à grands offsets), la base de données a été complétée en utilisant les enregistrements de tirs locaux enregistrés par le réseau de stations sismologiques du réseau sismologique National OMIV, mais qui ne bénéficient pas d'une référence temporelle identique. Malgré ces difficultés, une tentative d'inversion a été tentée sur l'ensemble des données sélectionnées en utilisant une méthode tomographique basée sur le calcul des temps de trajet effectué par résolution de l'équation Eikonal par différences finies (méthode de Potvin-Lecomte). Différentes modélisations directes et une étude des résidus résultants ont d'abord été effectuées afin de définir l'influence du modèle initial, de contraindre les vitesses des ondes P, l'épaisseur de la zone déstructurée et de mettre en évidence d'éventuelles anomalies liées aux sources ou aux stations. Enfin, une reprise des inversions tomographiques des profils en 2D dimensions a été effectuée en contraignant le modèle initial avec les informations obtenues à partir des modélisations directes et de l'étude des résidus en 3 dimensions. de façon à affiner et de mieux contraindre les modèles finaux obtenus.

En complément, bien que la configuration d'acquisition ne soit pas optimale pour une exploitation des données en sismique réflexion et que la zone déstructurée du glissement de terrain soit très complexe à imager en sismique réflexion, une tentative de traitement en sismique réflexion des données obtenues le long de profils en sismique active a été effectuée. En parallèle, des points de tirs synthétiques ont été générées à partir de modèles ont été générées et comparés à plusieurs points de tirs enregistrées afin de dissocier les éventuelles réflexions contenues dans les données.

Enfin , une analyses des ondes de surface a été effectuée sur différents points de tirs.

L'ensemble des résultats sont exposés dans ce qui suit.

1. Données sismiques utilisées.

Les données utilisées pour tenter de caractériser le mouvement de terrain (figure 1.1) sont d'une part, les profils sismiques PS1-PS2-PS3-PS4-PS5-PS6-PS7 issus de campagnes de sismiques actives, et d'autre part, des enregistrements obtenus avec les stations sismologiques RUI, THE et GAL du réseau sismologique National OMIV. Les enregistrements provenant des stations sismologiques sont issus d'une partie des tirs effectués au niveau des profils PS5, PS6 et PS7 en 2010 et d'autre part, au niveau des des profils PS1,PS2,PS3 et PS4 en 2008.

La mise en place de cette base de données utilisée pour les différentes analyses a nécessité une reprise de la totalité des données avec une remise à plat de la géométrie et du pointé de l'ensemble des données. En particulier, les coordonnées des profils de sismique active ont du être reprises et

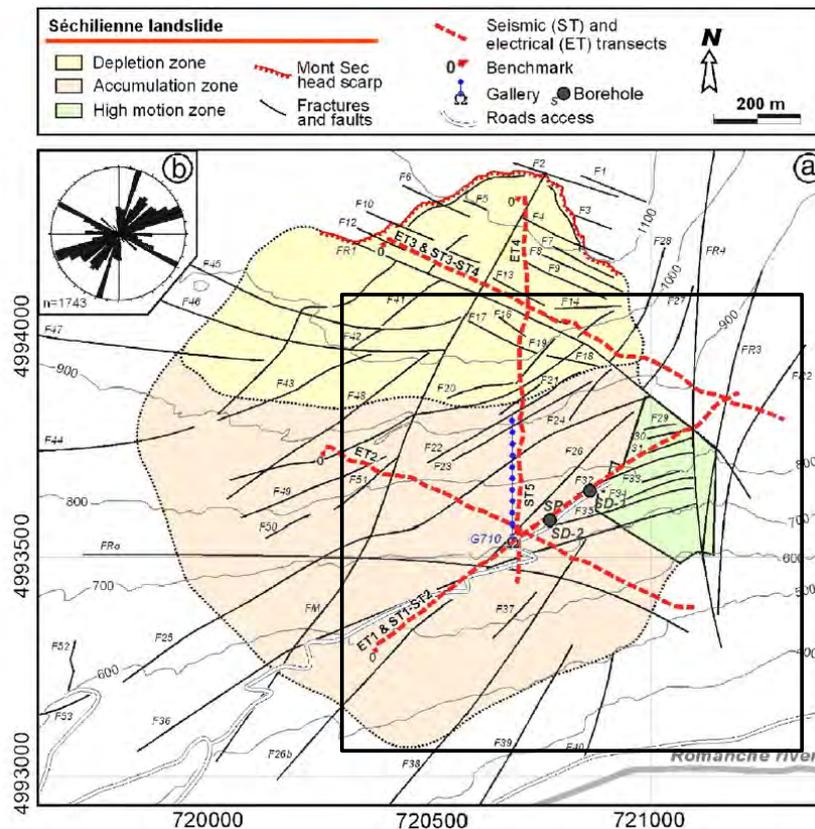


Figure 1.1 : Carte de la zone du glissement de terrain de Séchilienne (Le Roux et al, 2011)

corrigées et les altitudes des stations sismologiques localisées dans la galerie ont été corrigées.

Pour la tomographie sismique, 6052 temps de la première arrivée ont été pointés avec 176 sources et 326 stations. Pour le traitement en sismique réflexion et l'étude des ondes de surface, les profils PS1 à PS7 ont été utilisés. Le tableau 1.1 et 1.2 en résument les principales caractéristiques. Les figures 1.2 et 1.3 présentent la positions des sources et récepteurs ou stations utilisés pour constituer la base de données. Les coordonnées en x et y sont en Lambert 3.

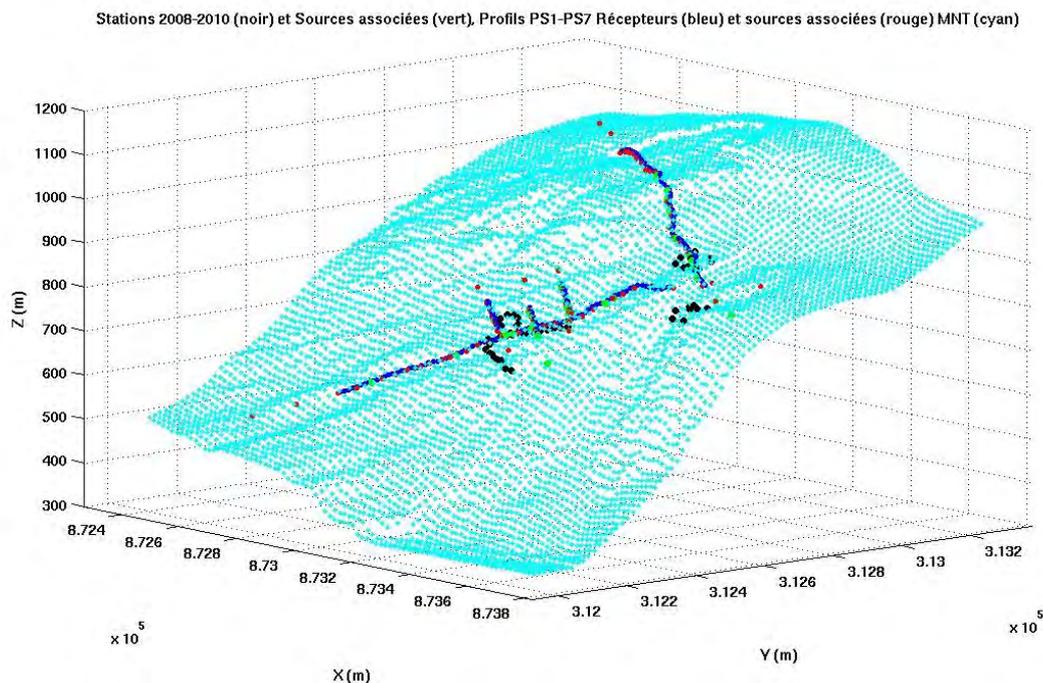


Figure 1.2: Positions des 176 sources et 326 récepteurs ou stations utilisés dans la base de données de l'inversion et MNT de la zone étudiée (maille de 16 m X16 m)

	PS1	PS2	PS3	PS4	PS5	PS6	PS7
Nombre de tir	20	17	20	20	15	16	16
Nombre de géophone	48	48	48	48	24	24	24
Fréquence d'échantillonnage (Hz)	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
Nombre d'échantillons par traces	12000	12000	12000	12000	12000	12000	12000
Distance inter géophone (m)	~ 10	~ 10	~ 10	~ 10	~ 5	~ 5	~ 5
Fréquence propre géophones (Hz)	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

Tableau 1.1 : Caractéristiques principales des profils de sismique active PS1 à PS7.

Stations sismologiques	RUI 2008	THE2008	GAL2008	RUI 2010	THE2010	GAL2010
Type station	1 composante Verticale					
Nombre de stations	7	7	23	7	7	23
Fréquence d'échantillonnage (Hz)	250	250	250	250	250	250
Nombre d'échantillons par trace	2501	2501	2501	2496	2496	2496
Fréquence propre capteur (Hz)	4.5	4.5	4.5	0.05	0.05	4.5

Tableau 1.2 : Caractéristiques principales des stations sismologiques utilisées.

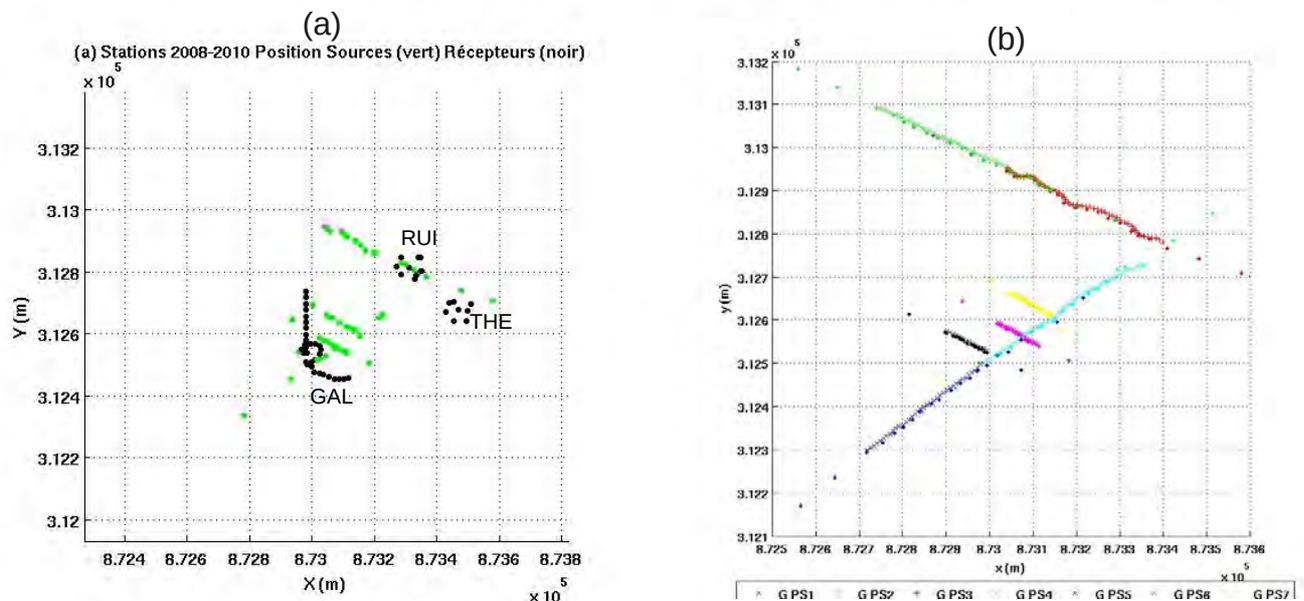


Figure 1.3 : (a) Localisation dans un plan XY des stations sismologiques des groupes RUI, THE et GAL (points noirs) et des sources (points verts) utilisées. (b) Localisation des profils sismiques PS1 à PS7 dans un plan XY.

2. Tomographie sismique.

Concernant le Profils PS1 à PS7, il s'agit d'acquisition classique de sismique active avec une configuration d'acquisition adaptée à la sismique réfraction. Le pointé des premières arrivées s'est effectué classiquement sous le logiciel Sardine.

Pour les enregistrements provenant des stations sismologiques RUI, THE et GAL de 2008 et 2010, le T0 absolu n'a pas été enregistré au moment des tirs et nous ne pouvons donc pas déterminer le temps de propagation de la première arrivée. Pour pallier ce problème, nous avons tenté de déterminer le T0 de chacun des tirs en utilisant l'onde sonore comme cela est décrit dans le paragraphe 2.1.

2.1. Pointés des premières arrivées et détermination du T0 en utilisant l'onde sonore.

La problématique est la détermination du T0 pour les enregistrements obtenus par les stations sismologiques. Deux méthodes ont été utilisées:

- Estimation du T0 à partir de l'onde sonore pour chacune des stations d'un même point de tir.
- Estimation du T0 par régression linéaire à partir du pointé de l'onde sonore de chacune des stations d'un même point de tir.

2.1.1. Méthode 1: T0 déterminé à partir d'une estimation de l'onde sonore.

Nous avons considéré que les stations proches des tirs sont les plus adaptées à un enregistrement fiable de l'onde sonore et ont été sélectionnées. La méthodologie est la suivante:

- Analyse temps-fréquence sous le logiciel GEOPSY afin de dissocier les arrivées hautes fréquences pouvant correspondre à l'onde sonore.
- Pointé de l'onde sonore .
- Correction du temps de propagation correspondant à la distance source-station sismologique avec la vitesse dans l'air (estimée sur tomographie sismique 2D pour le même tir) pour obtenir une estimation du T0.

Exemple d'analyse avec le Tir 11 de PS4 :

Les stations RUI2, RUI5, THE3 et THE6 (ronds rouges la figure 2.1) ont été utilisées pour cette analyse. Les autres stations relativement proches du tirs ne permettent pas de pointer de façon précise l'onde sonore.

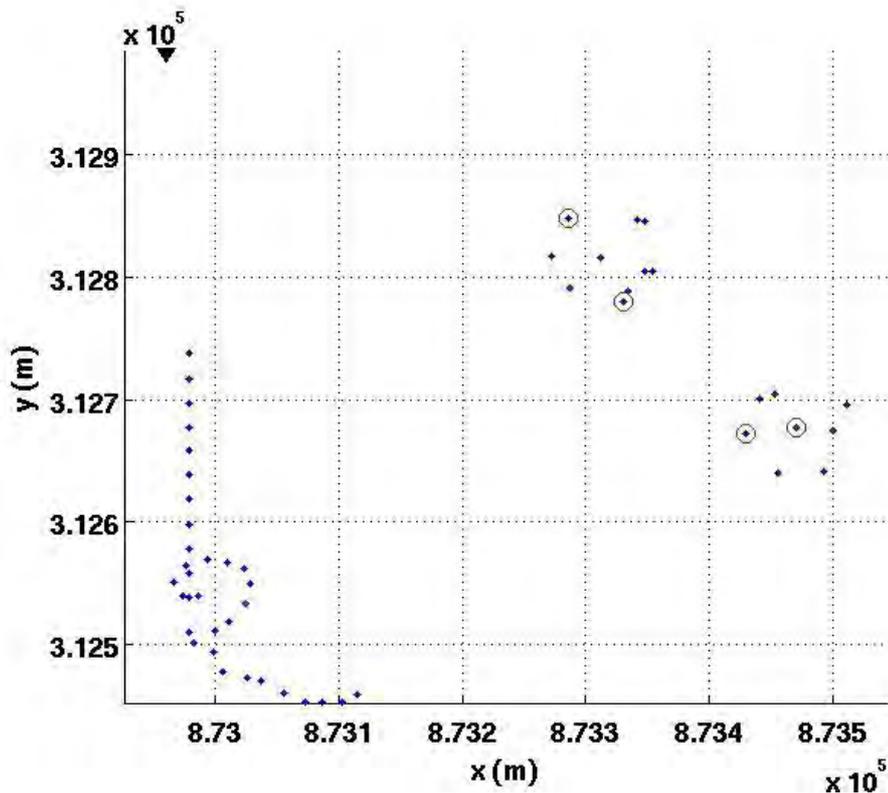


Figure 2.1: Localisation du Tir 11 (Triangle noir) de PS4, de l'ensemble des stations sismologiques (Points bleus) et des stations sismologiques utilisées (Ronds rouges).

Exemple avec l'enregistrement RUI2 :

L'enregistrement obtenu sur la station RUI02 pour le tir 11 de PS4 et le résultat de l'analyse temps-fréquence obtenu sur la même fenêtre de temps sont présentés sur la figure 2.2. Dans l'hypothèse que l'arrivée haute fréquence (>50 Hz (figure 2.2) vers 14h45m6s) corresponde à l'onde sonore, on peut estimer le T0 correspondant à ce tir en utilisant le temps d'arrivée de l'onde sonore et en soustrayant le temps qu'a mis l'onde sonore pour parcourir la distance tir-station. La vitesse dans l'air utilisée est 330 m/s et correspond à la vitesse de l'onde sonore enregistré sur le profils sismiques.

Le tableau 2.1 présente les temps T0 obtenus pour les quatre stations choisies avec une vitesse de 330 m/s et à titre indicatif avec une vitesse de $V=340$ m/s.

Station	Distance source-récepteur en m	Temps T0 obtenu avec vitesse de l'onde sonore=330m/s :	Temps T0 obtenu avec vitesse de l'onde sonore=340m/s :
RUI02	374.2	14h45m04.823s	14h45m04.856s
RUI05	448.8	14h45m04.78s	14h45m04.820s
THE03	631.7	14h45m04.776s	14h45m04.832s
THE06	655.2	14h45m04.775s	14h45m04.833s

Tableau 2.1.

Le temps T0 est compris entre 14H45m04.823s et 14H45m04.775s c'est à dire avec une variation de 48ms avec une vitesse de l'onde sonore=330 m/s
T0 est compris entre 14H45m04.82s et 14H45m04.856s c'est à dire une variation de 36 ms avec une vitesse de l'onde sonore=340 m/s.

L'incertitude sur le T0 est beaucoup trop importante pour pouvoir exploiter les enregistrements des stations sismologiques dans le cas du tir 11 pris en exemple ici.

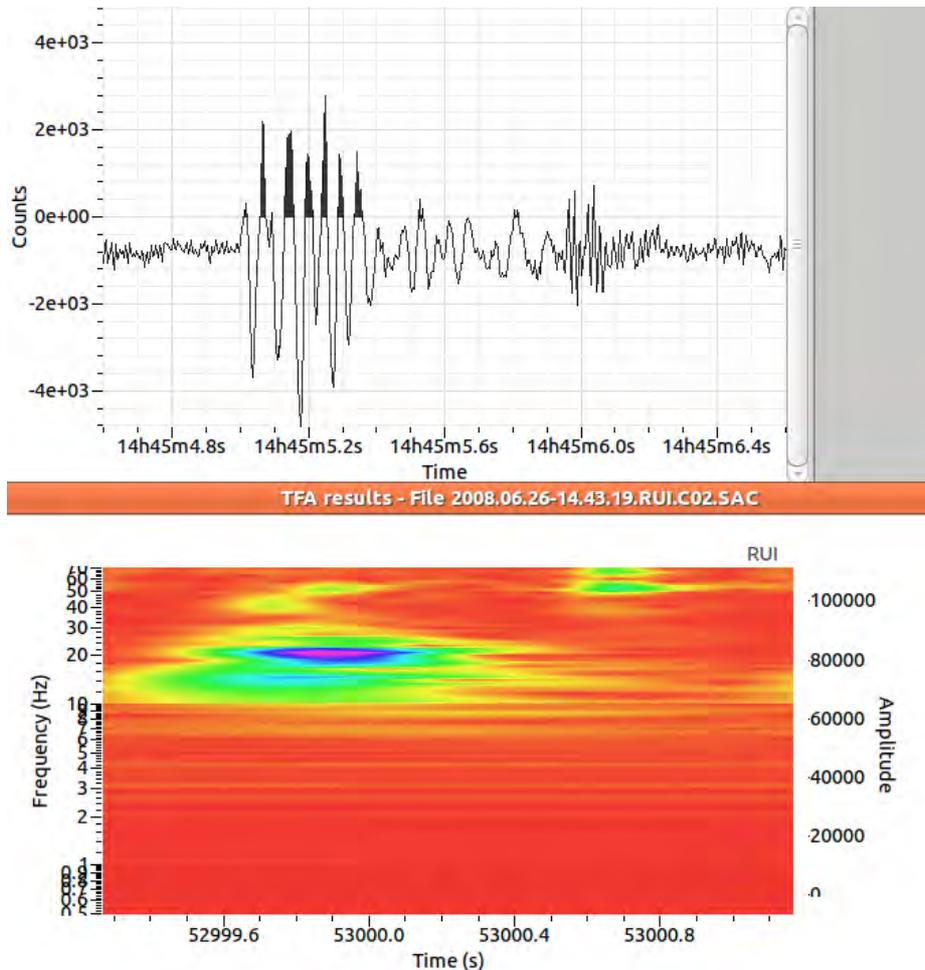


Figure 2.2 : Enregistrement obtenu sur la station RUI02 pour le tir 11 de PS4 et résultat de l'analyse temps-fréquence obtenu sur la même fenêtre de temps.

2.1.2. Méthode 2 : Essai de détermination du T0 par régression linéaire.

A partir du pointé de l'onde sonore des enregistrements des stations sismologiques appartenant à un même point de tir, on détermine le T0 et la vitesse de l'onde sonore par régression linéaire.

Exemple d'analyse avec le Tir 11 de PS4 : (voir figure 2.3 et tableau 2.2) .

Station	Distance source-récepteur en m	Temps pointé pour l'onde sonore :
RUI02	374.2	14h45m05.957s
RUI05	448.8	14h45m06.14s
THE03	631.7	14h45m06.69s
THE06	655.2	14h45m06.76s

Tableau 2.2.

Par régression linéaire, on obtient :

$T_0 = 14h45m04.8605s$

Vitesse onde sonore = 344.83 m/s

La vitesse obtenue est plus élevée que la vitesse estimée sur la tomographie sismique. (Vitesse onde sonore = 330 m/s)

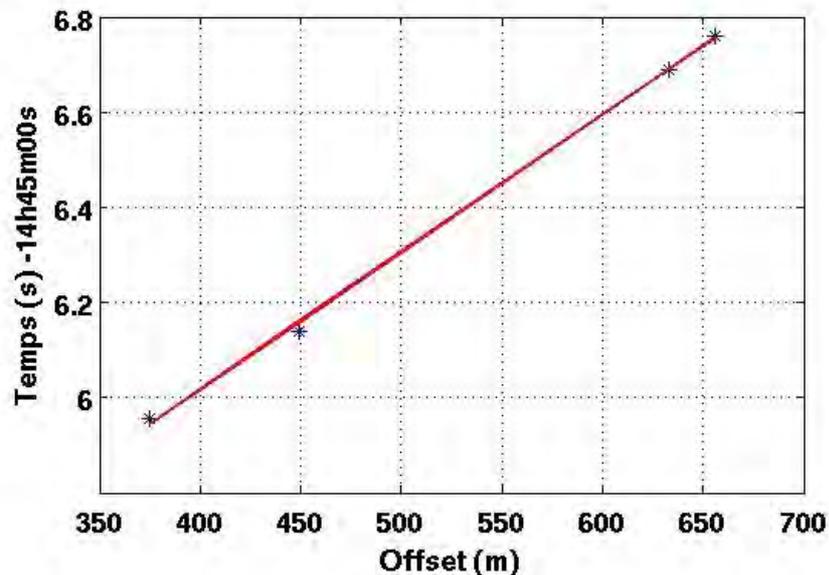


Figure 2.3: Graphe représentant le temps d'arrivée de l'onde sonore pour 4 stations sismologiques différentes et droite de régression linéaire associée.

Dans cet exemple, seulement quatre points sont utilisés pour la régression linéaire ce qui peut expliquer la valeur de la vitesse obtenue pour l'onde sonore.

Nous tentons d'autres essais avec plus de stations sur lesquelles nous pouvons pointer le temps de propagation pour l'onde sonore et pour des offsets variables.

Essai de calcul de l'incertitude de l'onde sonore : Exemple Tir 13h19m11s

Pour ce tir, huit stations sont utilisées avec des offsets variant d'environ 100 à 500 m. (voir tableau 2.3 et figure 2.4)

Station	Distance source-récepteur en m	Temps pointé de l'onde sonore	Temps pointé de la première arrivée.
RUI02	84.3	13h19m41.266s	13h19m41.092s
RUI06	120.18	13h19m41.363s	13h19m41.095s
THE00	357.32	13h19m42.061s	13h19m41.172s
THE01	315.08	13h19m41.952s	13h19m41.175s
THE02	305.63	13h19m41.928s	13h19m41.178s
THE03	362.81	13h19m41.085s	13h19m41.198s
GAL16	493.31	13h19m42.497s	13h19m41.246s
GAL20	495.10	13h19m42.342s	13h19m41.290s
GAL22	498.32	13h19m42.476s	13h19m41.286s

Tableau 2.3

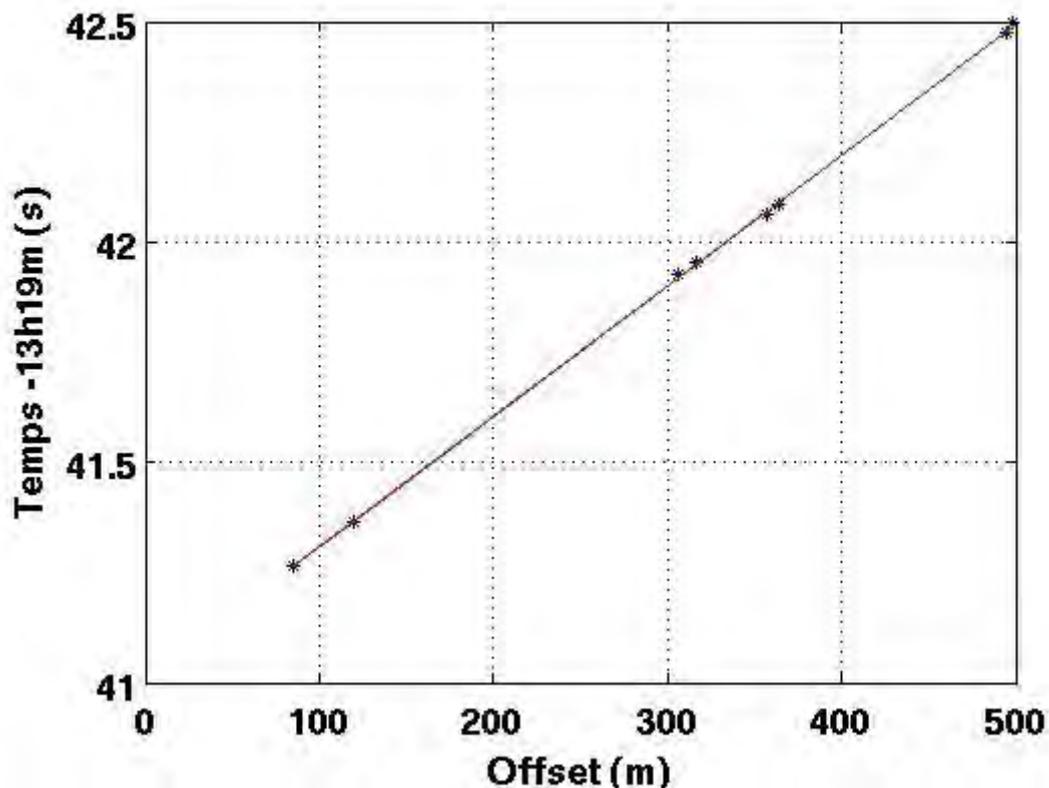


Figure2.4: Graphe représentant le temps d'arrivée de l'onde sonore pour les stations sismologiques (voir tableau 2.3) et droite de régression linéaire associé.

Avec la droite de régression, on obtient un **T0 = 13h19m41.0123 s** et une **Vitesse onde sonore =337 m/s**.

La vitesse de l'onde sonore n'est pas compatible avec celle mesurée sur le point de tir de la tomo sismique (Vitesse onde sonore=329 m/s).

2.1.3. Conclusion et méthode utilisée.

Les 2 méthodes utilisées (utilisation de la vitesse dans l'air déterminée par la tomographie sismique et régression linéaire) ne permettent pas d'obtenir un T0 cohérent et suffisamment précis pour obtenir des vitesses sur l'onde P exploitables.

La topographie est fortement marquée et la propagation des ondes sonores peut être perturbée. Ainsi, la distance source-récepteur peut ne plus être directement utilisable pour calculer le temps de propagation de l'onde sonore. Les distances de propagation sont petites (quelques centaines de mètres) donc le cumul de l'incertitude en temps et en distance de propagation peut produire de gros écarts pour le T0.

Pour vérifier cette hypothèse, on utilise des points de tirs et des stations entre lesquels les perturbations topographiques ne sont pas problématiques et pour lesquels on peut utiliser la distance source stations à vol d'oiseau.

Exemple avec les points de tir 5, 6 et 7 de PS3 et les stations RUI.

La vitesse pour l'onde sonore utilisée est de 330m/s

Tableau 2.4 : **Point de tir 5**

Station	T0	Distance (m)
RUI00	8h12m05.342s	254.53
RUI01	8h12m05.334s	225.85
RUI02	8h12m05.326s	218.74
RUI05	8h12m05.333s	289.00

Soit un écart maximum de 16 ms.

Tableau 2.5 : **Point de tir 6**

Station	T0	Distance (m)
RUI00	16h01m57.3722s	201.90
RUI02	16h01m57.3781s	167.94
RUI05	16h01m57.3459s	242.25

Soit un écart maximum de 26 ms.

Tableau 2.6 : **Point de tir 7**

Station	T0	Distance (m)
RUI00	16h11m55.0536s	236.08
RUI05	16h11m55.0252s	276.49

Soit un écart maximum de 28 ms.

Incertitudes :

Les incertitudes liées à ces analyses sont évaluées à

±2 ms sur le pointé du t0 .

±6 ms sur le positionnement si on considère une erreur de positionnement de ±1m pour la source et pour le point de tir.

±7ms liée à l'estimation de la vitesse de l'onde sonore.

Soit une incertitude totale de ±15ms.

En prenant une incertitude de ±15ms sur le T0 :

- pour une vitesse de 4000 m/s sur une distance de propagation de 250 m, cela induit une gamme de vitesse comprise entre 3225 et 5260 m/s
- pour une vitesse de 2800 m/s sur une distance de propagation de 250 m, cela induit une gamme de vitesse comprise entre 2395 et 3365 m/s
- pour une vitesse de 1500 m/s sur une distance de propagation de 250 m, cela induit une gamme de vitesse comprise entre 1375 et 1648 m/s

Les écarts obtenus sur le T0 pour des couples tir-stations sans problèmes topographiques sont tout de même très importants (sur les exemples entre 16 et 28 ms, voir tableaux 2.4, 2.5 et 2.6) ce qui peut induire de gros écarts sur les vitesses obtenues. Le principal problème est que l'on induit ainsi un biais identique pour tous les enregistrements liés à un même point de tir. On surestime ou sous estime tous les temps de propagation liés à un point de tir.

Au final, pour minimiser l'incertitude sur le T0, nous avons choisi d'utiliser la moyenne des T0 déterminé pour un point de tir donné et en utilisant des stations pour lesquelles il n'y a pas de perturbations topographiques.

Seuls les points de tirs ne présentant pas d'obstacle topographique entre le point de tir et Seules les stations RUI00, RUI01, RUI02, THE00, THE01 et THE02 ont été utilisées pour déterminer le T0 à partir de l'onde sonore pour un point de tir donné.

2.2. Représentation des temps pointés en fonction de la distance de propagation.

L'ensemble des temps pointés proviennent d'une part des profils de sismiques actives PS1-PS7(voir Figure 1.3b) pour lesquels les temps pointés sont bien contraints et d'autre part, les pointés obtenus à partir des enregistrements des stations sismologiques (stations 2008 et stations 2010) pour lesquels le T0 a donc été obtenu à partir de l'onde sonore. Un récapitulatif est présenté dans le tableau 2.7.

Data	Id Source	Id Station	Id Temps observé.
Station 2008	1-30	1-36	1-860
Station 2010	31-52	37-73	861-1576
PS1PS2	53-89	74-158	1577-3182
PS3	90-109	159-206	3183-4073
PS4	110-129	207-254	4074-7960
PS5	130-144	255-278	4961-5304
PS6	145-160	279-302	5305-5682
PS7	161-176	303-326	5683-6052

Tableau 2.7 : Récapitulatif des Id utilisés pour les sources, stations et temps de propagation mesurés.

La figure 2.5 présente les graphes de la distance parcourue en fonction du temps de propagation de la première arrivée. Plusieurs remarques peuvent être faites:

- Il y a un décalage le long de l'axe des ordonnées pour les données relatives aux stations en 2008 et 2010 (points rouges et verts sur la figure 2.5). En première approximation, les droites de régression relatives aux données de 2008 et 2010 donnent une ordonnée à l'origine de l'ordre de 59 ms. Sur ces données, l'estimation du T0 a été effectuée en utilisant l'onde sonore et déterminé avec au plus 6 stations RUI00, RUI01, RUI02, THE00, THE01 et THE02. Le T0 a été défini en faisant la moyenne des T0 obtenus par les enregistrements de chacune des stations. Pour un même point de tir, l'écart entre le T0 minimum et maximum estimés est globalement compris entre 5 et 50 ms (figure 2.6) ce qui induit une incertitude importante sur le T0 et donc sur les temps de propagation. Cela peut être l'une des origines de ce décalage.
- Les données relatives aux stations de 2008 sont plus dispersées ce qui est là encore lié à l'incertitude du pointé et de l'estimation du T0.
- Les données relatives aux profils PS1-PS7 sont bien regroupés et avec une ordonnée à l'origine de l'ordre de 20 ms. Elles paraissent bien contraintes.

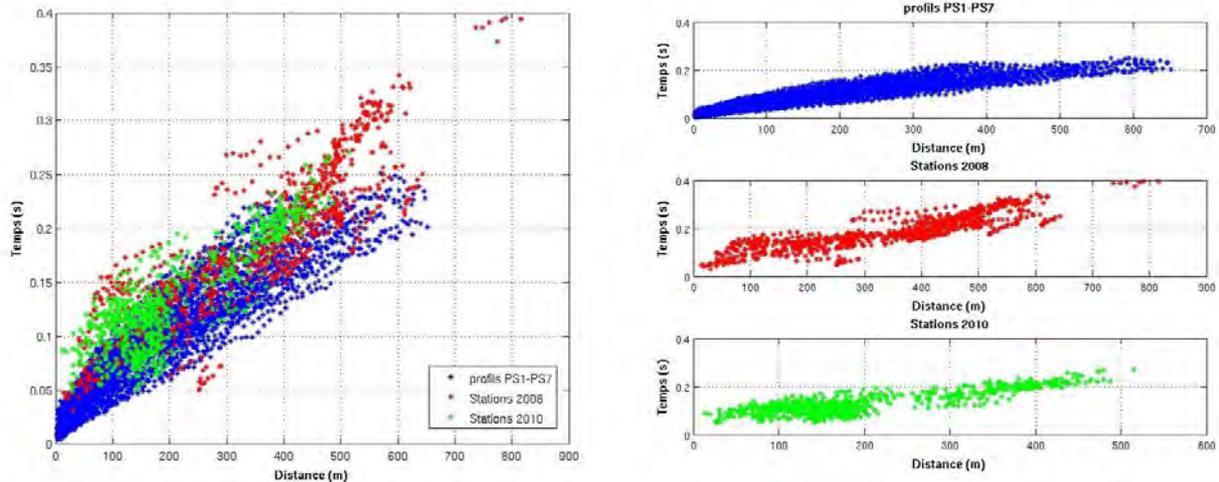


Figure 2.5: Graphes de la distance parcourue en fonction du temps de propagation de la première arrivée avec les pointés relatifs aux profils PS1 à PS7 en bleu, aux stations RUI,THE et GAL en 2008 en rouge et aux stations RUI,THE et GAL en 2010 en vert.

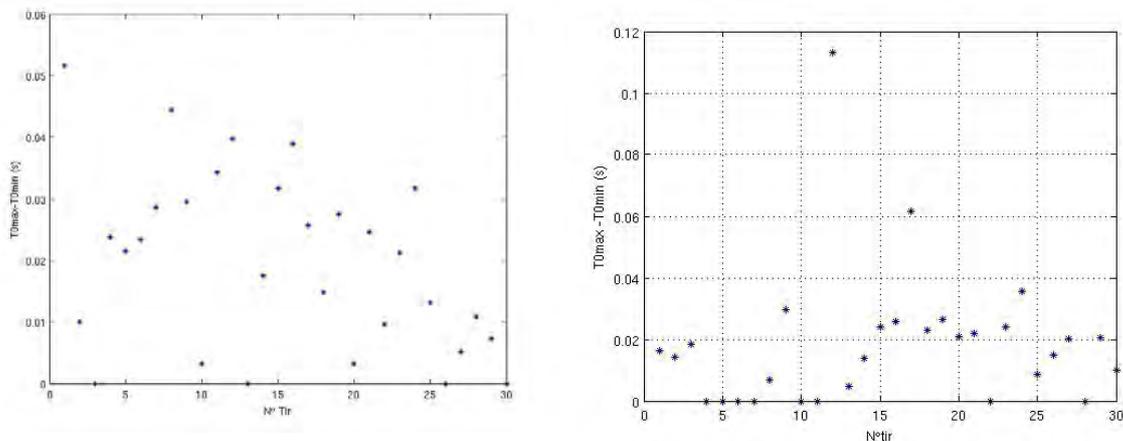


Figure 2.6: T0max -T0min obtenus pour chaque point de tir. Figure de gauche : données relatives aux stations 2010 et figure de droite : données relatives aux stations 2008.

2.3. Tentative d'inversion 3D avec TOMO-TV.

Afin d'obtenir un modèle 3D du glissement de terrain, nous avons tenté d'effectuer une tomographie sismique en 3 dimensions incluant ainsi les données relatives aux stations sismologiques et aux profils PS1-PS7. Pour cela, une tentative d'inversion de l'ensemble des données sélectionnées a été effectuée en utilisant une méthode tomographique basée sur le calcul des temps de trajet effectué par résolution de l'équation Eikonal par différences finies (Potvin & Lecomte, 1991) avec le logiciel TOMO_TV (J. Virieux).

Différentes modélisations directes et une étude des résidus résultants ont d'abord été effectuées afin de définir l'influence du modèle initial et de mettre en évidence d'éventuelles anomalies liées aux sources ou aux stations.

2.3.1 Modèle initial utilisé.

Un modèle de départ a été construit de façon à inclure tous les récepteurs et sources utilisés dans la base de données selon les paramètres ci dessous. Il comprend 84x82x63 cellules (XxYxZ). Chaque cellule a une taille de 16x16x16 m.

Dans ce modèle, l'interface sol-air a été défini à partir du modèle numérique de terrain constitué de maille de 5 m X 5 m.

Le poids relatif à chaque temps pointés est fixé à 1.

L'incertitude sur les temps pointés est fixée à 5ms ou 15 ms.

Différents tests ont été effectués avec un modèle de vitesse variable avec ou sans gradient de vitesse.

Exemple de paramètres utilisés pour définir le modèle initial :

Fichier Run_model

-1093.7 -649.15 300 xinv yinv zinv (origin of the grid)

84 82 63 nxinv nyinv nzinv

16. 16. 16. dx dy dz 16. 16. 16.

-1093.7 -649.15 300 xfwd yfwd zfwd (origin of the fwd grid)

164 160 122 nxfwd nyfwd nzfwd

8. dx=dy=dz=8

1 1 1 zone d'inversion

2.3.2 Études des résidus après modélisations directes.

Différentes modélisations directes et une étude des résidus résultants ont d'abord été effectuées afin de définir l'influence du modèle initial et de mettre en évidence d'éventuelles anomalies liées aux sources ou aux stations. Pour cela, seules les données relatives aux profils PS1-PS7 pour lesquels le temps de propagation est bien contraint, ont été utilisées.

L'étude qui suit porte sur :

1. Influence du nombre de cellules utilisées pour définir le gradient dans l'air.
2. Influence du gradient de vitesse utilisé dans le sol.
3. Influence de la vitesse dans la zone saine .
4. Influence de l'épaisseur de la zone déstructurée.
5. Tentative avec un modèle à épaisseur variable
6. Tentative d'inversion des profils PS1-PS7.
7. Tentative de modélisation avec profils PS1-PS7+ stations sismologiques

2.3.2.1. Influence du nombre de cellules utilisées pour définir le gradient dans l'air.

L'utilisation de modèle avec un passage brusque de la vitesse dans le sol à une vitesse dans l'air de 330 m/s met en évidence de nombreux problèmes de convergence des rayons et une augmentation de l'erreur RMS quand le nombre d'itérations augmente. Afin d'analyser ce problème, nous avons testé différents modèles initiaux en introduisant un gradient de vitesse dans l'air au niveau de la surface libre (surface topographique).

Modèle utilisé :

1 cellule = 16m.

Les tests ont été effectués sur un modèle avec gradient dans le sol : 1500-4000 m/s sur une épaisseur de 96 m et l'on a fait varier le nombre de cellules utilisées pour le gradient dans l'air au dessus de la surface topographique :

- 1 cellule à 330 m/s
- 2 cellules à 915 et 330 m/s.
- 3 cellules à 1100, 720 et 330 m/s
- 4 cellules à 1208, 916, 624 et 330 m/s

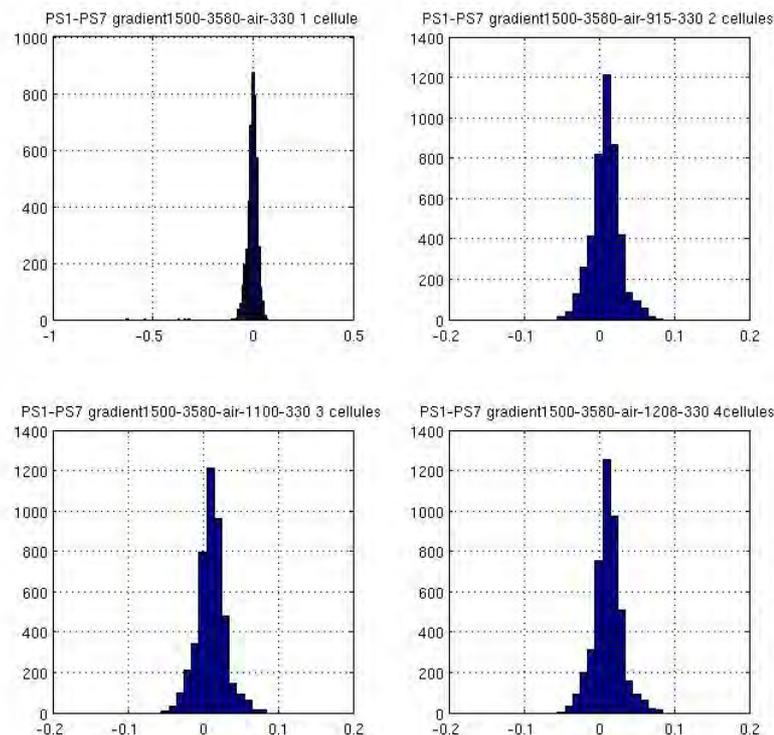


Figure 2.7 : Histogrammes des résidus des temps pointés pour le modèle 1500-4000 m/s dans le sol en fonction du nombre de cellules utilisées pour le gradient dans l'air. Largeur de classe=0.01s.

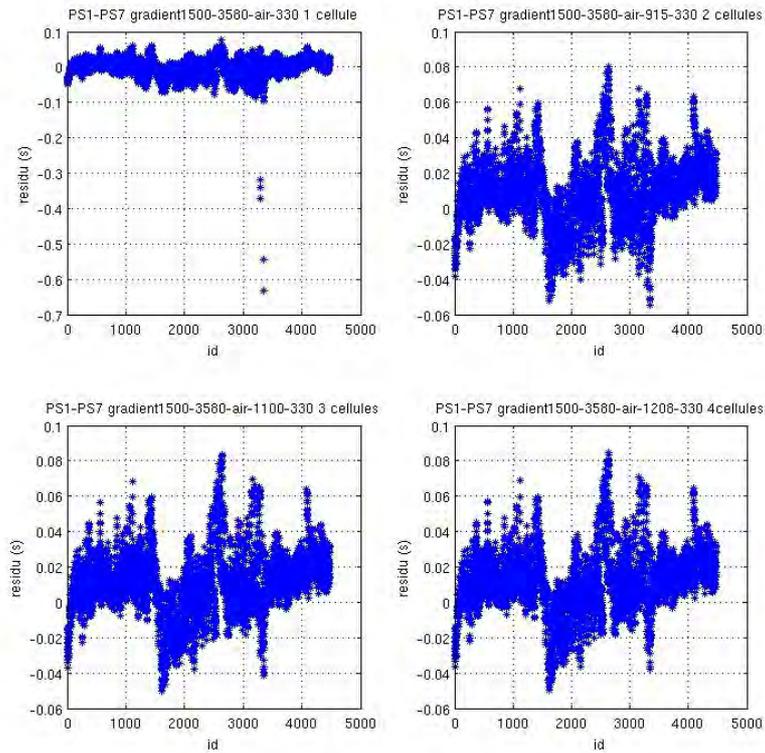


Figure 2.8 : Résidus des temps pointés pour le modèle 1500-4000 m/s dans le sol en fonction du nombre de cellules utilisées pour le gradient dans l'air.

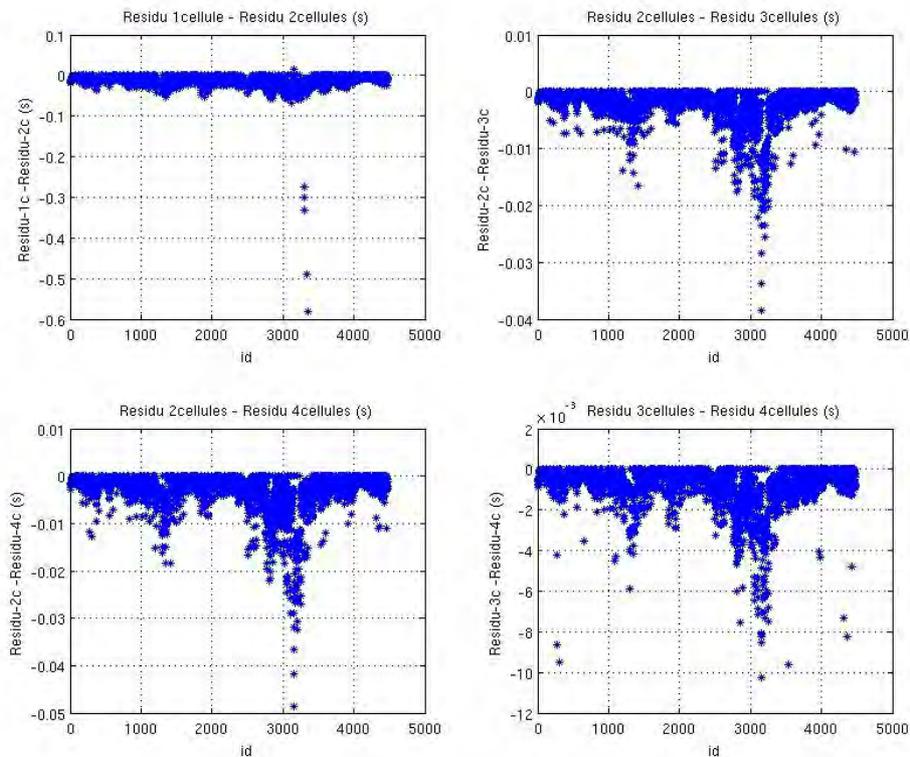


Figure 2.9 : Différence des résidus des temps pointés pour le modèle 1500-4000 m/s dans le sol en fonction du nombre de cellules utilisées pour le gradient dans l'air.

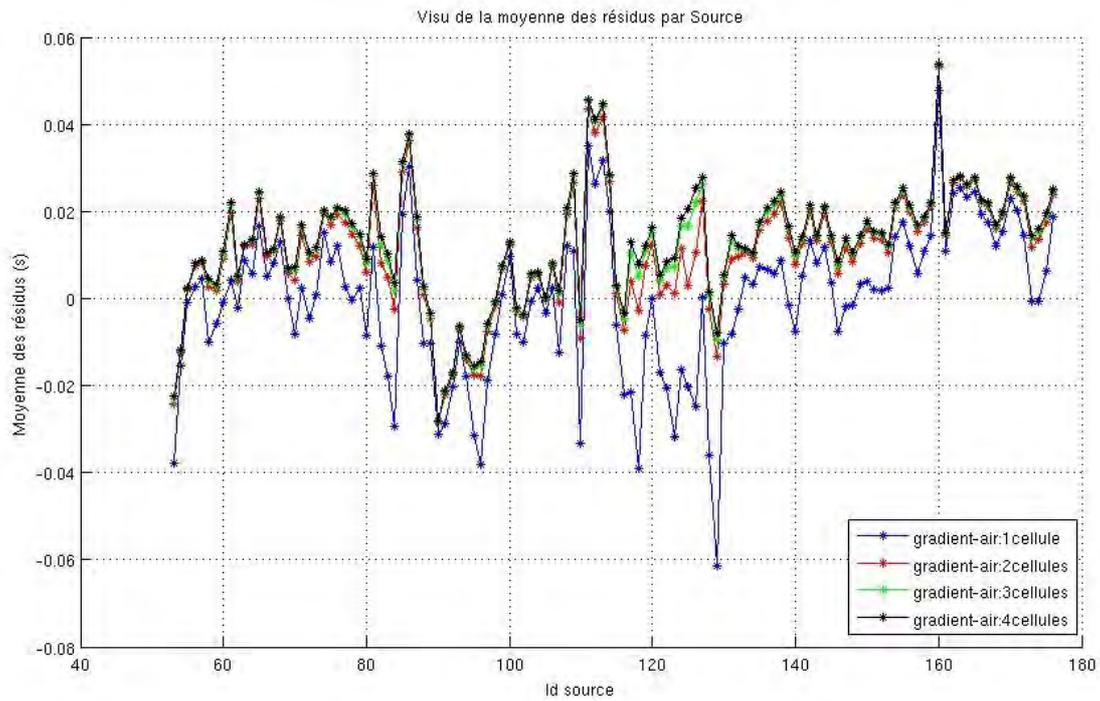


Figure 2.10: Résidus par source pour le modèle 1500-4000 m/s dans le sol en fonction du nombre de cellules utilisées pour le gradient dans l'air.

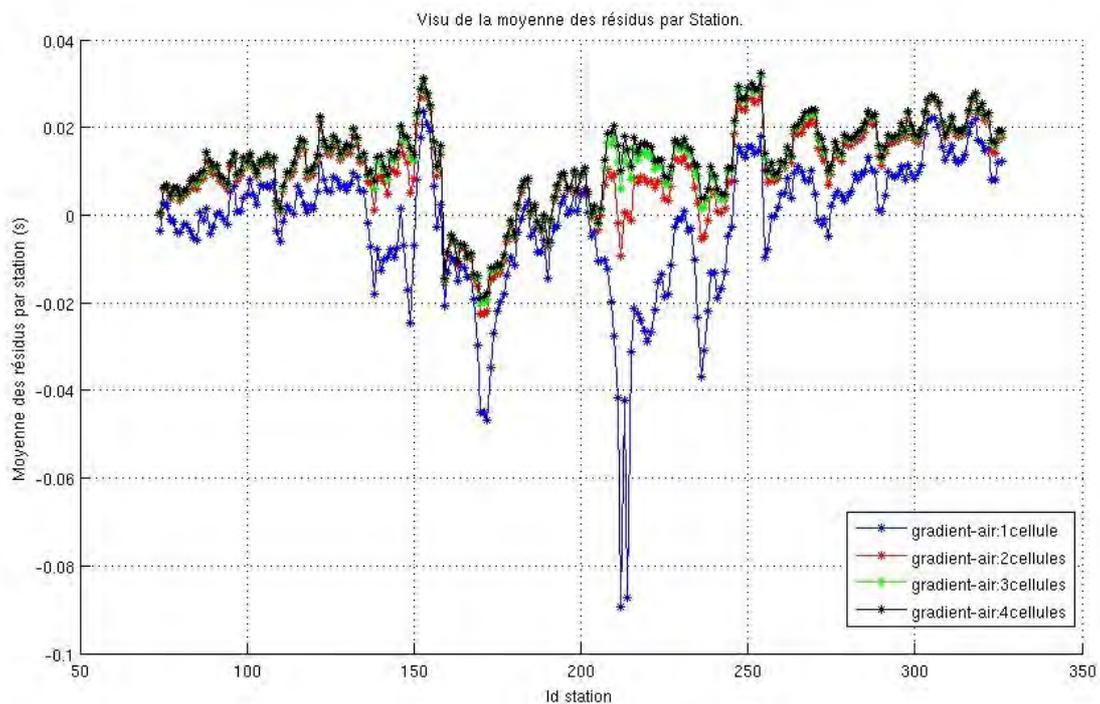


Figure 2.11 : Résidus par station pour le modèle 1500-4000 m/s dans le sol en fonction du nombre de cellules utilisées pour le gradient dans l'air.

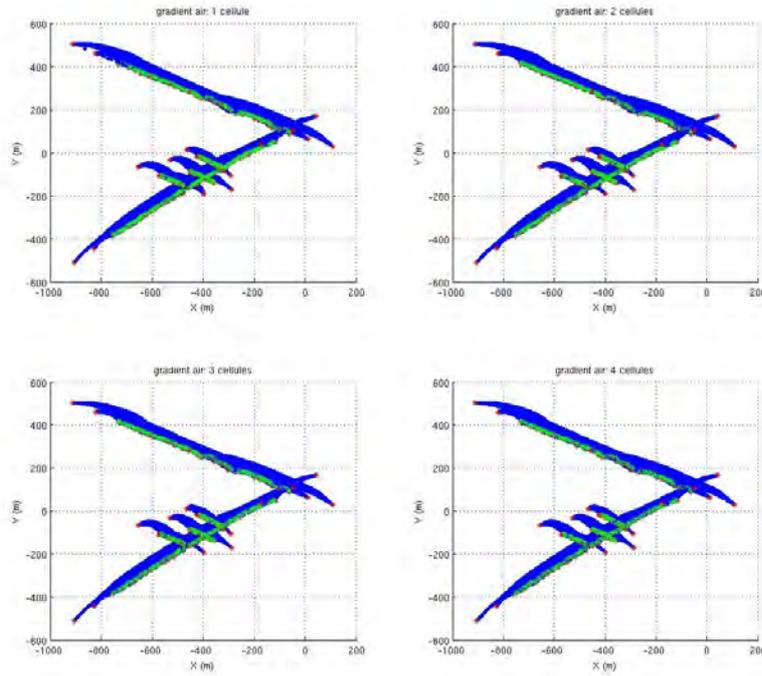


Figure 2.12 : Rayons obtenus par modélisation directe avec 1,2,3 et 4 cellules pour le gradient dans l'air. Projection dans un plan XY. Modèle initial avec vitesse de 1500_4000 m/s.

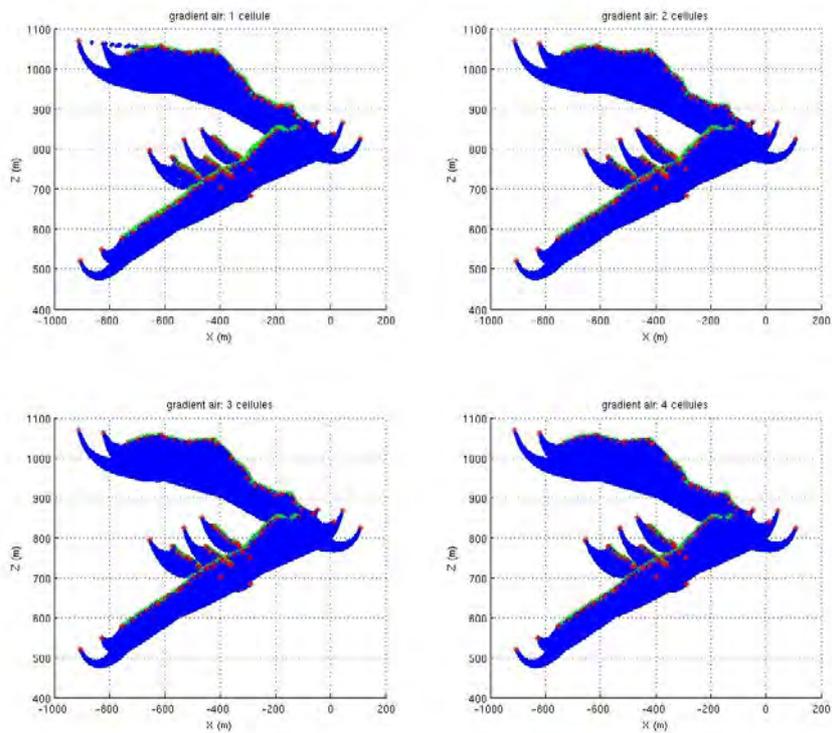


Figure 2.13 : Rayons obtenus par modélisation directe avec 1,2,3 et 4 cellules pour le gradient dans l'air. Projection dans un plan XZ. Modèle initial avec vitesse de 1500_4000 m/s.

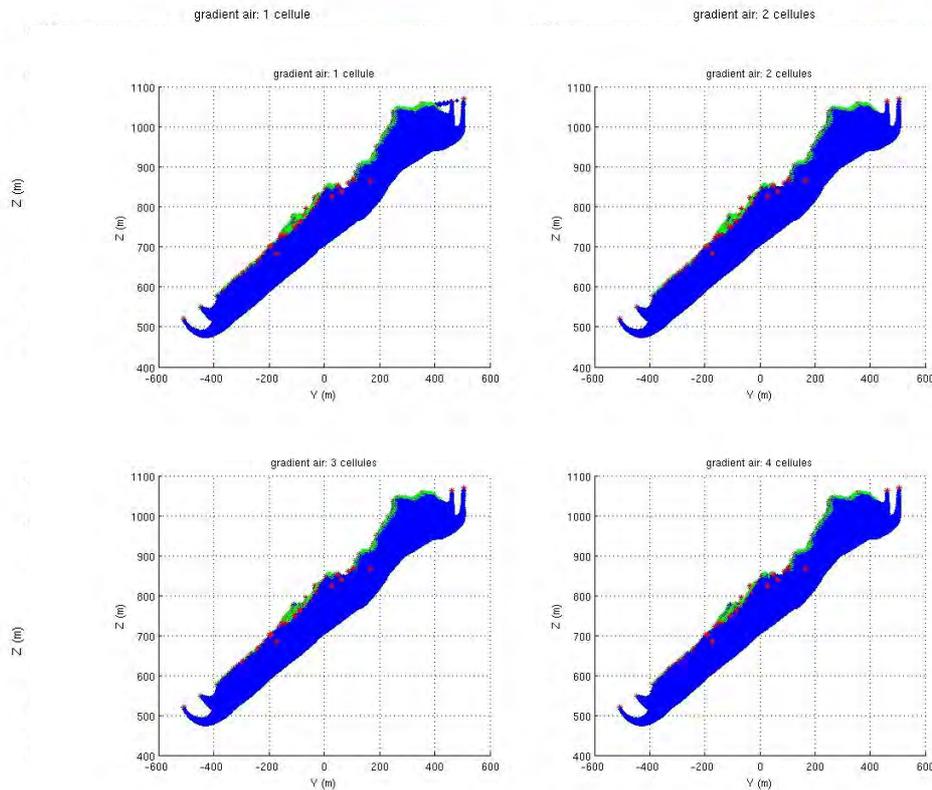


Figure 2.14 : Rayons obtenus par modélisation directe avec 1,2,3 et 4 cellules pour le gradient dans l'air. Projection dans un plan YZ. Modèle initial avec vitesse de 1500_4000 m/s.

On ne note pas de différence notable sur les résidus (figures 2.7 et 2.8) entre un gradient dans l'air défini sur 2, 3 ou 4 cellules. Par contre, le passage de 1 cellule à plusieurs cellules pour définir le gradient dans l'air fait diminuer les résidus de façon importante.

La différence des résidus en fonction du nombre de cellules utilisées (figure 2.9) montre que plus le nombre de cellules utilisées pour le gradient de vitesse dans l'air est grand, plus les résidus augmente d'un Δt positif.

Les résidus par station et par source montrent que le passage d'une cellule à plusieurs cellules (2, 3 ou 4 cellules) pour définir le gradient de vitesse dans l'air :

- fait disparaître globalement les résidus les plus anormaux (figures 2.10 et 2.11)
- décale d'un Δt positif l'ensemble des résidus par stations ou par source lorsque que l'on passe d'une cellule à plusieurs cellules (2, 3 ou 4) pour la définition du gradient dans l'air.

Les résidus obtenus par station ou par source sont globalement stables lorsque l'on utilise 2, 3 ou 4 cellules pour le gradient de vitesse dans l'air et l'augmentation est quasiment nulle lorsque l'on passe de 3 à 4 cellules (figure 2.9).

Le nombre de rayons présentant des problèmes de convergence diminue lorsque le nombre de cellules augmente pour finalement totalement disparaître lorsque l'on utilise 4 cellules.

Enfin, l'introduction d'un gradient de vitesse dans l'air ne modifie pas de façon probante la propagation des rayons dans le sol (voir figures 2.12, 2.13 et 2.14).

Pour la suite des tests, on a choisi un gradient dans l'air à 4 cellules.

2.3.2.2. Influence du gradient de vitesse utilisé dans le sol.

L'étude ici a porté sur l'influence du gradient de vitesse sur les résidus et sur le tracé de rayons. Pour cela, nous avons effectué deux séries de tests : modélisation directe en utilisant une vitesse dans la zone saine de 3000 ou 4000 m/s et en faisant varier le gradient de vitesse dans la zone non saine. L'épaisseur de la zone non saine est de 96 m en accord avec les résultats obtenus à partir des tomographie en 2D (Meric et al, 2005 et Le Roux et al, 2011).

1er test : Vitesse zone saine=3000 m/s :

Gradient de vitesse zone non saine (2000-3000 m/s) + gradient dans l'air (1500-1100-700-330 m/s)
Gradient de vitesse zone non saine (1700-3000 m/s) + gradient dans l'air (1500-1100-700-330 m/s)
Gradient de vitesse zone non saine (1500-3000 m/s) + gradient dans l'air (1300-980-660-330 m/s)
Gradient de vitesse zone non saine (1200-3000 m/s) + gradient dans l'air (983-766-549-330 m/s)
Gradient de vitesse zone non saine (1000-3000 m/s) + gradient dans l'air (833-666-479-330 m/s)

2ème test : Vitesse zone saine=4000 m/s :

Gradient de vitesse zone non saine (2000-4000 m/s) + gradient dans l'air (1500-1100-700-330 m/s)
Gradient de vitesse zone non saine (1700-4000 m/s) + gradient dans l'air (1500-1100-700-330 m/s)
Gradient de vitesse zone non saine (1500-4000 m/s) + gradient dans l'air (1300-980-660-330 m/s)
Gradient de vitesse zone non saine (1200-4000 m/s) + gradient dans l'air (983-766-549-330 m/s)
Gradient de vitesse zone non saine (1000-4000 m/s) + gradient dans l'air (833-666-479-330 m/s)

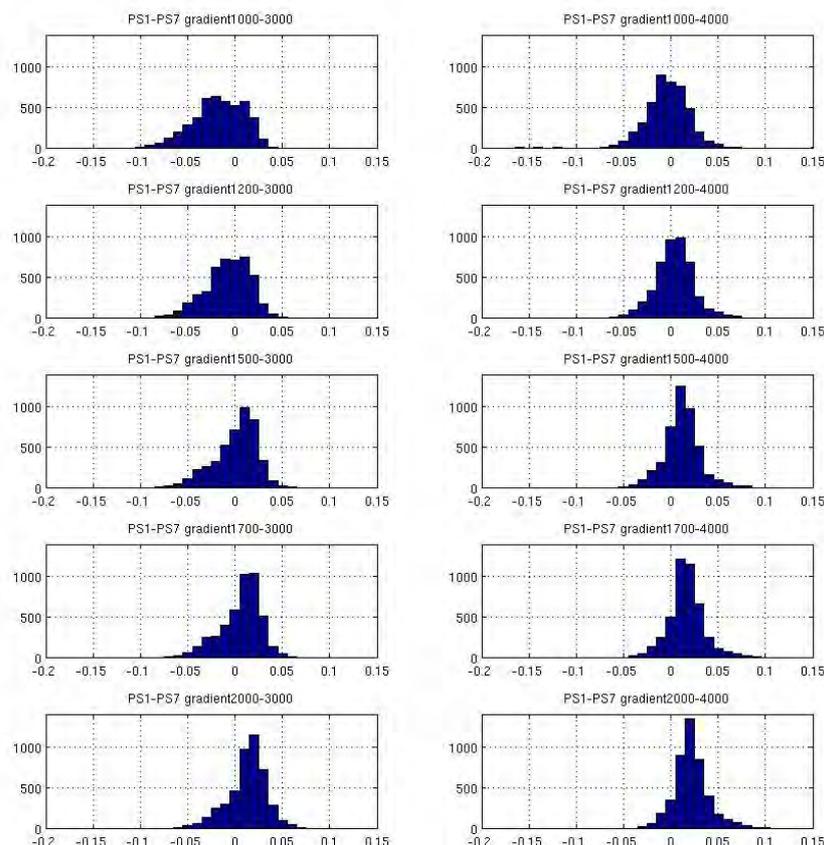


Figure 2.15: Comparaison des histogrammes obtenus avec une vitesse dans la zone saine de 3000 m/s (colonne de gauche) ou 4000 m/s (colonne de droite) pour différents gradients de vitesse dans la zone non saine .

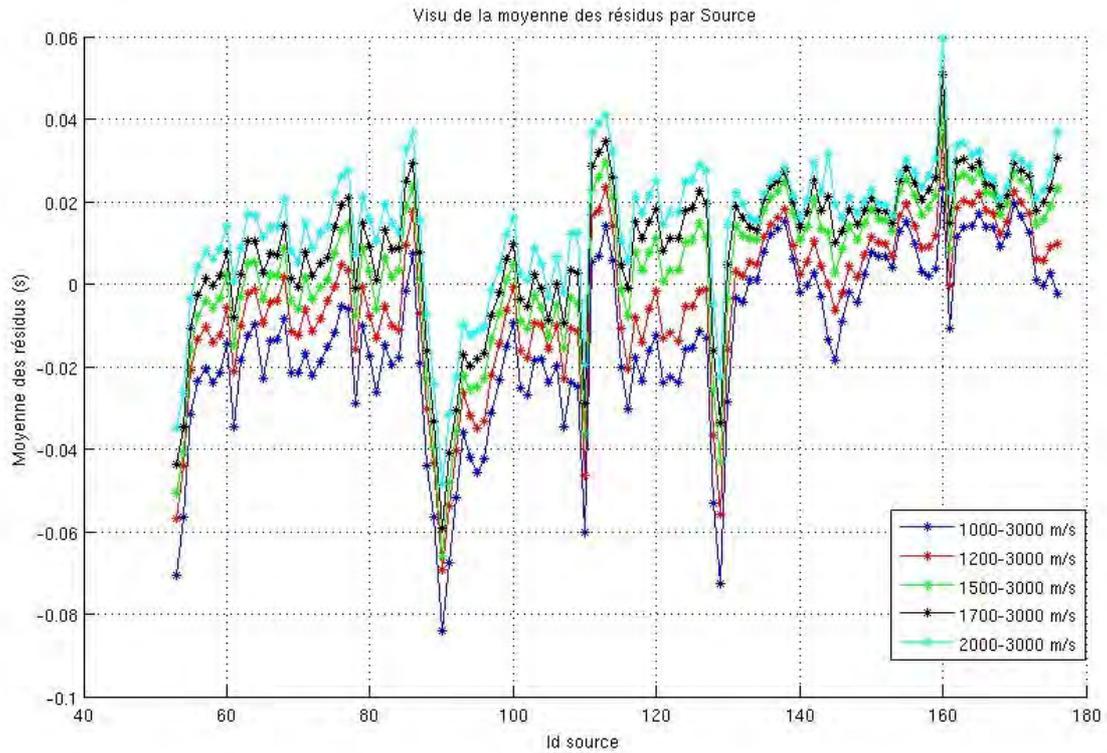


Figure 2.16: Résidus par source avec des gradients de vitesses variables. Vitesse zone saine= 3000 m/s. Gradient dans l'air avec 4 cellules.

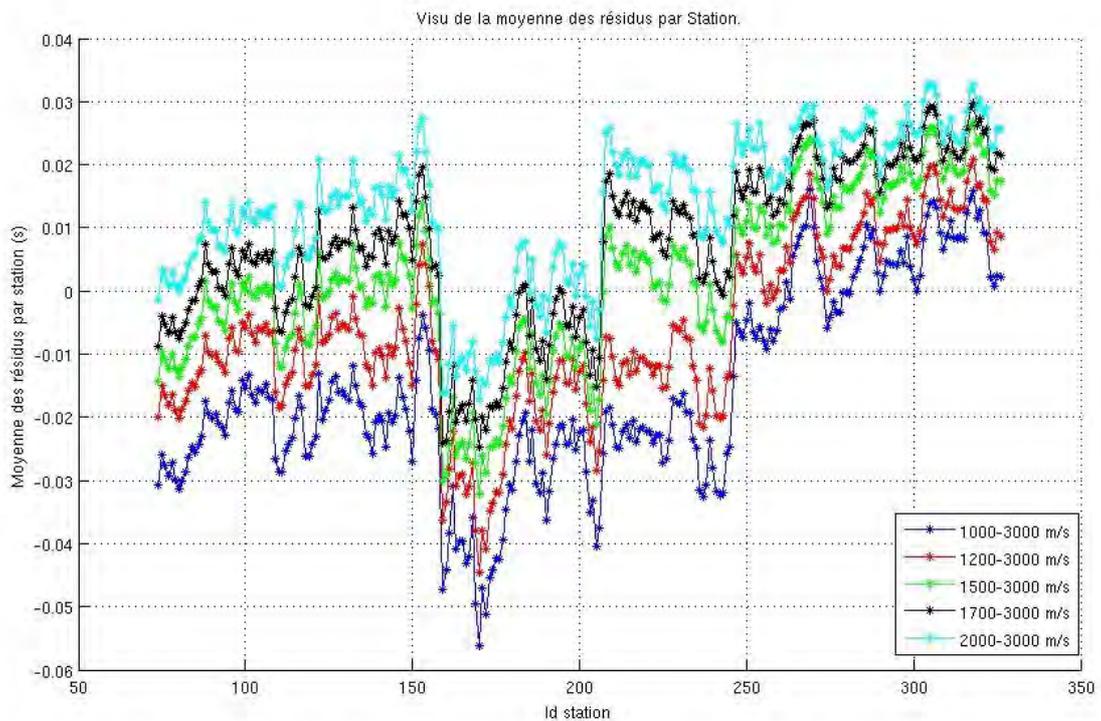


Figure 2.17: Résidus par station avec des gradients de vitesses variables. Vitesse zone saine= 3000 m/s. Gradient dans l'air avec 4 cellules.

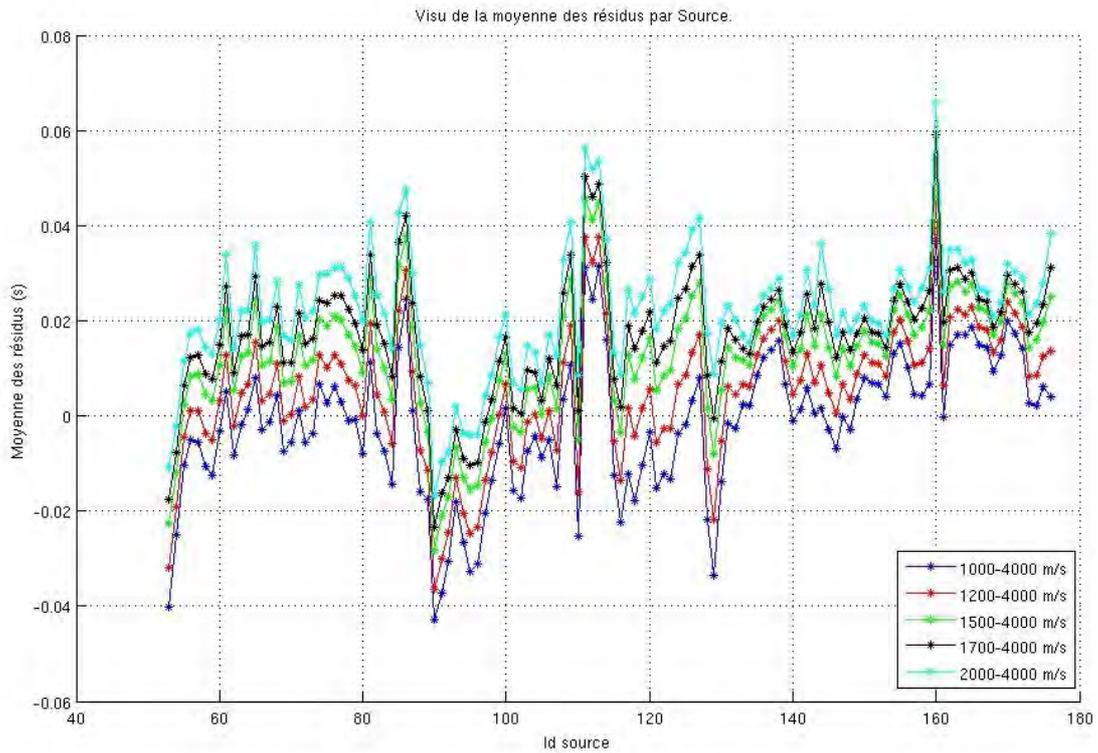


Figure 2.18: Résidus par source avec des gradients de vitesses variables. Gradient dans l'air avec 4 cellules. Vitesse zone saine=4000 m/s.

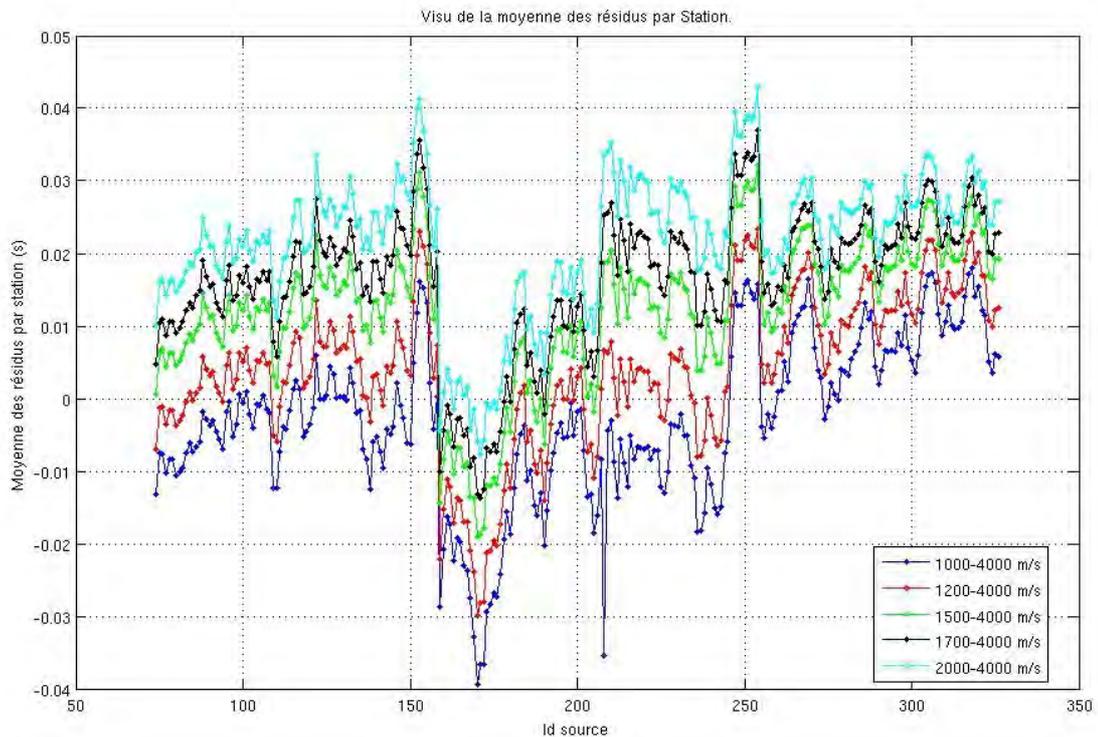


Figure 2.19: Résidus par station avec des gradients de vitesses variables. Gradient dans l'air avec 4 cellules. Vitesse zone saine=4000 m/s.

Globalement, l'évolution des gradients de vitesse dans le sol de 1000-3000 m/s à 2000-3000 m/s ou de 1000-4000 m/s à 2000-4000 m/s induit logiquement un décalage progressif des résidus d'un Δt positif (figure 2.15). Cette remarque est également valable au niveau des résidus par station ou par source (figures 2.16 à 2.19). D'autre part, le changement de gradient de vitesse ne corrige pas d'éventuels résidus anormaux. Ceci indique que ces anomalies sont sans doute liées à des variations d'épaisseur de la couche déstructurée (non saine).

On note de gros problèmes de convergence lorsque l'on utilise un gradient 1000-3000 ou 1000-4000 m/s. Pour les gradients avec une vitesse en surface égale ou supérieure à 1200 m/s, ces problèmes de convergence disparaissent quasiment ou totalement.

L'étude du tracé de rayon ne présente pas de variations probantes en profondeur quel que soit le modèle choisi.

2.3.2.3. Influence de la vitesse dans la zone saine.

Les tests ont été effectués avec des gradients de vitesses allant jusqu'à 3000 et 4000 m/s dans la zone déstructurée et une vitesse respectivement de 3000 ou 4000 m/s dans la zone saine.

Gradient de vitesse (m/s)	1000-3000 ou 1000-4000	1200-3000 ou 1200-4000	1500-3000 ou 1500-4000	1700-3000 ou 1700-4000	2000-3000 ou 2000-4000
Moyenne des résidus avec un gradient de vitesse jusqu'à 3000 m/s	-0.0170	-0.0076	0.0008	0.0063	0.0126
Moyenne des résidus avec un gradient de vitesse jusqu'à 4000 m/s	-0.0034	0.0036	0.0118	0.0161	0.0216

Tableau 2.8. Moyenne des résidus pour les modèles avec gradient dans l'air.

Globalement, lorsque que l'on compare les histogramme de la figure 2.15, on remarque logiquement un décalage d'un Δt positif des résidus lorsque que l'on utilise une vitesse de 4000 m/s au lieu d'une vitesse de 3000 m/s dans la zone saine. L'histogramme le plus centré sur zéro et ayant la forme d'une courbe gaussienne et la moyenne des résidus la plus faible (à l'exception de la moyenne obtenue avec un gradient de 1500-3000 m/s, (voir tableau 2.8)) est le modèle avec un gradient de 1200 à 4000 m/s et une vitesse de 4000 m/s dans la zone saine.

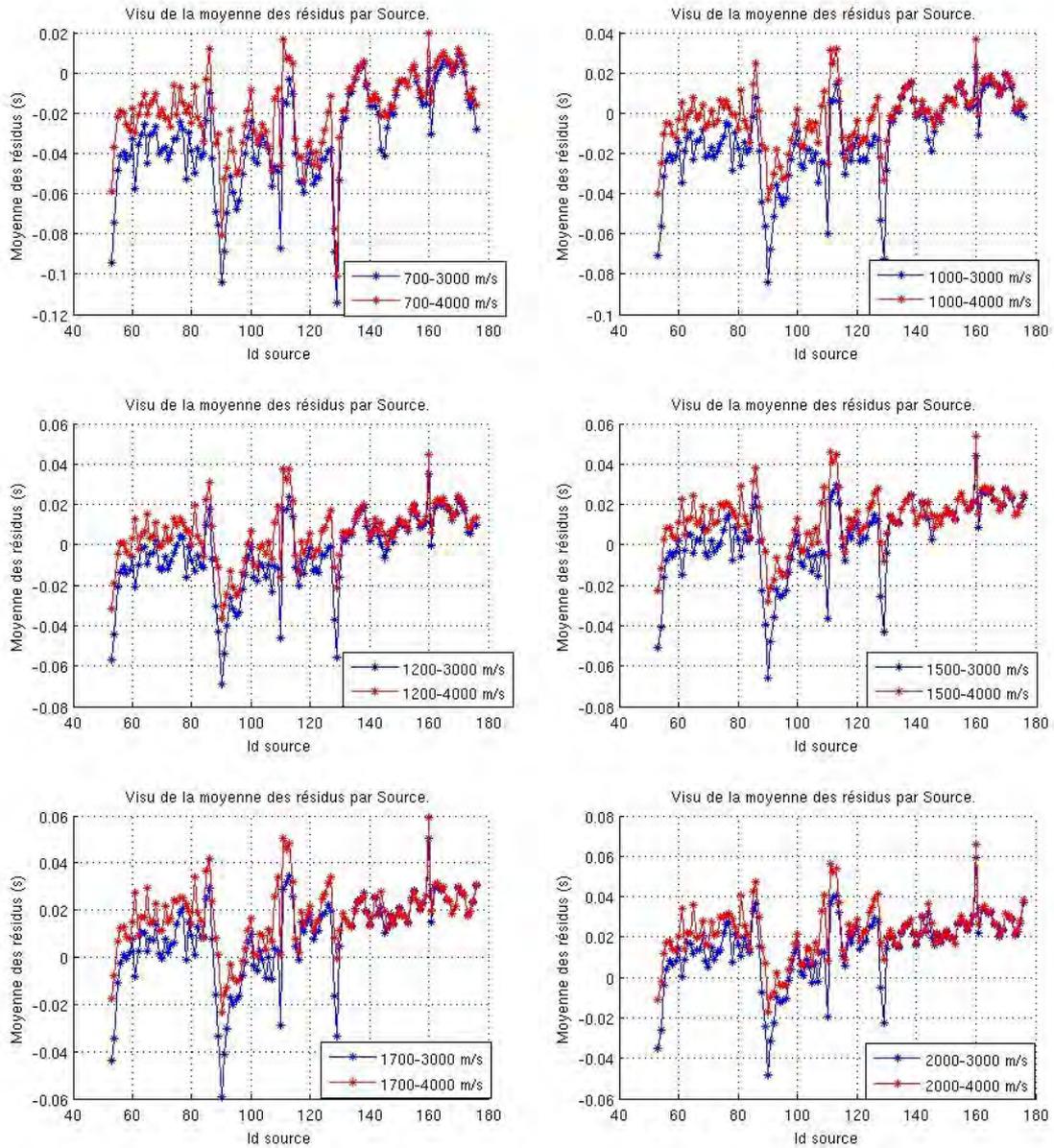


Figure 2.20 : Résidus par source avec des vitesses dans la zone saine de 3000 et 4000 m/s. Gradient dans l'air avec 4 cellules. Gradients de vitesse variables dans la zone déstructurée.

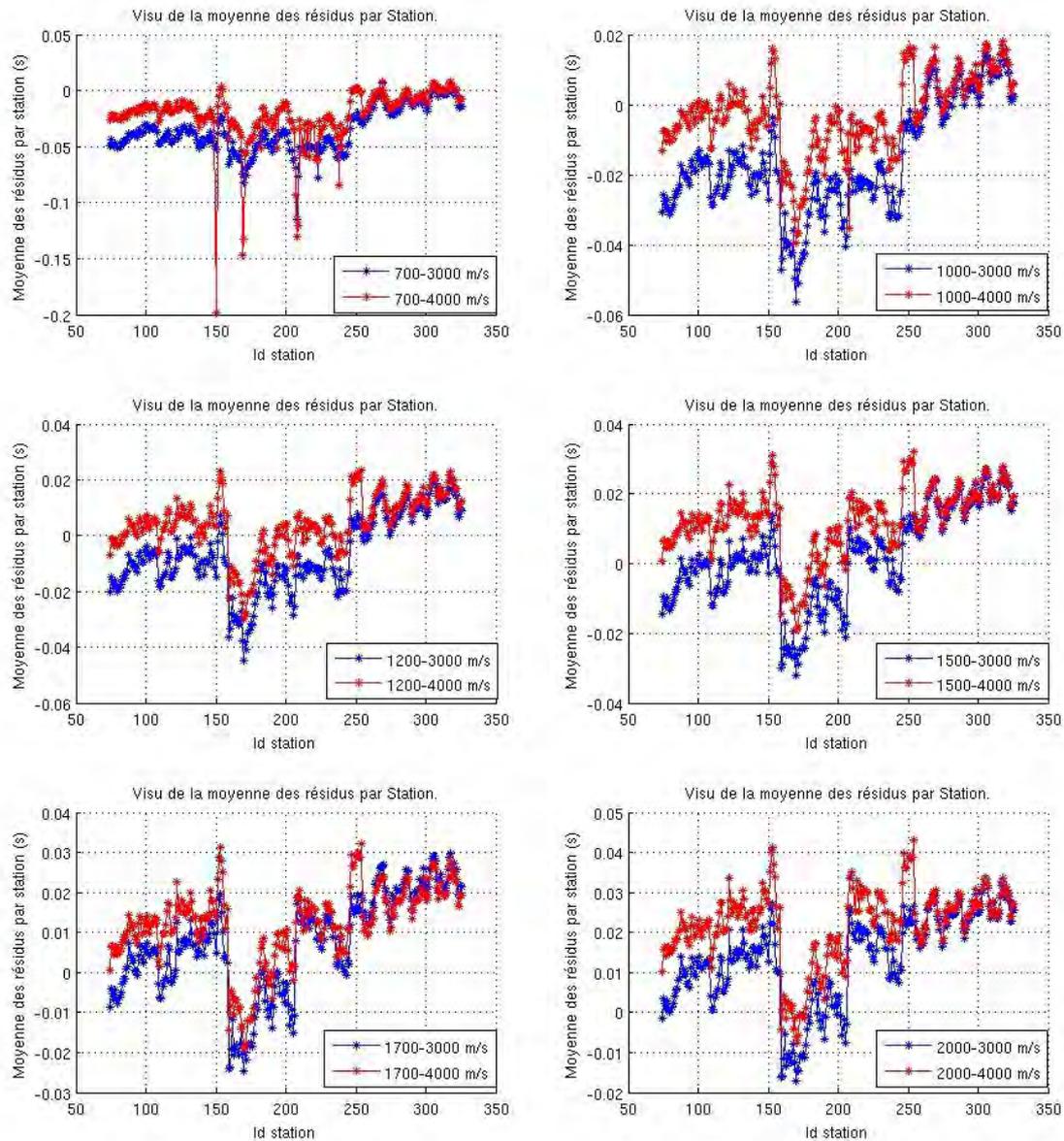


Figure 2.21 : Résidus par station avec des vitesses dans la zone saine de 3000 et 4000 m/s. Gradient dans l'air avec 4 cellules.

Les résidus par source et par station (figures 2.20 et 2.21) mettent en évidence :

- des résidus identiques avec une vitesse de 3000 ou 4000 m/s dans la zone saine pour les sources au delà de 130 et les stations au delà de 255. Cela correspond aux profils PS5, PS6 et PS7 qui sont des profils avec des dépôts maximums plus restreints que les autres profils. Une explication possible est qu'avec la configuration d'acquisition les ondes réfractées n'atteignent pas la zone saine. Dans ce cas, il est possible de déterminer quel est le gradient le plus adapté dans la zone déstructurée sans intervention de la vitesse dans la zone saine. Les résidus sont minimisés pour un gradient compris entre 700-3000, 700-4000 m/s et 1000-3000, 1000-4000 m/s. Un gradient intermédiaire 850_3000 ou 850-4000 m/s semble correspondre à une minimisation optimum les résidus au niveau de PS5, PS6 et PS7. On peut suggérer que le gradient de vitesse dans la zone déstructurée commence en surface avec une vitesse de l'ordre de 850 m/s au niveau de PS5, PS6 et PS7.

- Le modèle avec une vitesse de 4000 m/s permet d'éliminer certains résidus anormaux principalement pour les résidus par source (figure 2.20).
- On constate des résidus négatifs importants au niveau des stations 159 à 206 avec une vitesse à 3000 m/s dans la zone saine et au niveau des stations 159-170 avec une vitesse de 4000 m/s (cela correspond aux stations du profil PS3 (figure 2.21)). La remarque est identique pour les résidus par source (résidus négatifs entre les stations 90-100). Une explication peut être la surévaluation de l'épaisseur de la zone non saine sous le profil PS3 (Source du 90-100, Station 159-170). L'épaisseur choisie initialement pour les calculs est de 96 m alors que les tomographies 2D montrent à cet endroit des épaisseurs beaucoup moins importantes.
- Il existe des problèmes de convergence pour les gradients 1000-3000, 1000-4000 et 1200-4000 m/s exceptés avec les sources relatives aux profils PS5-PS7. Avec les gradients de vitesse supérieurs à 1200-4000 m/s ou 1200-3000 m/s il n'y a plus de problème de convergence.

2.3.2.4. Influence de l'épaisseur de la zone déstructurée.

Des tests ont été effectués en utilisant des modèles homogènes latéralement avec une épaisseur de la zone déstructurée de

- 48 m (3 cellules)
- 80 m (5 cellules)
- 96 m (6 cellules)
- 144 m (9 cellules)

TEST 1: Le gradient de vitesse choisi est 850-4000 m/s (gradient cohérent avec l'étude des profils PS5, PS6 et PS7) et la vitesse dans la zone saine est de 4000 m/s.

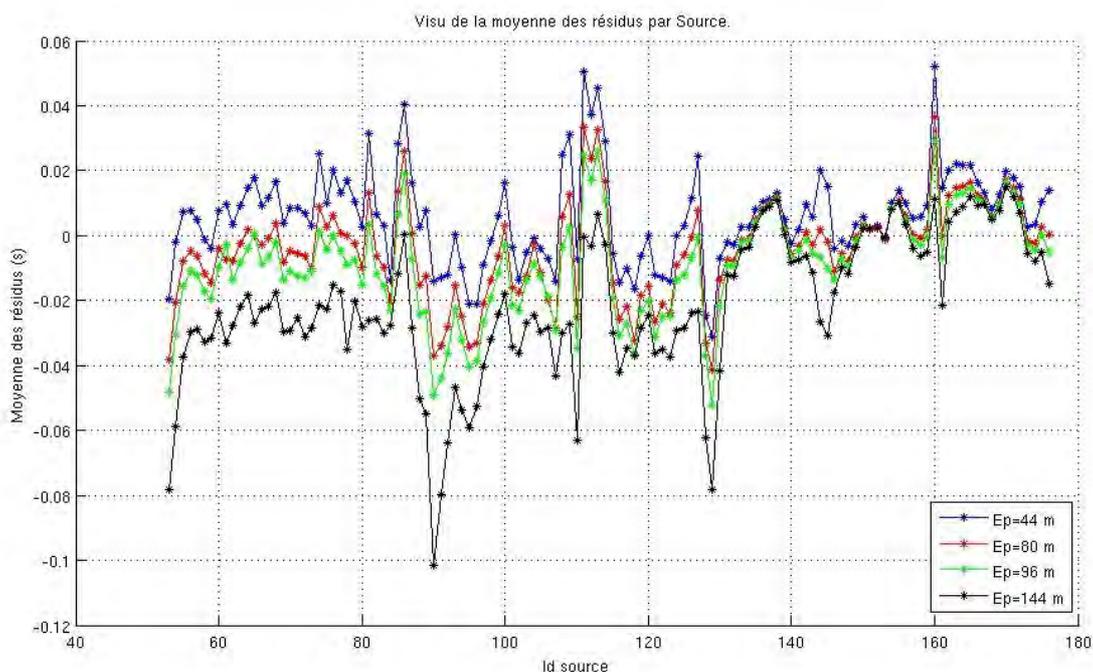


Figure 2.22 : Résidus par source en fonction de l'épaisseur de la zone déstructurée (48, 80, 96 et 144

m). Gradient de vitesse dans le zone saine=850-4000 m/s.

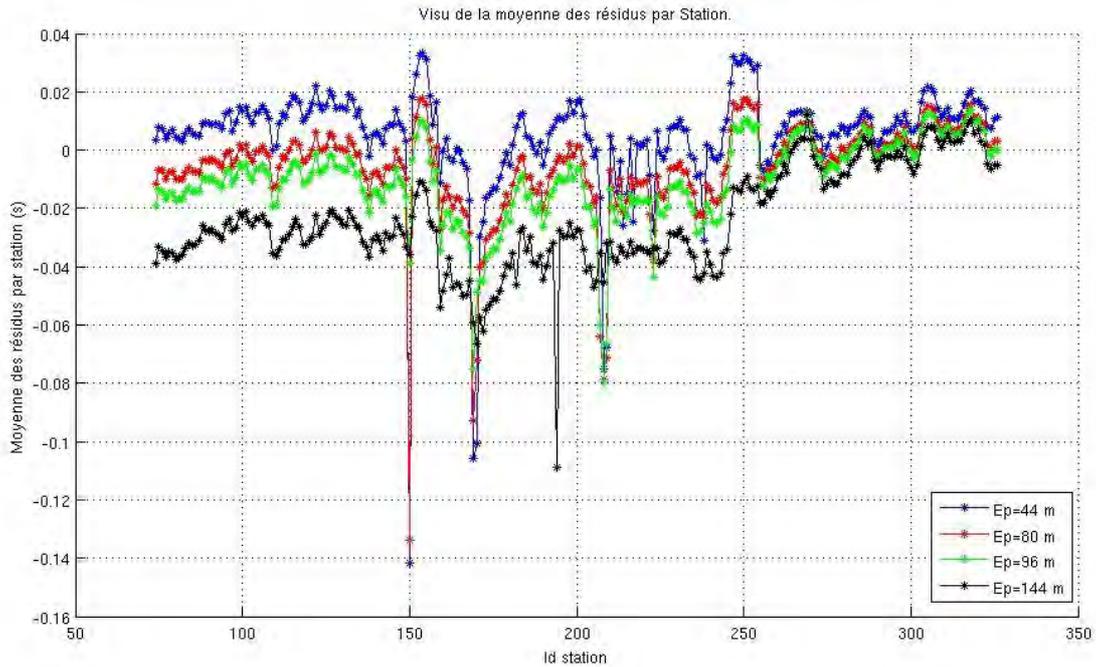


Figure 2.23: Résidus par station en fonction de l'épaisseur de la zone déstructurée (48, 80,96 et 144 m). Gradient de vitesse dans le zone saine=850-4000 m/s.

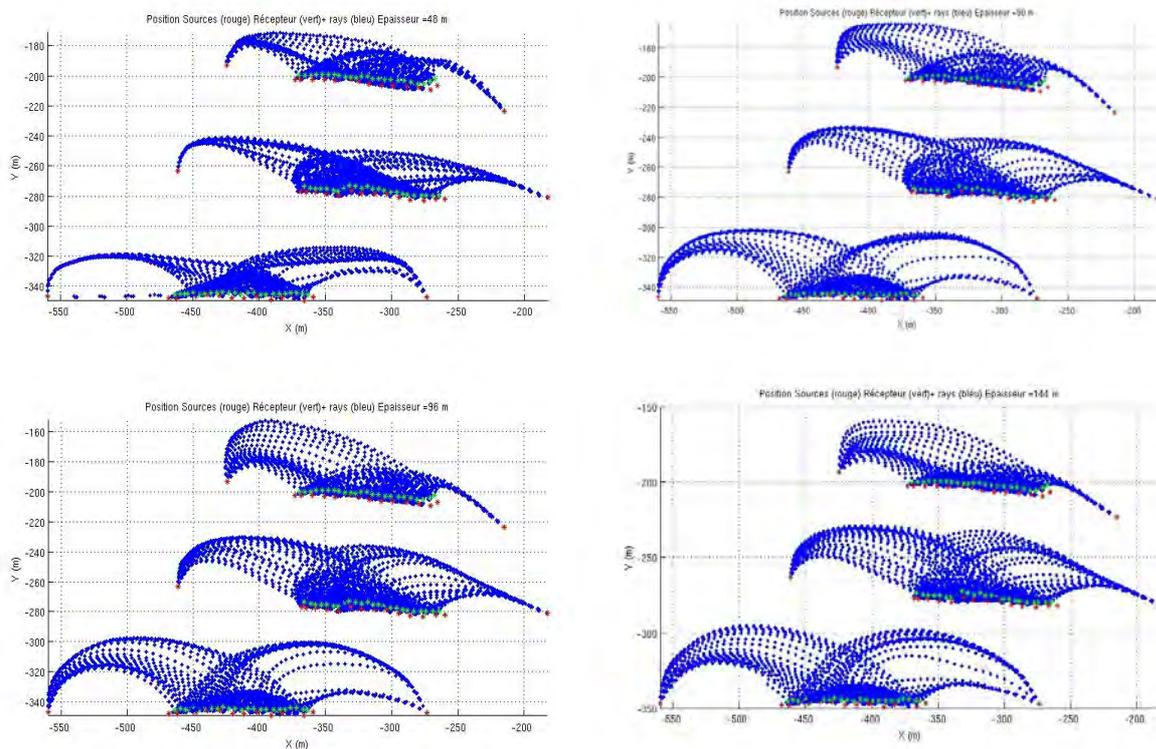


Figure 2.24: Rayons obtenus par modélisation directe des profils PS5, PS6 et PS7(du sud au nord). Projection dans un plan XY après rotation du repère XY le long de PS5. Modèle initial avec vitesse de 850_4000 m/s.

D'une façon générale, on observe logiquement un décalage des résidus par sources ou par stations (figures 2.22 et 2.23) d'un ΔT positif lorsque que l'épaisseur diminue exceptés pour les profils

PS5-PS6-PS7 dont les résidus restent quasi constants. Certaines anomalies ponctuelles apparaissent ou disparaissent en fonction de l'épaisseur introduite .

- Pour les profils PS5, PS6 et PS7 (sources de 130 à 176 et stations de 255 à 326) :

Pour les épaisseurs 144, 96 m, il y a très peu d'influence sur les résidus par source et par station (figure 2.22 et 2.23). On remarque que les rayons sont quasi identiques (figure 2.24) : cela signifie que les rais n'atteignent pas la zone saine et restent essentiellement localisés en surface. Les décalages des résidus sont dus simplement au gradient de vitesse qui n'évolue pas de façon identique avec la profondeur. Ceci est cohérent avec les résultats obtenus avec analyses des ondes de surface. Par contre, on note des résidus un peu plus élevés pour le modèle avec une épaisseur de 48 m (figure 2.22 et 2.23) et des rayons très différents de ceux obtenus pour des épaisseurs plus importantes (figure 2.24). Cela montre qu'une épaisseur de 48 m n'est pas suffisante pour expliquer les temps de propagations obtenus. Enfin, les rayons avec une épaisseur de 80 m diffèrent très légèrement de ceux obtenus avec une épaisseur plus importante (96 et 144 m) ce qui signifie que l'on est à la limite de l'épaisseur cohérente avec les temps de propagation mesurée. En d'autres termes, sous PS5-PS7, l'épaisseur moyenne de la zone déstructurée est d'au moins 80 m à l'aplomb des profils.

- Pour le profil PS3 (Id sources 90 à 109, Id stations de 159 à 206) : l'anomalie négative des résidus observées au niveau des sources 90 à 100 et des stations 159 à 170 tend à disparaître lorsque que l'épaisseur de la zone déstructurée diminue. Ceci signifie que dans la zone relative à ces stations et sources, l'épaisseur de la zone déstructurée est plus faible qu'ailleurs (cohérent avec les modèles obtenus par la tomographie 2D). La remarque est identique au niveau des sources de PS1 53 et 54 (sources à l'extrémité sud du profil PS1) .

- Inversement, au niveau des sources 109-115 (fin du profil PS3, début du profil PS4), les résidus sont considérablement réduits lorsque l'on augmente l'épaisseur de la zone déstructurée. La remarque est identique pour les stations 240-254 (fin du profil PS4) et les stations 150-158 (fin du profil PS2).

- Avec une épaisseur de 144 m, on note des problèmes de convergence au niveau des sources relatives à PS3 et avec une épaisseur de 48 m, on note des problèmes de convergence pour toutes les sources exceptées pour les sources relatives au profil PS3. Ceci confirme bien que l'épaisseur sous PS3 est plus faible qu'ailleurs.

Étant donné que les profils PS1-PS2 et PS5,PS6,PS7 sont localisées dans la même zone, on peut supposer que la configuration est la même en terme de vitesse. Si on considère que sous PS5-PS7 le gradient optimum pour minimiser les résidus est de 850-4000 m/s, les résidus sous PS1PS2 sont minimisés avec une épaisseur comprise entre 96 et 48 m.

2.3.2.5. Tentative avec un modèle à épaisseur variable sous PS3.

Afin d'expliquer les anomalies dans les résidus en particulier celles visibles au niveau du profil PS3, nous avons défini un modèle avec des épaisseurs variables. Le modèle testé a une épaisseur de 96 m (6 cellules) exceptés sous le profil PS3 où on passe progressivement d'une épaisseur de 96 m au Nord_Ouest du profil à une épaisseur de 28 m au Sud-Est du profil en accord avec ce que la tomographie 2D a mis en évidence. Le gradient de vitesse utilisé est 1000-4000 m/s et la vitesse dans la zone saine est de 4000 m/s.

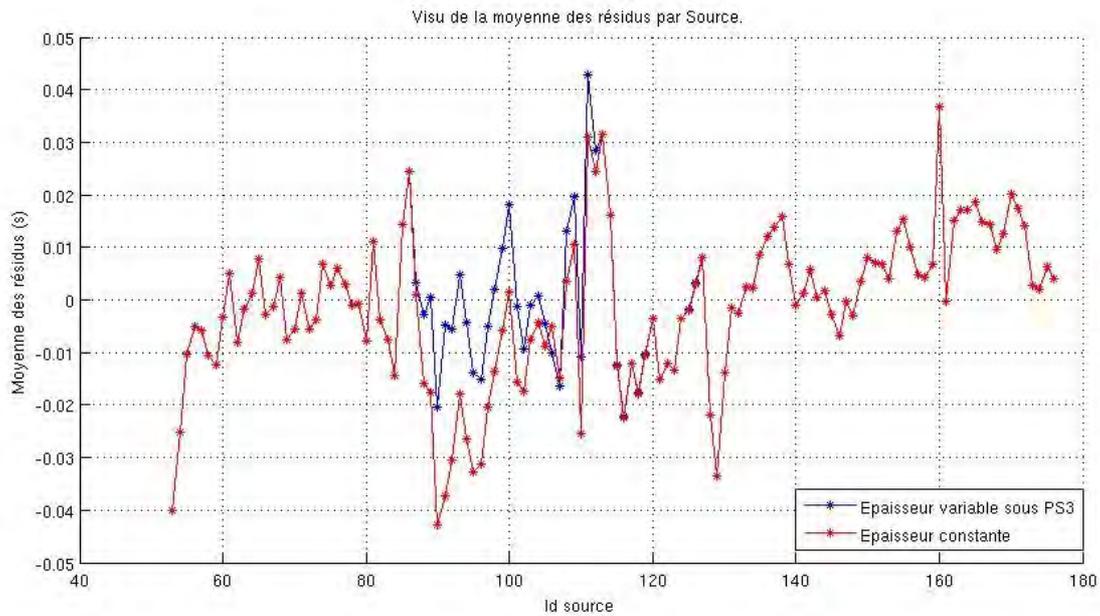


Figure 2.25 :Résidus par source avec un modèle à épaisseur variable (sous PS3, Id compris entre 90 et 109). Gradient de vitesse=1000-4000 m/s .

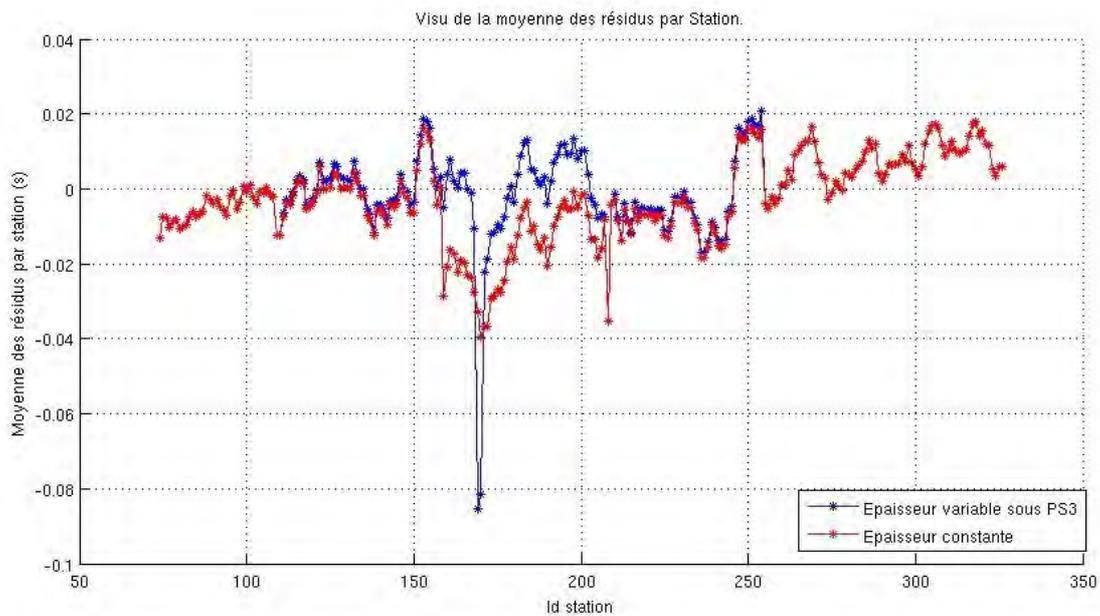


Figure 2.26 :Résidus par station avec un modèle à épaisseur variable (sous PS3, Id compris entre 159 et 206). Gradient de vitesse=1000-4000 m/s .

Malgré quelques points anormaux, on constate que le ΔT négatif au niveau des sources et des stations relatives au profil PS3 est considérablement réduit lorsque l'on introduit une épaisseur variable sous PS3. Des problèmes de convergence persistent cependant et on peut supposer que le modèle à épaisseur variable n'est pas encore optimum.

2.3.3. Tentative d'inversion de PS1-PS7.

Aux vues des résultats des modélisations directes, nous avons tenté une inversion des données relatives aux profils PS1-PS7. Le modèle initial utilisé est homogène latéralement avec un gradient de vitesse de 850-4000 m/s. L'épaisseur de la couche déstructurée est de 96 m.

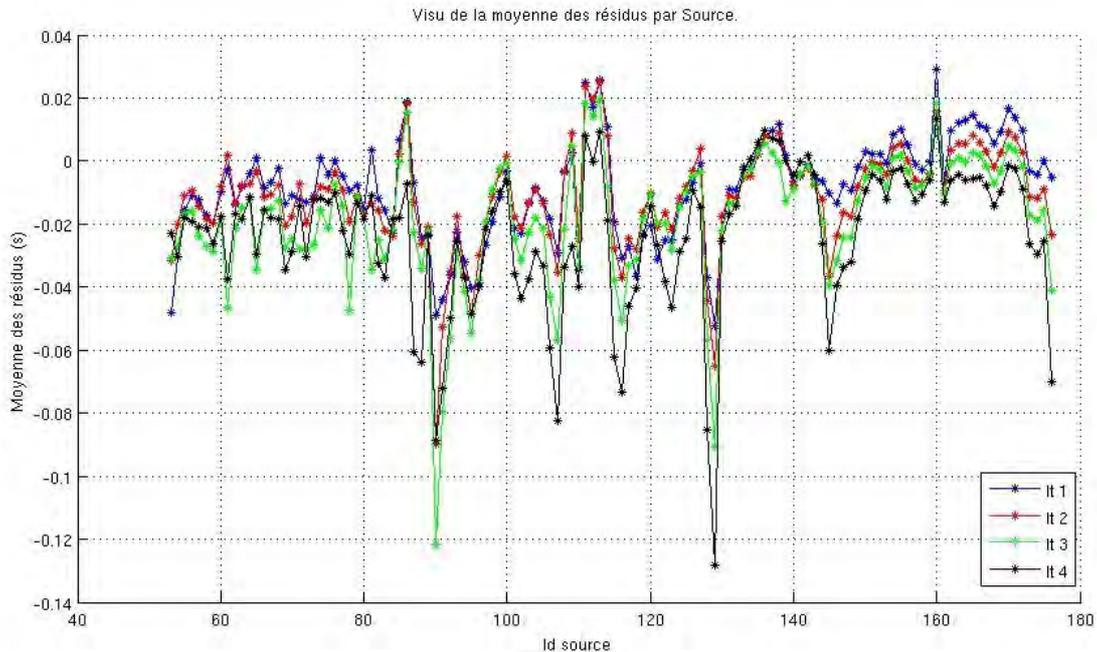


Figure 2.27: Résidus par source en fonction de l'itération (it1 à 4). Gradient de vitesse de 850-4000 m/s . Épaisseur de 96 m

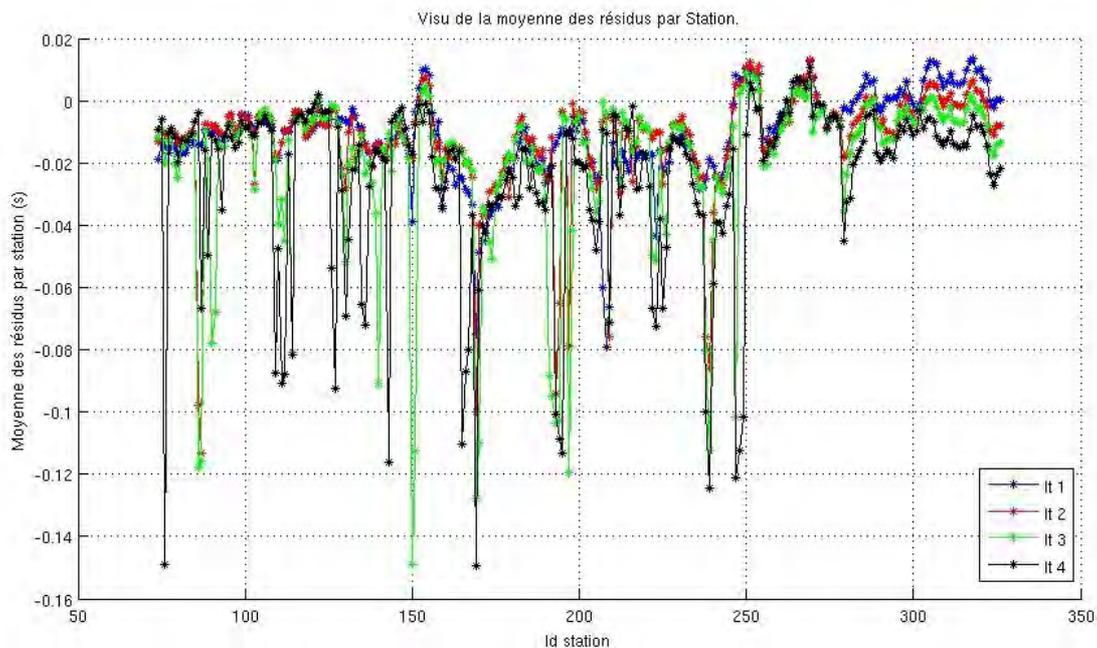


Figure 2.28: Résidus par station en fonction de l'itération (it1 à 4). Gradient de vitesse de 850-4000 m/s . Épaisseur de 96 m

A titre d'exemple, voici les résidus par source et station obtenus à partir d'un modèle initial homogène latéralement avec un gradient de vitesse de 1200-4000 m/s . Épaisseur de 96 m et 4 cellules utilisée pour le gradient dans l'air.

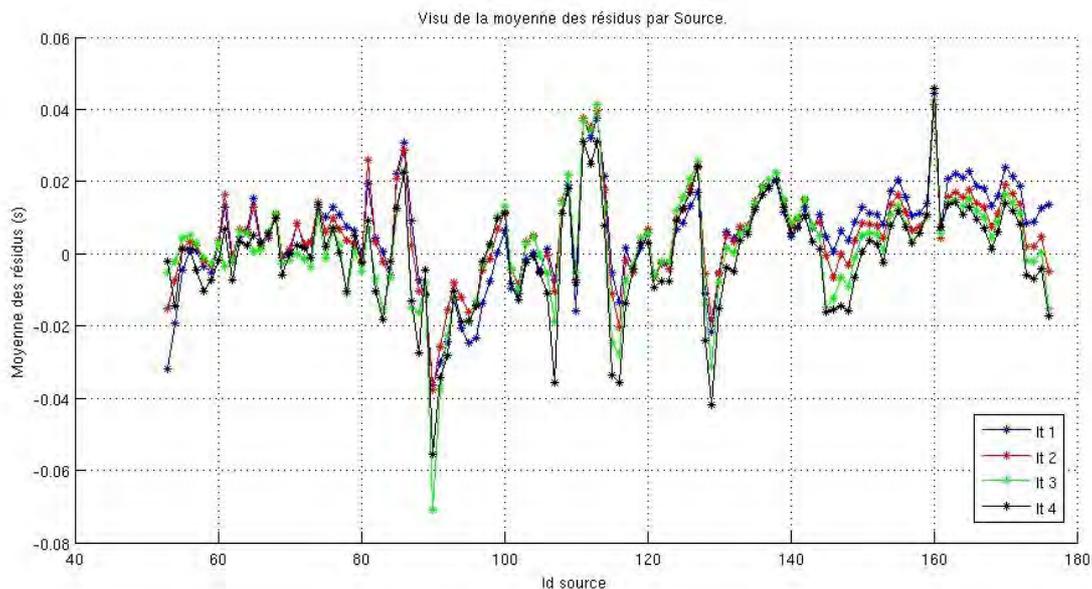


Figure 2.29: Résidus par source en fonction de l'itération (it1 à 6). Gradient de vitesse de 1200-4000 m/s . Epaisseur de 96 m

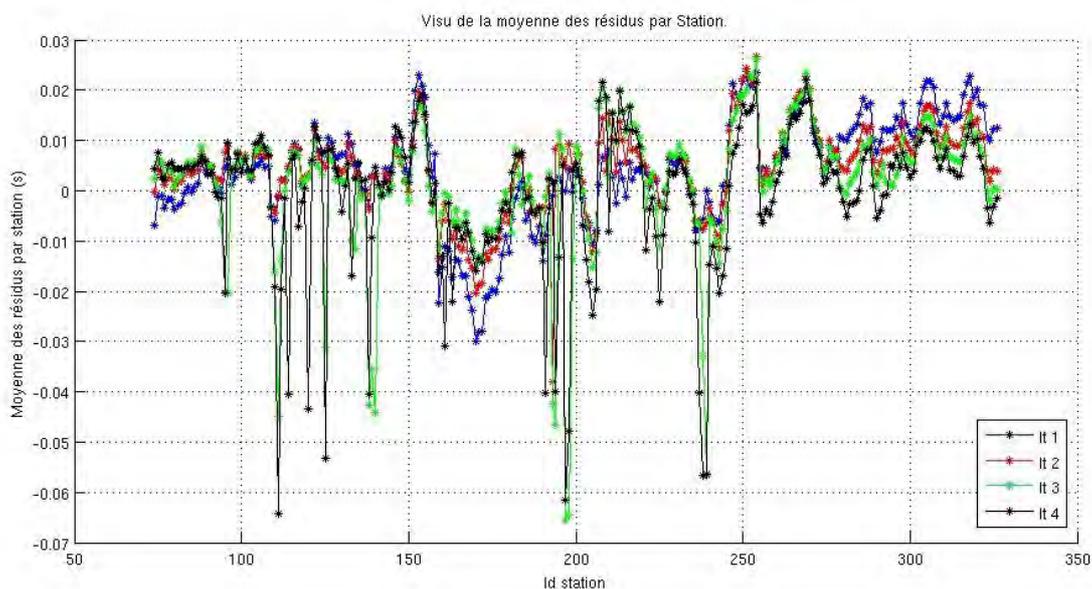


Figure 2.30: Résidus par station en fonction de l'itération (it1 à 6). Gradient de vitesse de 1200-4000 m/s . Épaisseur de 96 m

On constate que l'inversion pose des problèmes de convergence et les résidus augmentent quand le nombre d'itérations augmente (figures 2.27, 2.28 , 2.29 et 2.30). Ces problèmes de convergence apparaissent dès la première itération et s'amplifie ensuite. Le problème de convergence apparaît à partir de l'itération 1 pour gradient 1200-4000 m/s Les modèles obtenus par inversion génèrent des anomalies de vitesse non réalistes (figure 2.31). Le manque de contraintes dans le cube 3D peut expliquer ce comportement. Il y a pas suffisamment de rayons pour contraindre le volume autour

des profils et ainsi quand le nombre d'itérations augmente, les rayons peuvent diverger dans le volume 3D et créer des anomalies de fortes vitesses.

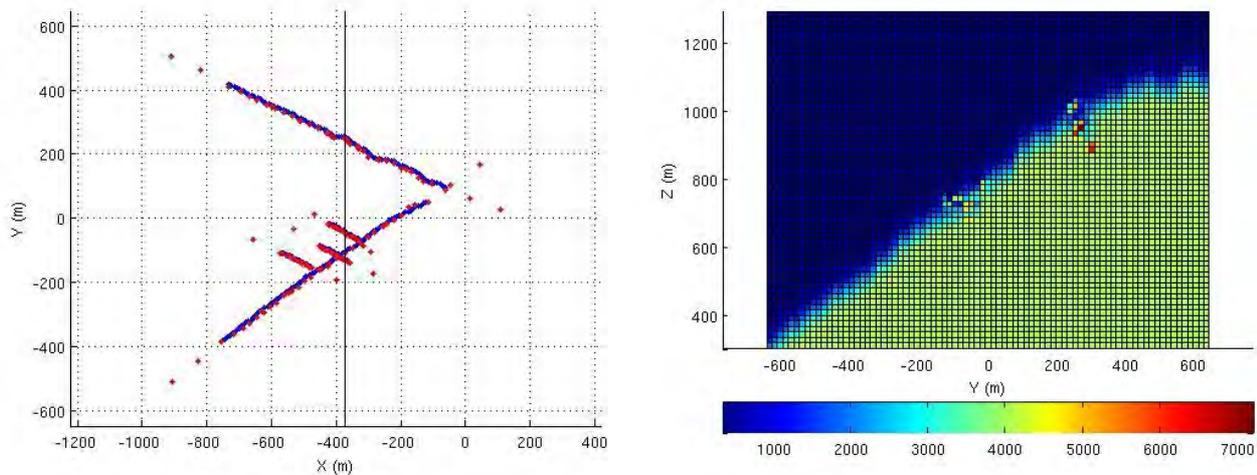


Figure 2.31: Figure de Gauche : Localisation des Sources (en rouge) et Récepteurs (en bleu) dans un plan XY. La droite noire représente la localisation du plan YZ du modèle présenté dans la figure de droite. L'échelle de couleur correspond aux vitesses en m/s.

2.3.4. Tentative de modélisation avec les profils PS1-PS7 et les stations sismologiques.

Aux vues des résultats des modélisations directes sur PS1-PS7 et dans le but de densifier les rayons et donc les contraintes dans le cube en 3D étudié, nous avons testé des modélisations directes des données relatives aux profils PS1-PS7 et aux données issues des stations sismologiques en 2008 et 2010. Le modèle initial utilisé est homogène latéralement avec un gradient de vitesse de 1000-4000 m/s. L'épaisseur de la couche déstructurée est de 96 m. La vitesse dans la zone saine est de 4000 m/s. Les résidus correspondant à des gradients de vitesse variant de 1200-4000 m/S à 2000-4000 m/s sont également présentés à titre de comparaison.

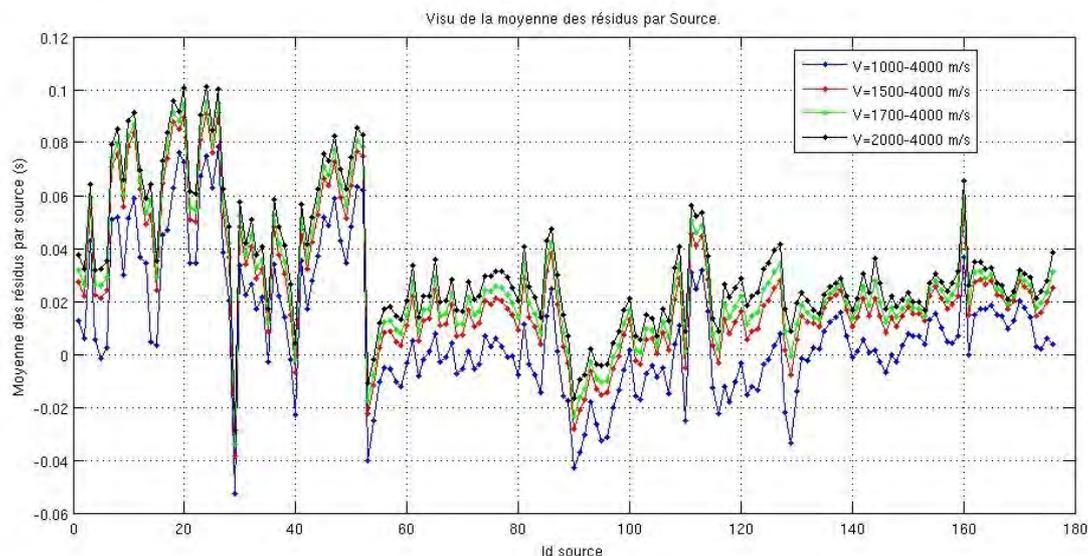


Figure 2.32: Résidus par source en fonction du gradient de vitesse pour les données issues des stations sismologiques et des profils PS1-PS7.

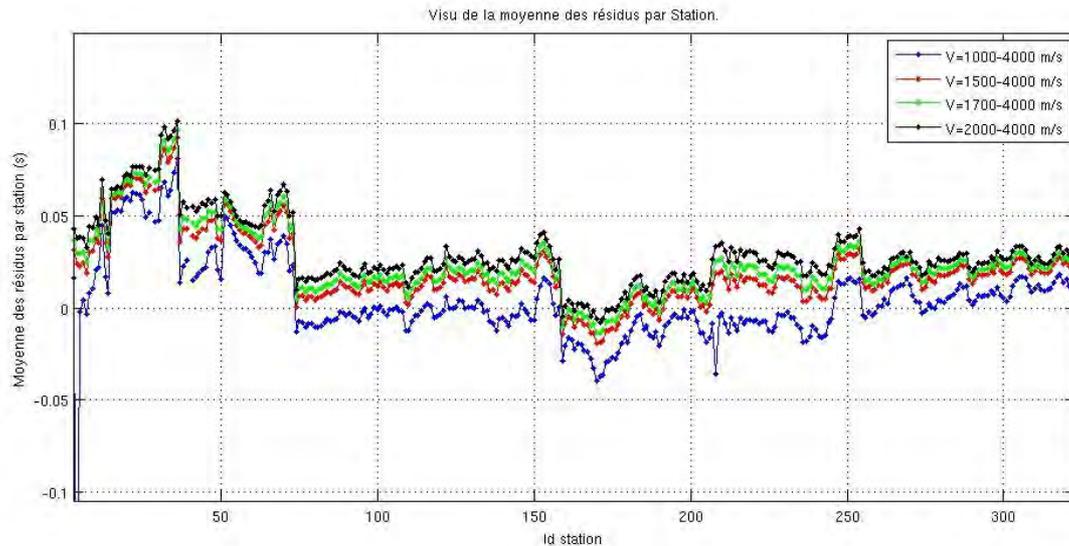


Figure 2.33: Résidus par station en fonction du gradient de vitesse pour les données issues des stations sismologiques et des profils PS1-PS7.

Quelque soit le gradient de vitesse utilisé, on distingue nettement un ΔT positif de 50 à 100 ms des résidus par source ou stations relatifs aux stations sismologiques (Id sources:1 à 52 et Id stations : 1 à 73) (voir figures 2.32 et 2.33). Ceci est cohérent avec le décalage du T_0 remarqué sur les temps de propagation (voir figure 2.5). Ce ΔT apparaît constant pour les données liées aux stations sismologiques de 2010 (Sources :31-52 et Stations:37-73) alors que ce ΔT peut être plus important (jusqu'à 0.1 s) et non constant pour les données liées aux stations sismologiques de 2008 (Sources : 1-30 et Stations : 1-36). Au niveau des données de 2008, ce ΔT variable et plus important peut s'expliquer par le fait que les temps de propagation représentés en fonction de la distance sont assez dispersés (voir figure 2.5). De ce fait, dans un premier temps, nous avons choisi d'exclure les données de 2008 des tests de modélisation directe de l'ensemble des données. Dans les tests qui suivent, seuls les enregistrements des stations sismologiques de 2010 sont utilisés avec les profils PS1 à PS7.

Afin de corriger ce décalage constant lié à la détermination du T_0 , nous avons tenté de nouvelles modélisation directe en corrigeant les T_0 des enregistrements liés aux stations sismologiques. Différents tests ont été effectués en introduisant une correction correspondant à la différence entre la moyenne des résidus des stations sismologiques 2010 et la moyenne des résidus des profils PS1-PS7 soient environ 30 ms. Nous avons également testé des modélisations directes avec une correction de 20 et 25 ms afin d'évaluer l'effet de cette correction sur les résidus. Le gradient de vitesse utilisé est celui défini précédemment à savoir 850-4000 m/s.

Test1 : Modélisation avec un gradient de vitesse de 850-4000 m/s.

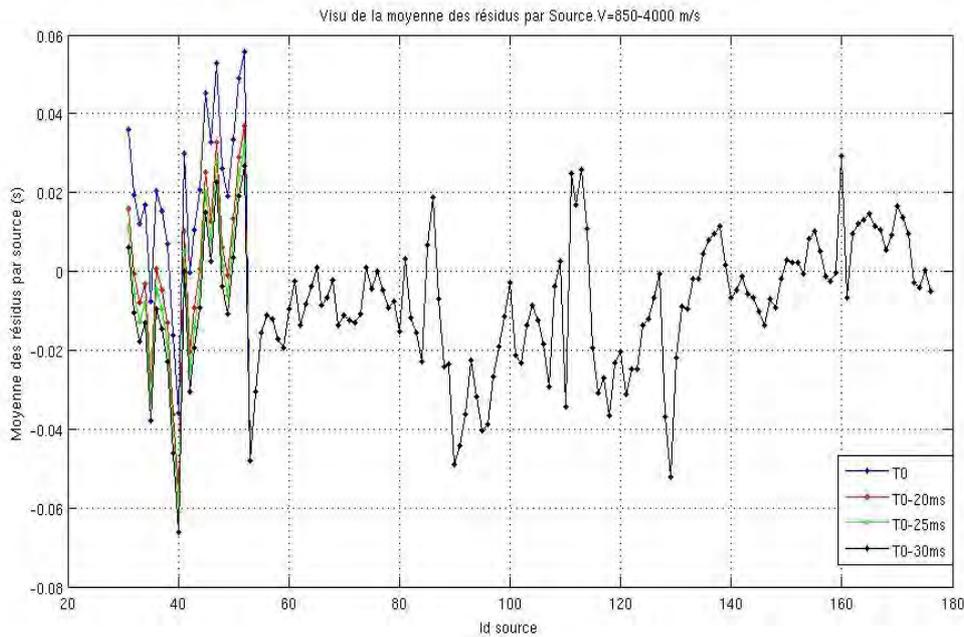


Figure 2.34: Résidus par source en fonction du T0 utilisé au niveau de enregistrement des stations 2010 (Sources 31-52). Gradient de vitesse utilisé= 850-4000 m/s. Pour les sources >52 (relatives aux profils PS1-PS7), toutes les courbes sont confondues.

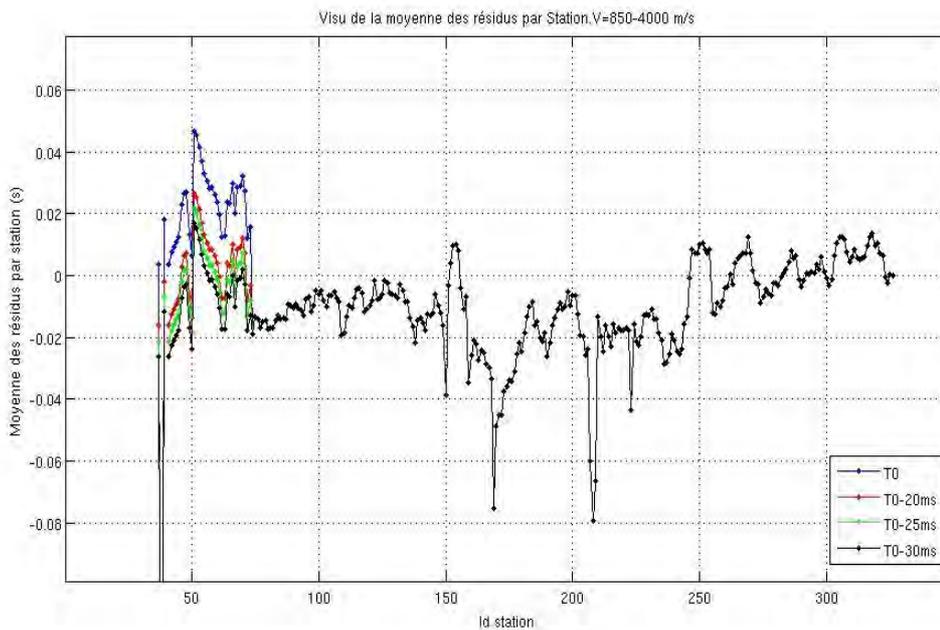


Figure 2.35: Résidus par station en fonction du T0 utilisé au niveau de enregistrement des stations 2010 (Stations 37-73). Gradient de vitesse utilisé= 850-4000 m/s. Épaisseur de la zone déstructurée=96 m. Pour les stations >73 (relatives aux profils PS1-PS7), toutes les courbes sont confondues.

On remarque que le fait d'introduire une correction au niveau du T0 réduit de façon importante les résidus (figures 2.34 et 2.35) et les ramène à des valeurs autour de 0. Les anomalies de résidus persistantes peuvent être attribuées à des épaisseurs incorrectes ou à des erreurs de pointés. Cette correction n'a aucune influence sur les autres résidus ce qui pourrait indiquer que l'ajout des données sismologiques permettent de contraindre d'autres zones du glissement de terrain mais m'amènent pas de contraintes complémentaires au niveau des données des profils PS1-PS7.

2.3.5. Tentative d'inversion avec une correction de 30 ms sur les données issues des stations sismologiques.

Une inversion des données 2010 des stations sismologiques corrigées de 30 ms et des profils PS1-PS7 a été tentée en utilisant un modèle homogène latéralement avec un gradient de vitesse vertical de 850-4000 m/s et une épaisseur de 96 m.

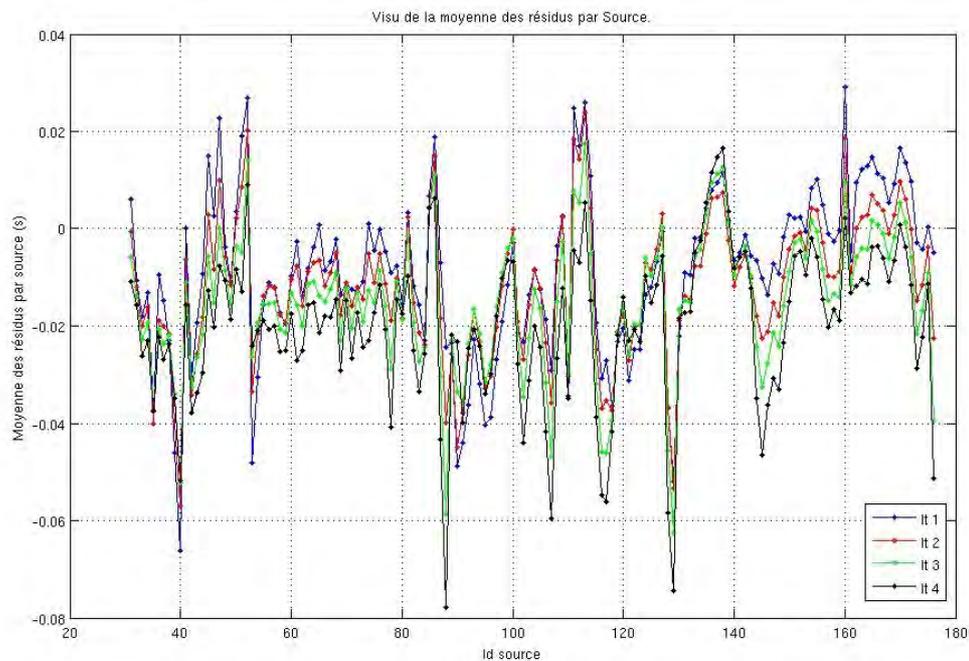


Figure 2.36: Résidus par source après inversion (Itération 1 à 4) pour les données sismologiques de 2010 corrigées de 30 ms et les profils PS1-PS7. Le gradient de vitesse est de 850-4000 m/s.

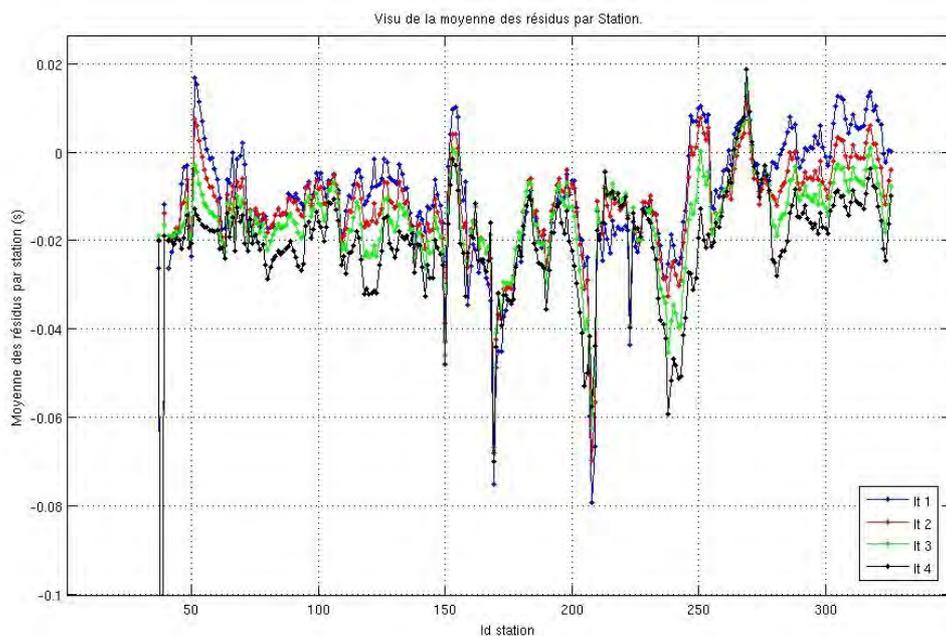


Figure 2.37 : Résidus par station après inversion (Itération 1 à 4) pour les données sismologiques de 2010 corrigées de 30 ms et les profils PS1-PS7. Le gradient de vitesse est de 850-4000 m/s.

Les conclusions sont les mêmes que pour l'inversion des Profils PS1-PS7 (voir paragraphe 2.3.3.) On constate que l'inversion pose des problèmes de convergence. les résidus augmentent quand le nombre d'itérations augmente (figures 2.36 et 2.37). Ces problèmes de convergence apparaissent dès la première itération et s'amplifient ensuite. Dans les modèles obtenus par inversion, les résidus sont corrigés en incluant des anomalies de vitesses (vitesses élevées) qui ne sont pas réalistes. Là encore, on peut supposer que le système n'est pas suffisamment contraint.

2.3.6. Tentative d'inversion en mode « Blast ».

Étant donné les problèmes rencontrés avec le T0 des données relatives aux stations sismologiques, une inversion des données a été tentée en considérant les sources relatives aux données 2008 et 2010 des stations sismologiques comme des blasts. Le modèle initial utilisé est homogène latéralement avec un gradient de vitesse vertical de 850-4000 m/s et une épaisseur de 96 m. Les résidus par sources et par stations sont présentés dans les figures 2.38 et 2.39.

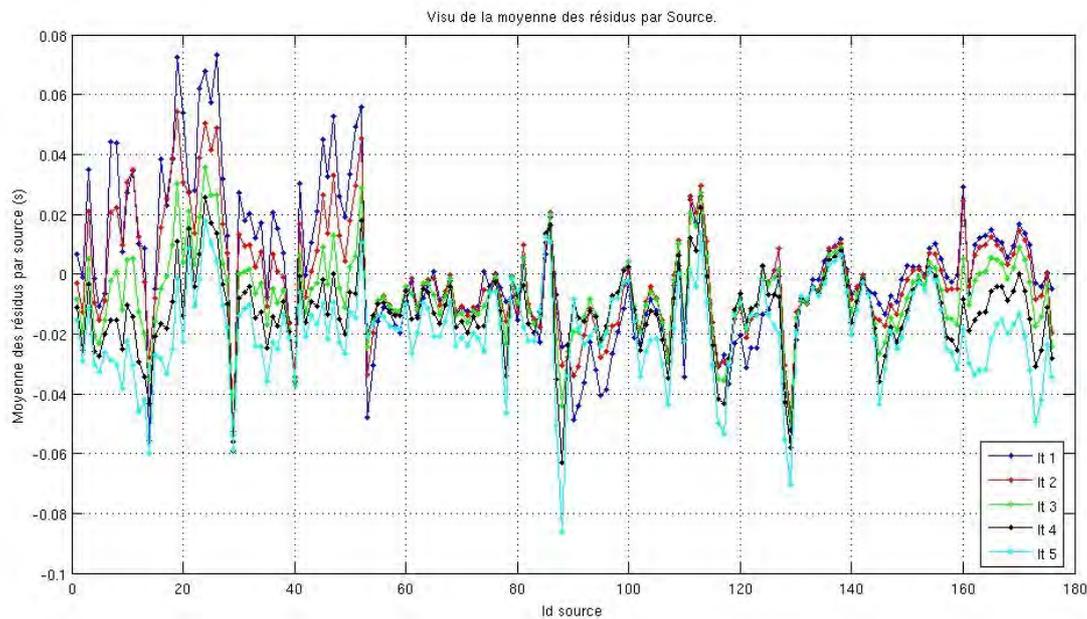


Figure 2.38: Résidus par source après inversion (Itération 1 à 5) en considérant les sources relatives aux données des stations sismologiques comme des blasts. Le gradient de vitesse est de 850-4000 m/s. Et l'épaisseur est de 96 m.

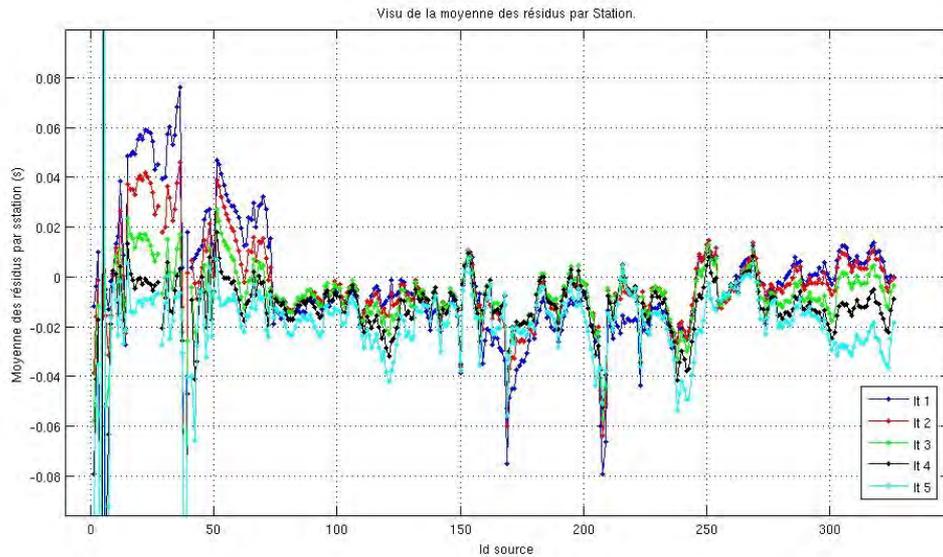


Figure 2.39 :Résidus par station après inversion (Itération 1 à 5) en considérant les sources relatives aux données des stations sismologiques comme des blasts. Le gradient de vitesse est de 850-4000 m/s et l'épaisseur est de 96 m.

L'inversion montre des résidus obtenus par stations et par sources quasi uniformes après 4 ou 5 itérations mais non nuls (Résidu moyen=-0.015 ms) ce qui pourrait révéler un gradient de vitesse trop faible contrairement à ce que les analyses précédentes avaient montré. On note également quelques résidus par stations très importants pour les stations 4,5 et 38 (THE03, THE04 et GAL23). Une inversion en mode blast avec une correction de 30 ms sur les données relatives aux stations sismologiques a aussi été testée. Les résidus par sources et par stations sont présentés dans les figures 2.40 et 2.41.

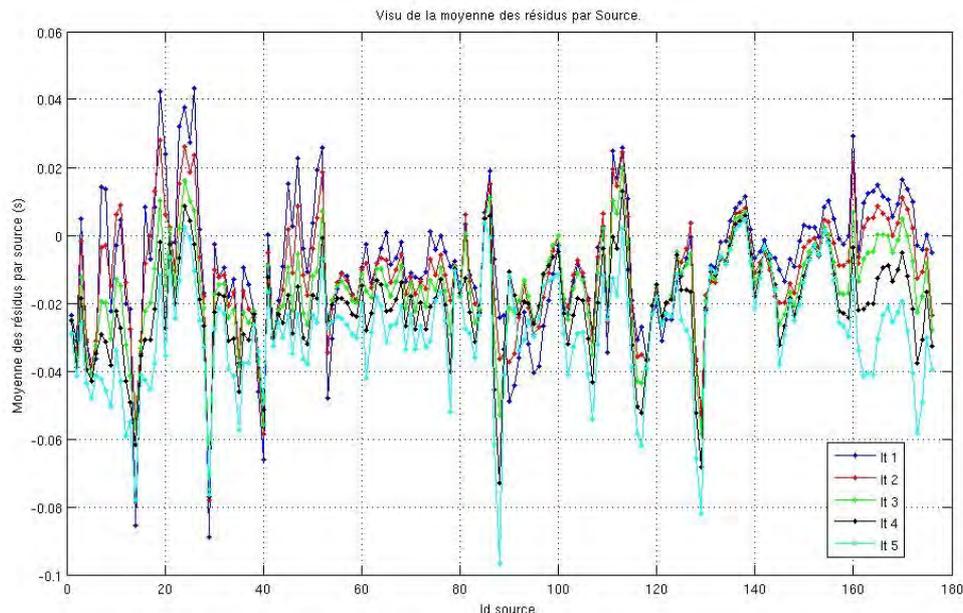


Figure 2.40: Résidus par source après inversion (Itération 1 à 5) en considérant les sources relatives aux données des stations sismologiques comme des blasts. Le gradient de vitesse est de 850-4000 m/s. Et l'épaisseur est de 96 m. Correction de 30 ms des données relatives aux stations sismologiques.

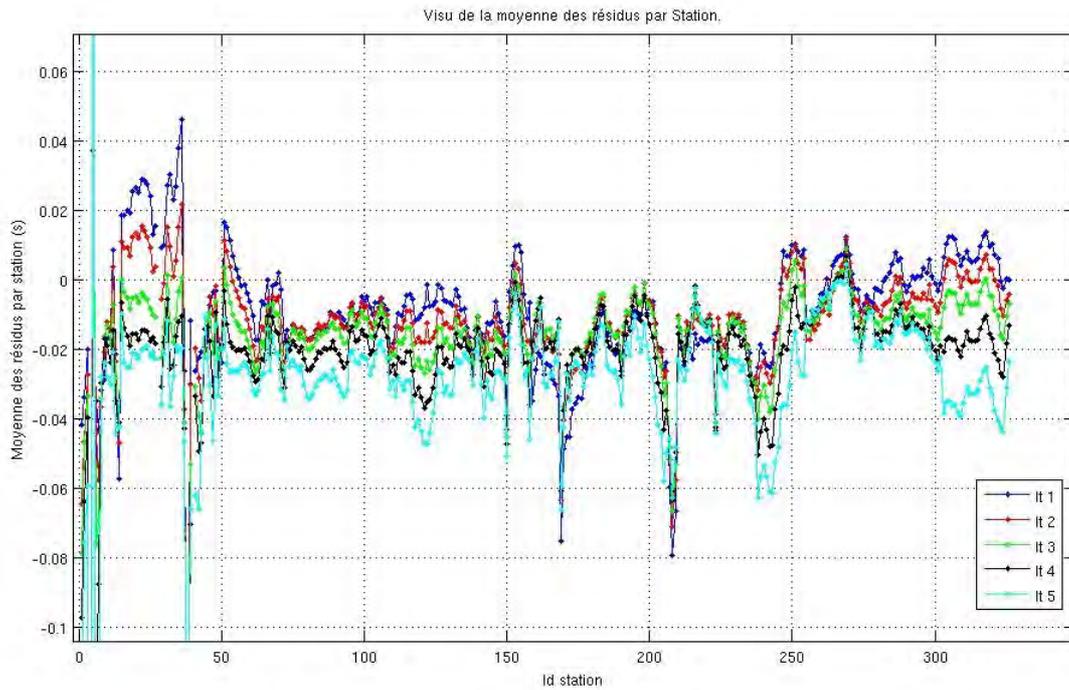


Figure 2.41: Résidus par station après inversion (Itération 1 à 5) en considérant les sources relatives aux données des stations sismologiques comme des blasts. Le gradient de vitesse est de 850-4000 m/s. Et l'épaisseur est de 96 m. Correction de 30 ms des données relatives aux stations sismologiques.

Dans ce cas, les résidus obtenus par stations et par sources ont des valeurs moyennes encore plus importantes que précédemment (-0.02 ms).

Un test a également été effectué en introduisant une correction de 30 ms dans les données relatives aux stations sismologiques et en utilisant un gradient de vitesse de 1200-400 m/s. Les résidus par sources et par stations sont présentés dans les figures 2.42 et 2.43.

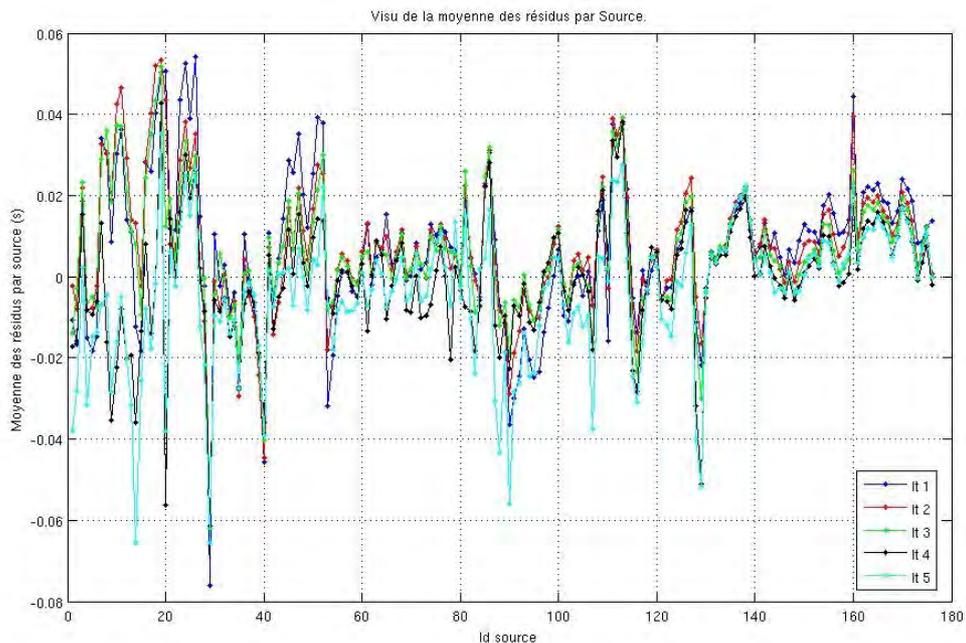


Figure 2.42: Résidus par source après inversion (Itération 1 à 5) en considérant les sources relatives aux données des stations sismologiques comme des blasts. Le gradient de vitesse est de 1200-4000 m/s. Et l'épaisseur est de 96 m. Correction de 30 ms des données relatives aux stations sismologiques.

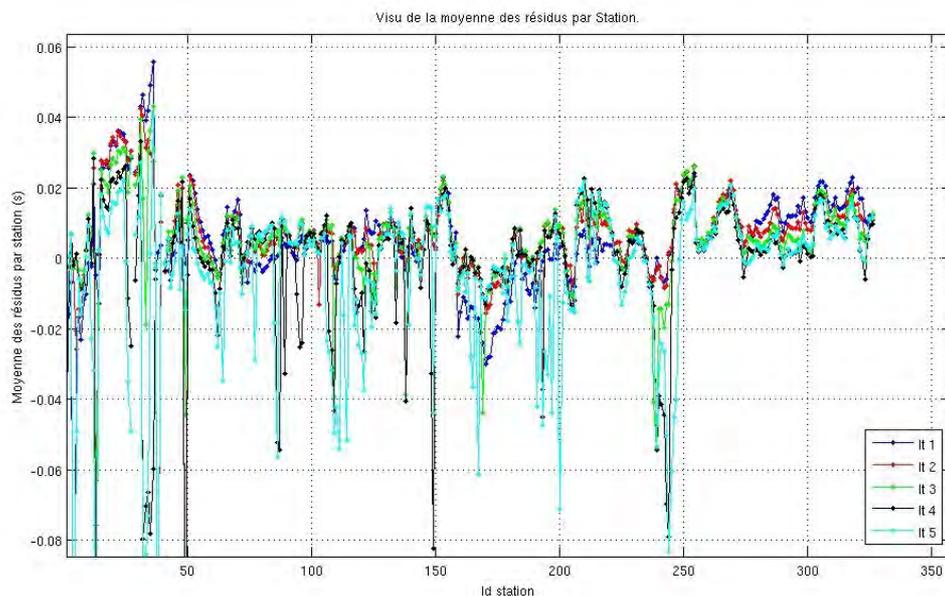


Figure 2.43: Résidus par station après inversion (Itération 1 à 5) en considérant les sources relatives aux données des stations sismologiques comme des blasts. Le gradient de vitesse est de 1200-4000 m/s. Et l'épaisseur est de 96 m. Correction de 30 ms des données relatives aux stations sismologiques.

Dans le cas d'une inversion en mode blast avec un gradient de vitesse initial de 1200-4000 m/s, les problèmes de divergence apparaissent très vite et les résultats sont peu exploitables.

2.3.7. Conclusions.

Les différents tests effectués en modélisation directe le logiciel de tomographie en 3 dimensions TOMO-TV ont mis en évidence plusieurs points :

- La nécessité avec Tomo-TV d'utiliser un gradient dans l'air pour minimiser les problèmes de convergence au niveau du passage à la surface libre.
- Une vitesse 4000 m/s dans la zone saine paraît plus adaptée qu'une vitesse de 3000 m/s.
- Les dispositifs des profils PS5, PS6 et PS7 ne permettent pas d'atteindre la zone saine et permettent de contraindre le gradient de vitesse dans cette zone. Le gradient de vitesse qui minimise les résidus est un gradient de 850 à 4000 m/s avec une épaisseur moyenne de la zone déstructurée d'au moins 80 m.
- Il existe des variations d'épaisseur notamment sous PS3 et PS1 qui varient entre quelques dizaines de mètres à plus de cent mètres d'épaisseur. Par contre, sous l'extrémité Est de PS3, les résidus montrent une faible épaisseur alors que sous l'extrémité Nord de PS2, les résidus montrent une épaisseur de près de 100 m. Il y a donc un fort contraste sur une courte distance qui peut correspondre à la limite de la zone déstructurée.
- Les inversions ne permettent pas d'obtenir un modèle de vitesse cohérent (anomalies de fortes vitesses) et sont toujours associées à des problèmes de convergence lorsque le nombre d'itération augmente. Le manque de contraindre dans le cube 3D utilisé en est sans doute la cause. Le nombre de couples sources -récepteurs n'est pas suffisamment dense dans le cube 3D étudié.

3. Tomographie 2D avec les Profils PS1 à PS7.

A partir des informations précédemment obtenues par modélisation directe des différents profils PS1 à PS7 sous le logiciel TOMO-TV, nous avons inversé les données des profils PS1-PS7 avec deux modèles initiaux 2D différents et avons comparé les modèles et les résidus obtenus. Les profils 2D ont été inversés en utilisant la méthode SIRT à l'aide du logiciel SARDINE.

Le premier modèle est un modèle homogène avec une vitesse de 4000 m/s dans le sol et une vitesse de 330 m/s dans l'air. Par la suite, il sera appelé *modèle homogène*.

Le second modèle est un modèle à gradient avec une vitesse qui varie de 850 m/s à la surface à 4000 m/s en profondeur sur une épaisseur verticale constante de 100 m environ. Au delà de 100 m de profondeur, la vitesse est constante et fixée à 4000 m/s. La vitesse dans l'air est de 330 m/s. Par la suite, il sera appelé *modèle à gradient*.

3.1. Comparaison des modèles obtenus avec deux modèles à gradient différents :

Au préalable, afin de vérifier que le gradient de vitesse utilisé pour cette étude ($v=850-4000$ m/s) est valide et cohérent et n'induit pas de grosses variations en fonction du gradient initial choisi, nous avons comparé deux modèles obtenus pour le profil PS1PS2 avec des gradients de 850-4000 m/s et 1200-4000 m/s sur 100 m d'épaisseur.

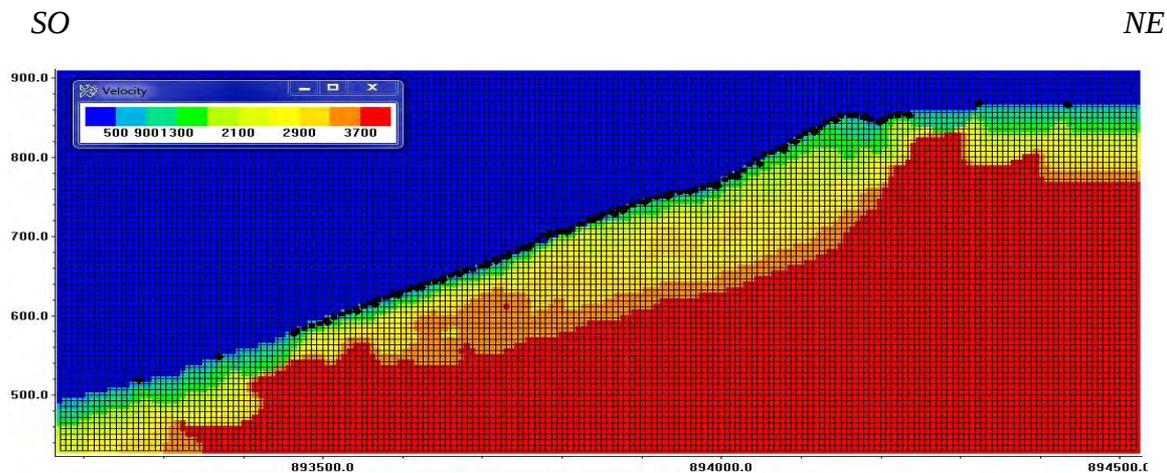


Figure 3.1 : Modèle final obtenu pour un modèle initial avec un gradient 850-4000 m/s.

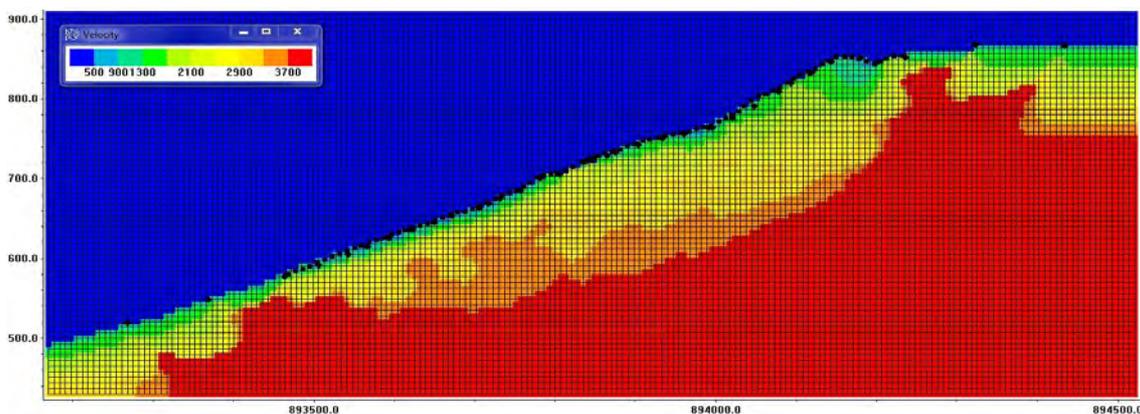


Figure 3.2 : Modèle final obtenu pour un modèle initial avec un gradient 1200-4000 m/s.

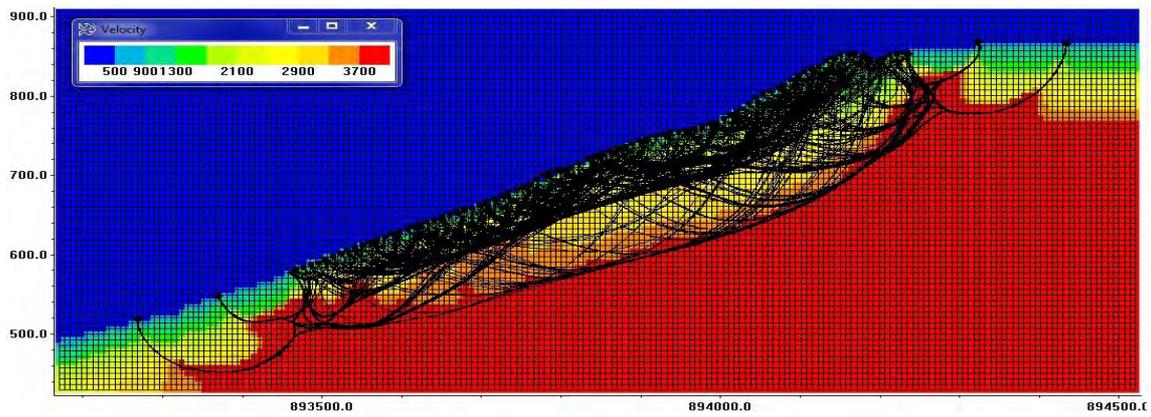


Figure 3.3 : Modèle final avec rayons obtenu pour un modèle initial avec un gradient 850-4000 m/s.

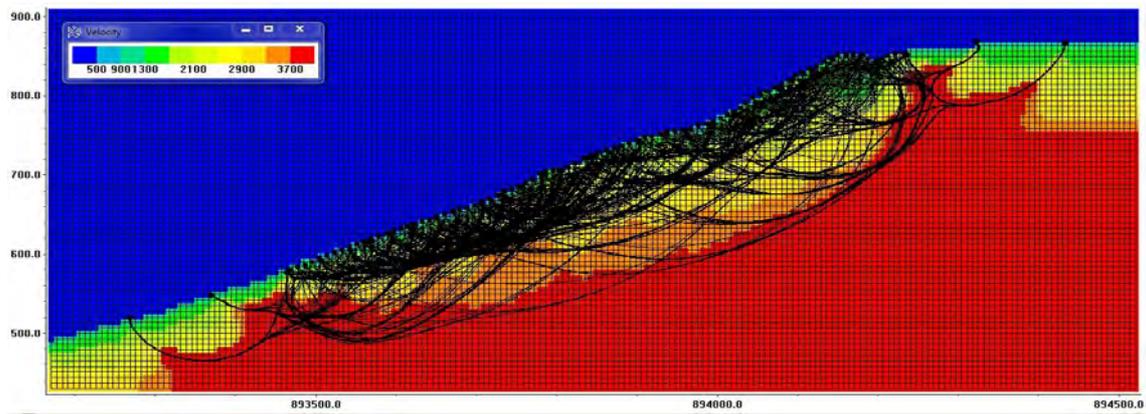


Figure 3.4: Modèle final avec rayons obtenu pour un modèle initial avec un gradient 1200-4000 m/s

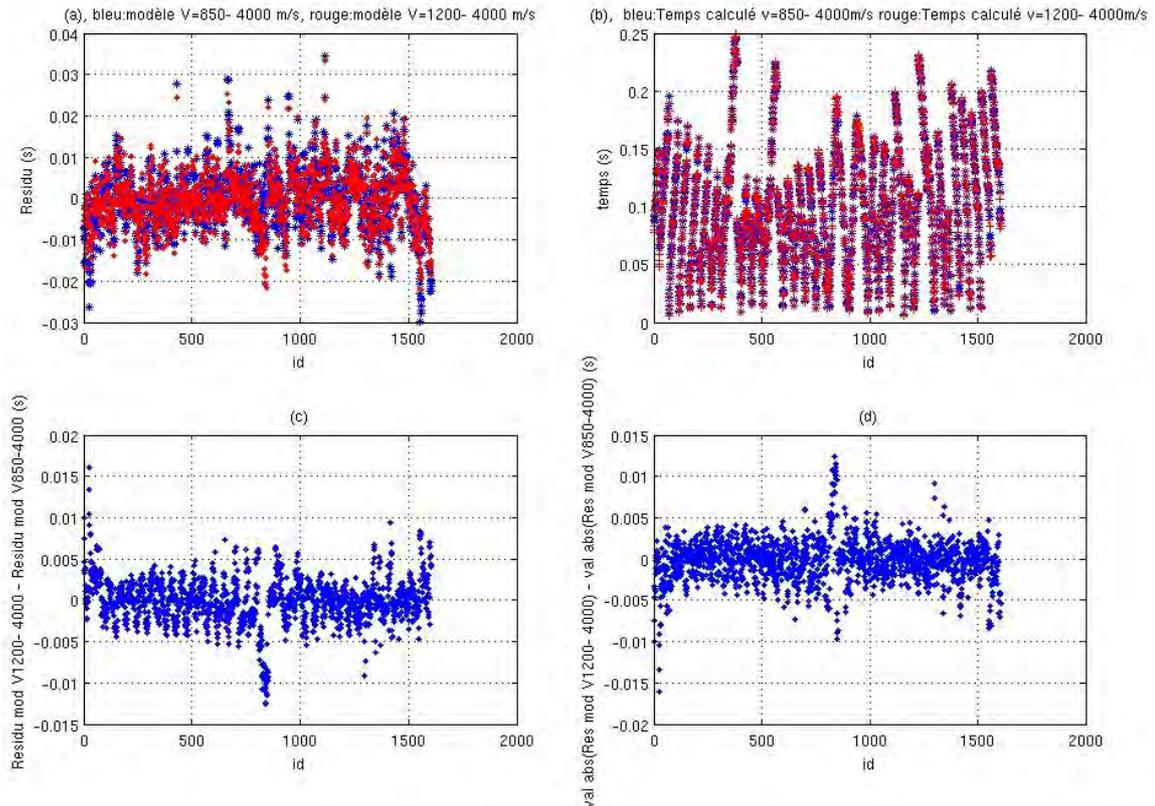


Figure 3.5: Profil PS1PS2 :(a) résidus obtenus avec des modèles initiaux ($V=850-4000$ m/s et $V=1200-4000$ m/s), (b) temps calculés avec $V=850-4000$ m/s, avec $V=1200-4000$ m/s, (c) différence entre les résidus obtenus avec modèle initial ($v=1200-4000$ m/s) et résidus obtenus avec modèle initial ($v=850-4000$ m/s) et (d) différence entre les valeurs absolues des résidus obtenus avec modèle initial ($v=1200-4000$ m/s) et les valeurs absolues des résidus obtenus avec modèle initial ($v=850-4000$ m/s).

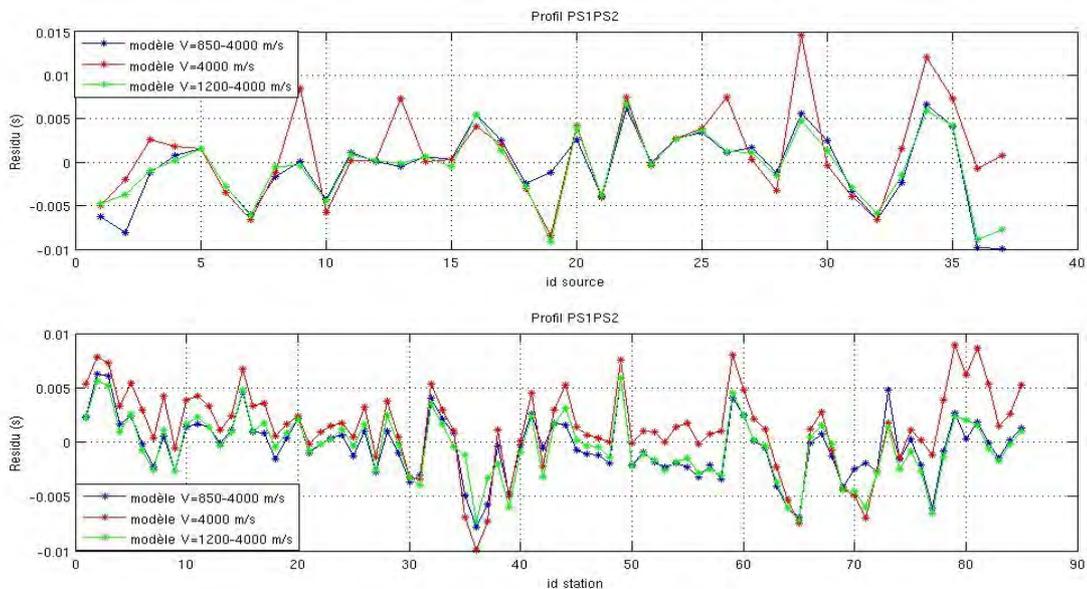


Figure 3.6: Profil PS1PS2 : en haut, Moyennes des résidus par sources obtenues avec un modèle initial $v=850-4000$ m/s, $v=1200-4000$ m/s et $v=4000$ m/s. En bas : Moyennes des résidus par stations obtenues avec un modèle initial $v=850-4000$ m/s $v=1200-4000$ m/s et $v=4000$ m/s.

Les modèles finaux (figure 3.1 à 3.4) sont très cohérents et très similaires avec les 2 gradients de vitesse testés en terme de géométrie et de vitesse. La seule différence notée est liée à l'épaisseur de la couche déstructurée dans la partie vers le Nord-Est qui est légèrement plus importante avec le modèle initial de gradient à 1200-4000 m/s et corrélées à une couche de vitesse 3300-3700 m/s (couleur orange dans l'échelle des vitesses) un peu plus épaisse. Dans cette zone, la différence d'épaisseur est de l'ordre de 12 %. Les résidus sont très homogènes exceptés ponctuellement (figure 3.5). Les résidus par source ou par stations sont très similaires (Figure 3.6). Ainsi, le passage d'un gradient de 850-4000 m/s à un gradient de 1200-4000 m/s n'entraîne pas de différence marquée sur le modèle final obtenu et conforte l'utilisation du modèle à 850-4000 m/s déduite de l'étude des résidus sous le logiciel tomo-tv pour la suite de l'étude.

3.2. Comparaison des résultats de la tomographie 2D avec modèles initiaux homogène et à gradient.

Les profils PS1 à PS7 ont été inversés systématiquement avec ces deux modèles initiaux (modèle homogène $v=4000$ m/s et modèle à gradient $v=850-4000$ m/s).

Les résultats pour chacun des profils sont présentés dans ce qui suit avec :

- le modèle final obtenu pour le modèle homogène avec et sans rayons ;
- le modèle final obtenu pour le modèle à gradient avec et sans rayons ;
- les résidus obtenus avec chacun des deux modèles initiaux utilisés ;
- les temps calculés avec chacun des deux modèles et les temps observés ;
- la différence des résidus obtenus avec les deux modèles ;
- la différence des valeurs absolues des résidus obtenus avec les deux modèles ;

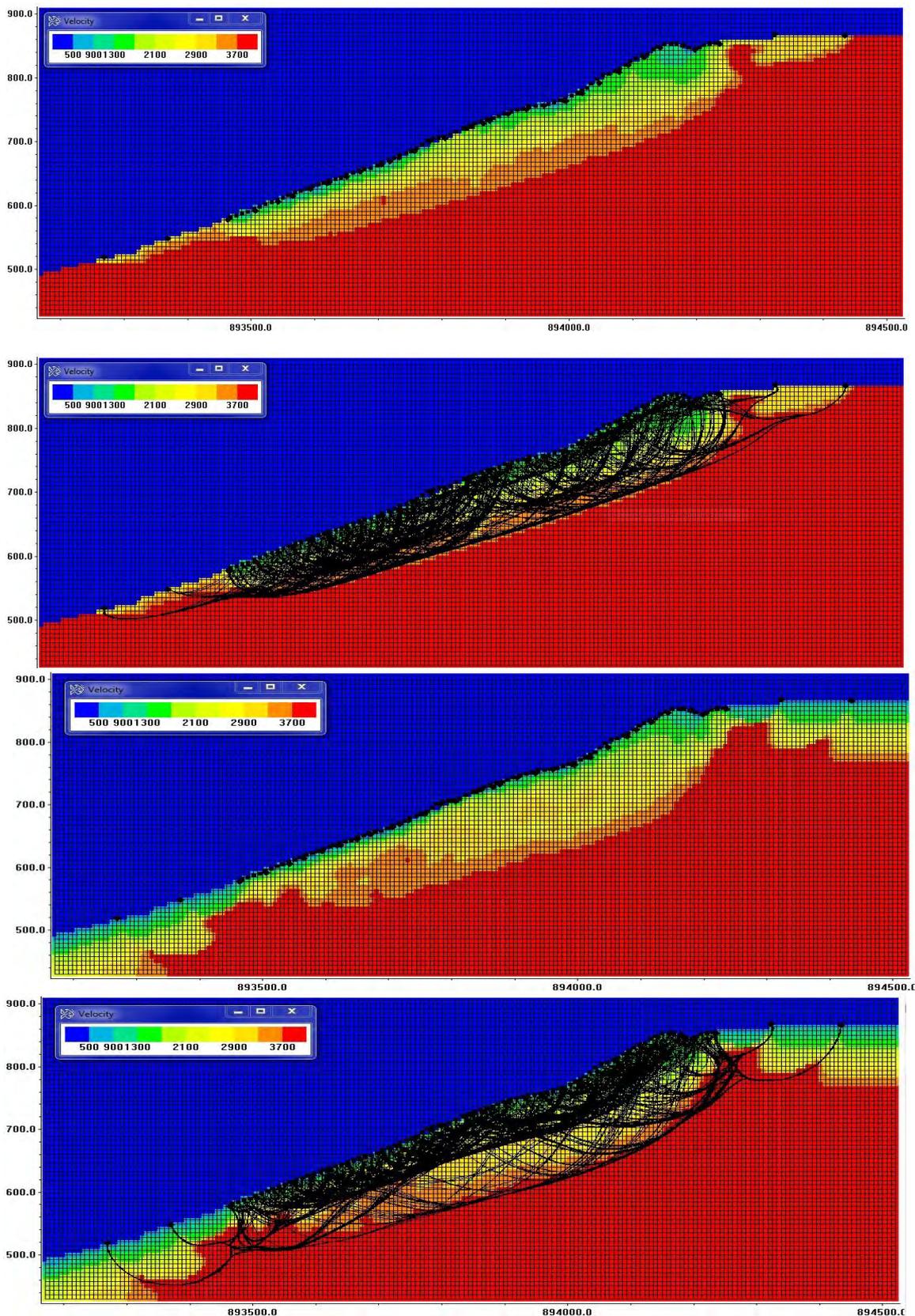


Figure 3.7: Profil PS1PS2 : de haut en bas, modèle obtenu avec modèle initial homogène ($V=4000$ m/s) sans rayons, avec rayons, puis modèle obtenu avec modèle initial à gradient ($V=850-4000$ m/s) sans rayons, avec rayons.

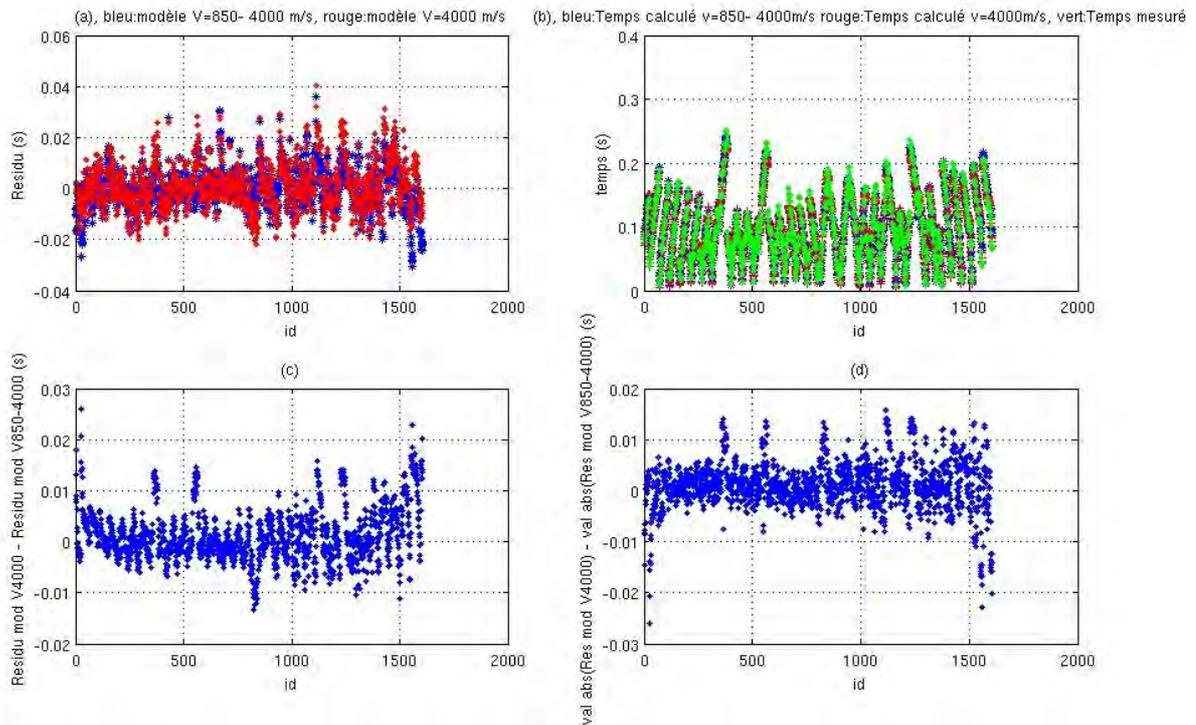


Figure 3.8: Profil PS1PS2 : (a) résidus obtenus avec des modèles initiaux ($V=850-4000$ m/s et $V=4000$ m/s), (b) temps calculés avec $V=850-4000$ m/s, avec $v=4000$ m/s et temps observés, (c) différence entre les résidus obtenus avec modèle initial ($v=4000$ m/s) et résidus obtenus avec modèle initial ($v=850-4000$ m/s) et (d) différence entre les valeurs absolues des résidus obtenus avec modèle initial ($v=4000$ m/s) et les valeurs absolues des résidus obtenus avec modèle initial ($v=850-4000$ m/s)

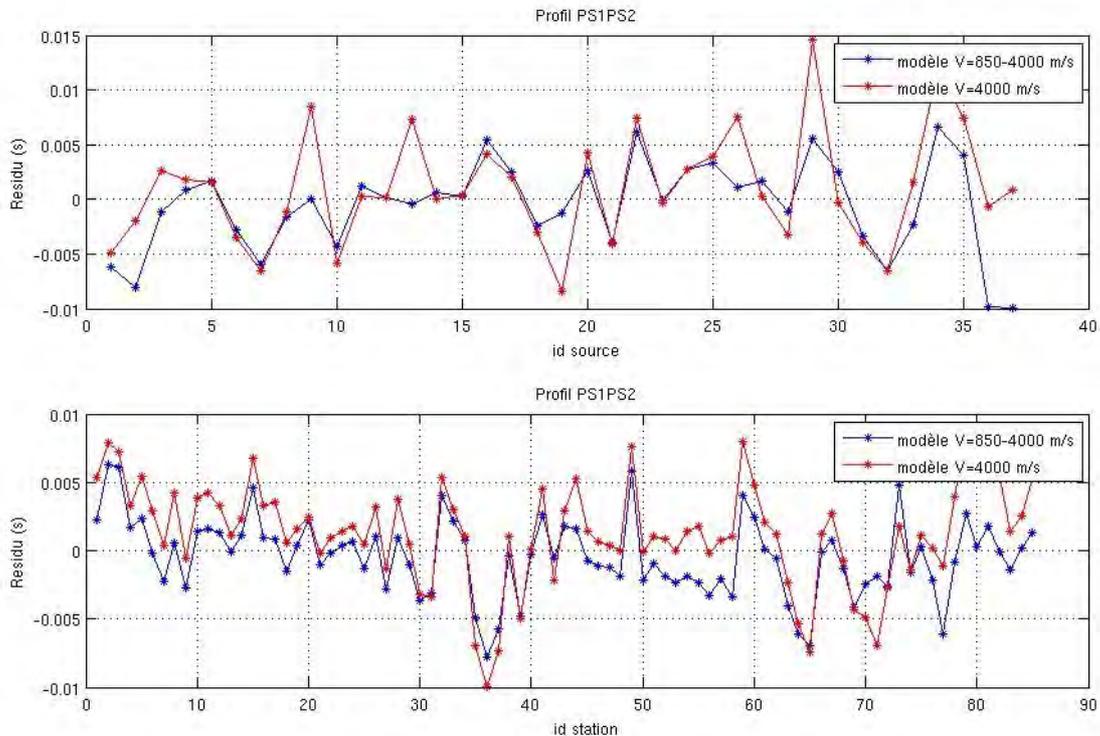


Figure 3.9: Profil PS1PS2 : en haut, Moyennes des résidus par sources obtenues avec un modèle initial $v=850-4000$ m/s et $V=4000$ m/s. En bas : Moyennes des résidus par stations obtenues avec un modèle initial $v=850-4000$ m/s et $v=4000$ m/s.

Profil PS3PS4
NO

SE

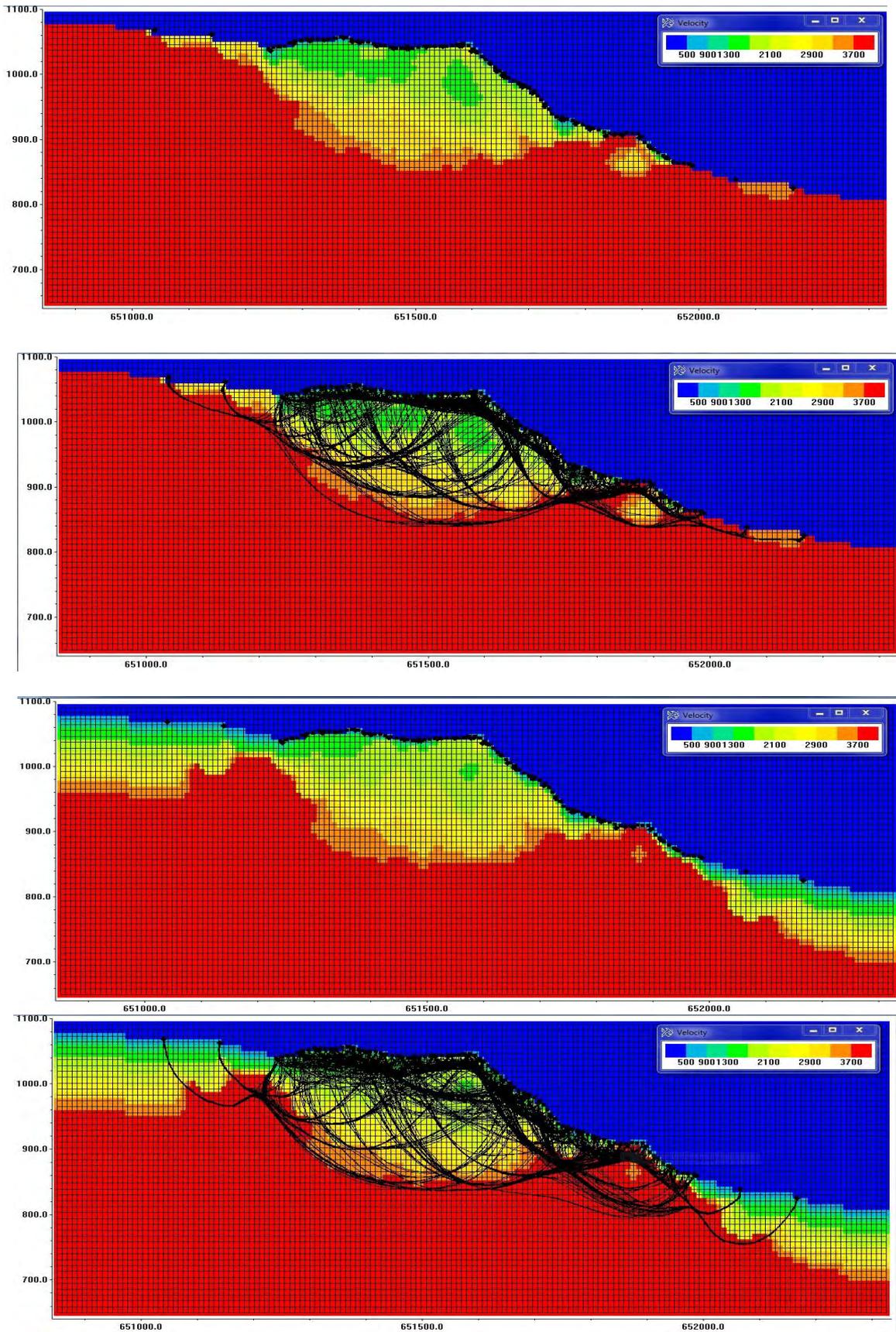


Figure3.10: Profil PS3PS4 :de haut en bas, modèle obtenu avec modèle initial ($V=4000$ m/s) sans rayon, avec rayon, puis modèle obtenu avec modèle initial ($V=850-4000$ m/s) sans rayon, avec rayon.

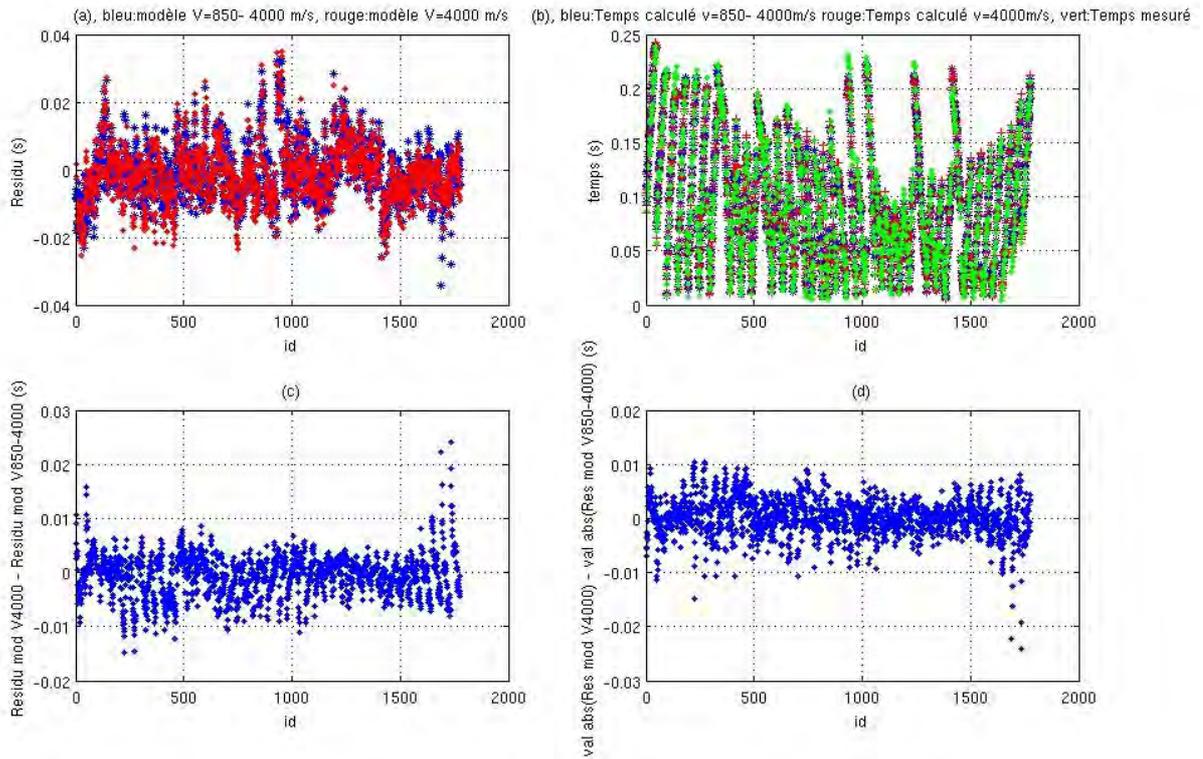


Figure 3.11: Profil PS3PS4 : (a) résidus obtenus avec des modèles initiaux ($V=850-4000$ m/s et $V=4000$ m/s), (b) temps calculés avec $V=850-4000$ m/s, avec $V=4000$ m/s et temps observés, (c) différence entre les résidus obtenus avec modèle initial ($v=4000$ m/s) et résidus obtenus avec modèle initial ($v=850-4000$ m/s) et (d) différence entre les valeurs absolues des résidus obtenus avec modèle initial ($v=4000$ m/s) et les valeurs absolues des résidus obtenus avec modèle initial ($v=850-4000$ m/s)

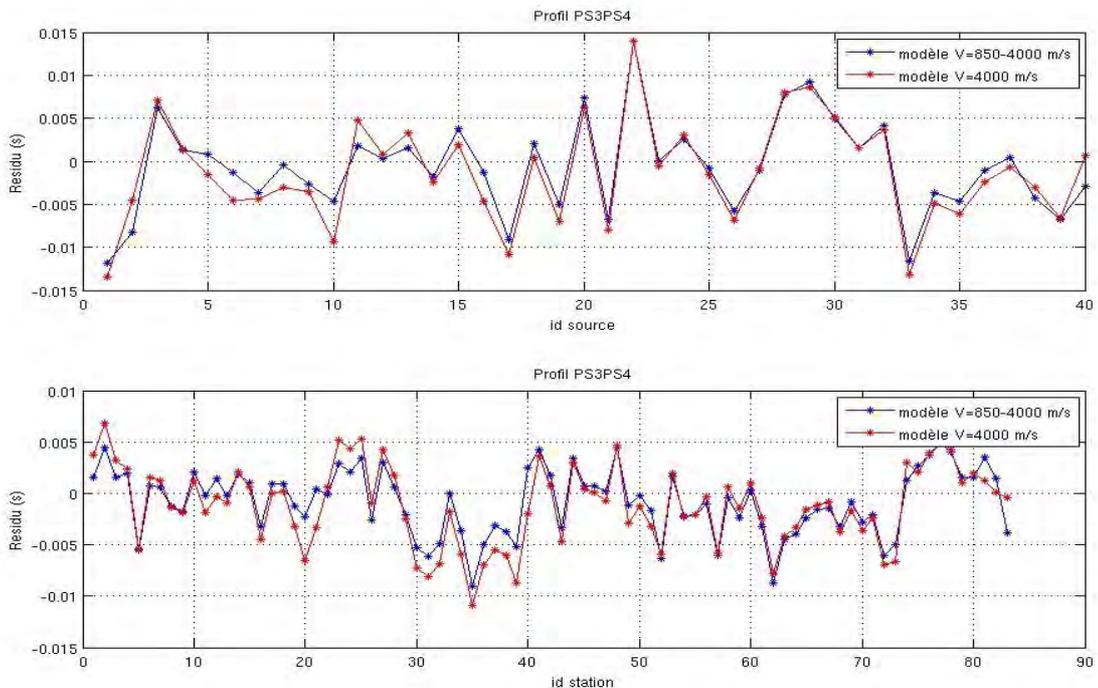


Figure 3.12: Profil PS3PS4 : en haut, Moyennes des résidus par sources obtenues avec un modèle initial $v=850-4000$ m/s et $V=4000$ m/s. En bas : Moyennes des résidus par stations obtenues avec un modèle initial $v=850-4000$ m/s et $V=4000$ m/s.

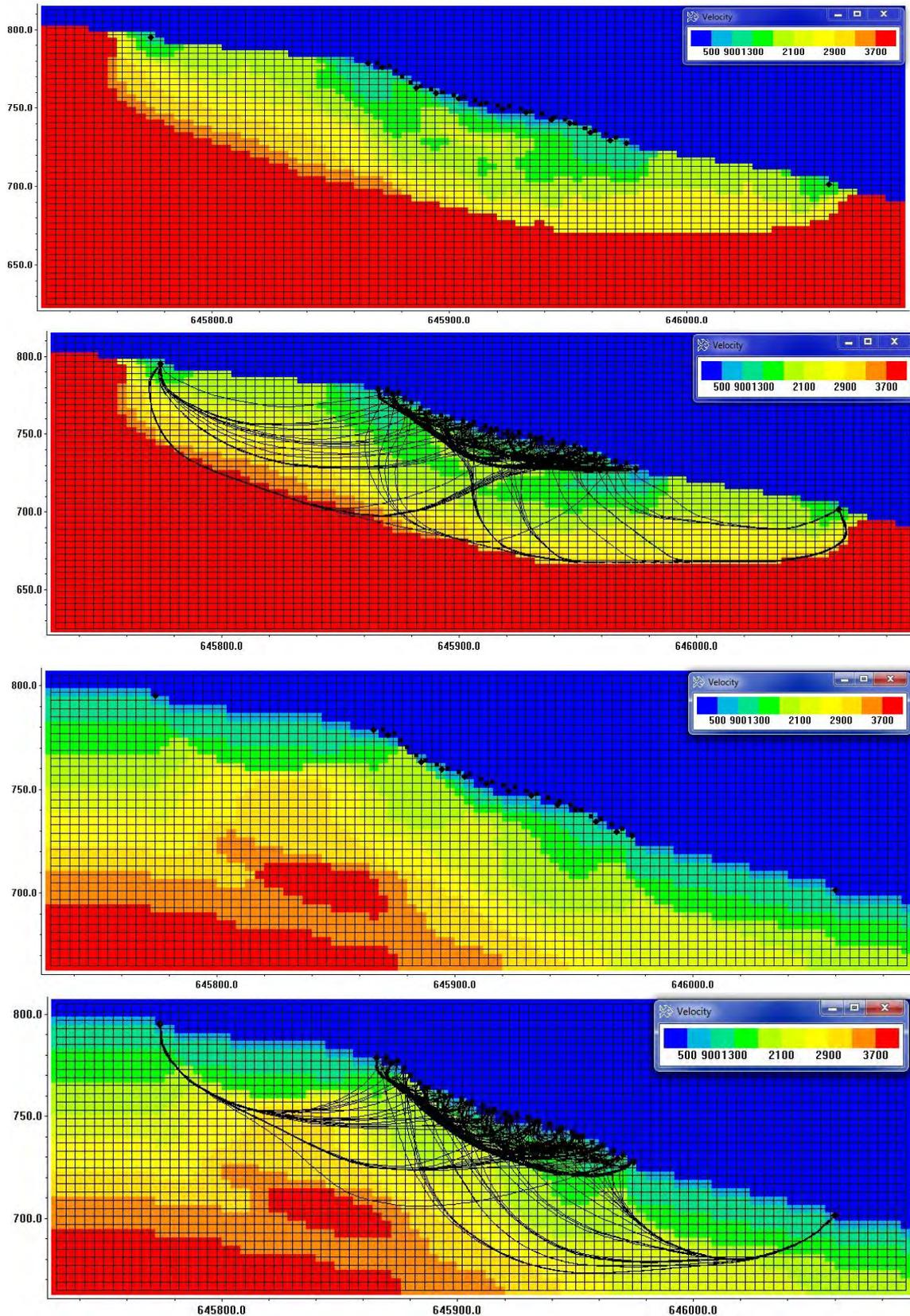


Figure 3.13: Profil PS5 :de haut en bas, modèle obtenu avec modèle initial ($V=4000$ m/s) sans rayon, avec rayon, puis modèle obtenu avec modèle initial ($V=850-4000$ m/s) sans rayon, avec rayon.

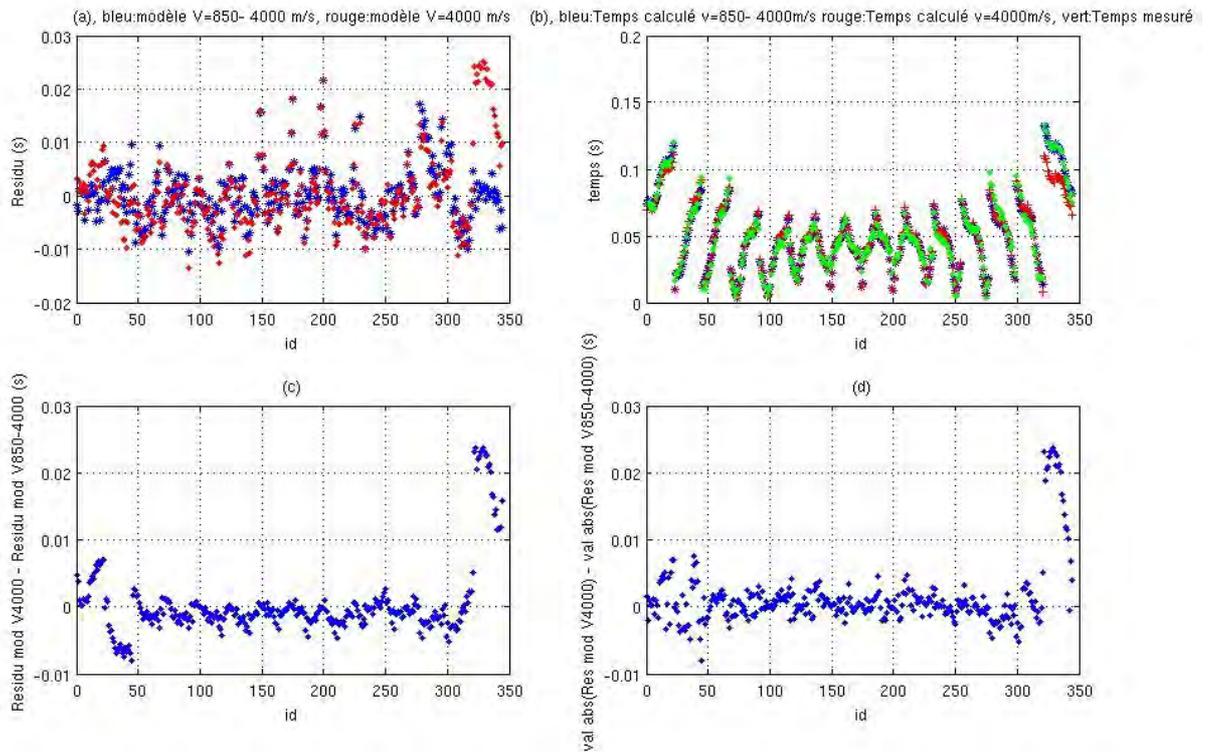


Figure 3.14: Profil PS5 : (a) résidus obtenus avec des modèles initiaux ($V=850-4000$ m/s et $V=4000$ m/s), (b) temps calculés avec $V=850-4000$ m/s, avec $V=4000$ m/s et temps observés, (c) différence entre les résidus obtenus avec modèle initial ($v=4000$ m/s) et résidus obtenus avec modèle initial ($v=850-4000$ m/s) et (d) différence entre les valeurs absolues des résidus obtenus avec modèle initial ($v=4000$ m/s) et les valeurs absolues des résidus obtenus avec modèle initial ($v=850-4000$ m/s)

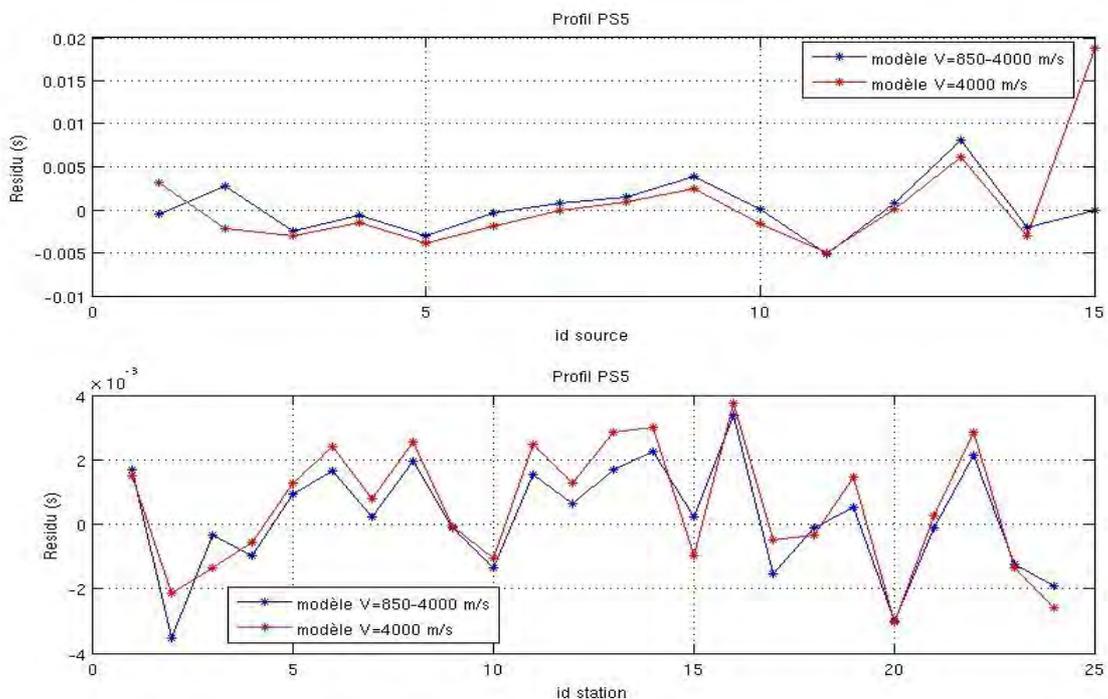


Figure 3.15: Profil PS5 : en haut, Moyennes des résidus par sources obtenues avec un modèle initial $v=850-4000$ m/s et $V=4000$ m/s. En bas : Moyennes des résidus par stions obtenues avec un modèle initial $v=850-4000$ m/s et $V=4000$ m/s

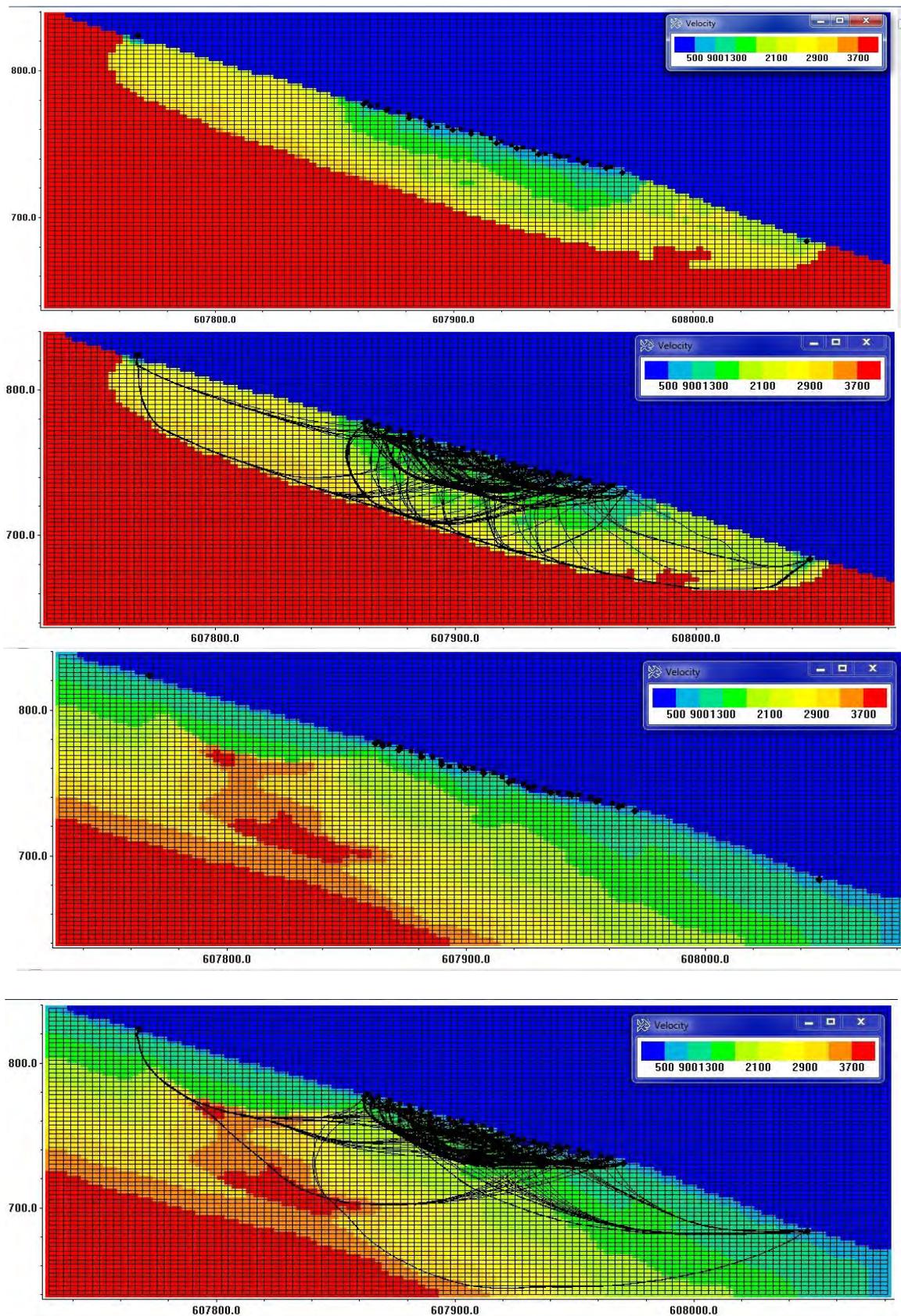


Figure 3.16: Profil PS6 :de haut en bas, modèle obtenu avec modèle initial ($V=4000$ m/s) sans rayon, avec rayon, puis modèle obtenu avec modèle initial ($V=850-4000$ m/s) sans rayon, avec rayon.

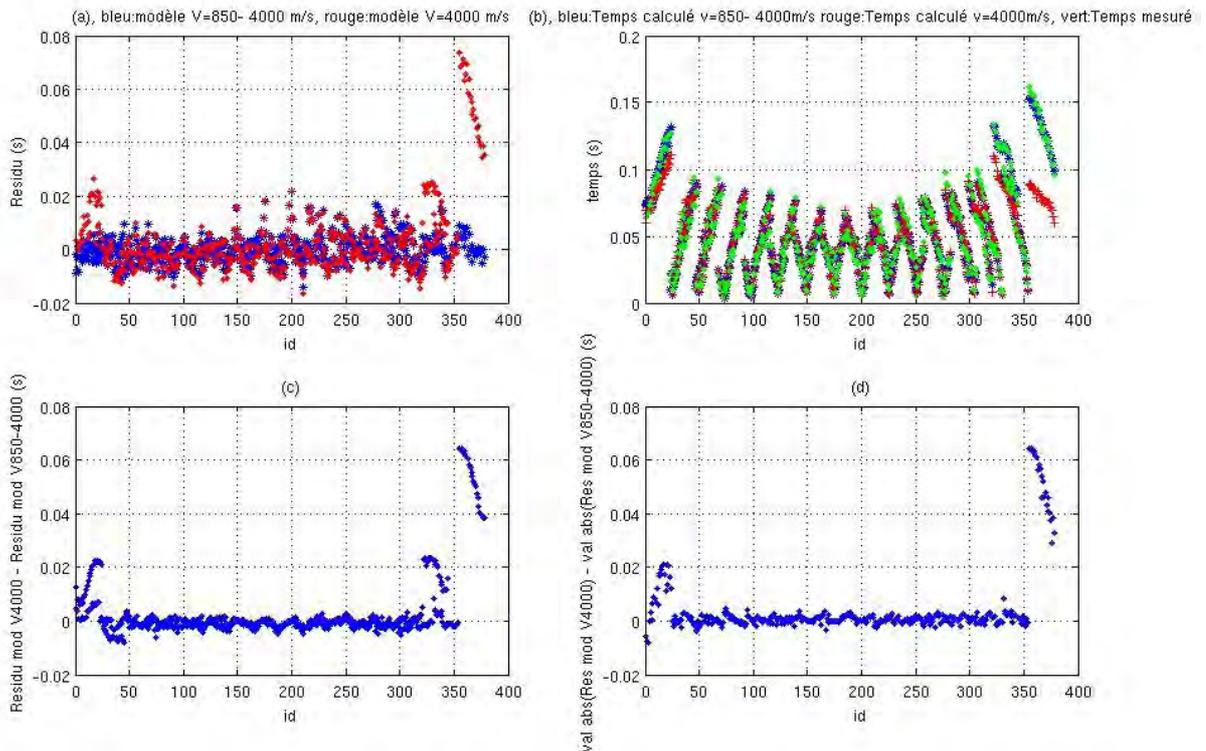


Figure 3.17: Profil PS6 : (a) résidus obtenus avec des modèles initiaux ($V=850-4000$ m/s et $V=4000$ m/s), (b) temps calculés avec $V=850-4000$ m/s, avec $V=4000$ m/s et temps observés, (c) différence entre les résidus obtenus avec modèle initial ($v=4000$ m/s) et résidus obtenus avec modèle initial ($v=850-4000$ m/s) et (d) différence entre les valeurs absolues des résidus obtenus avec modèle initial ($v=4000$ m/s) et les valeurs absolues des résidus obtenus avec modèle initial ($v=850-4000$ m/s).

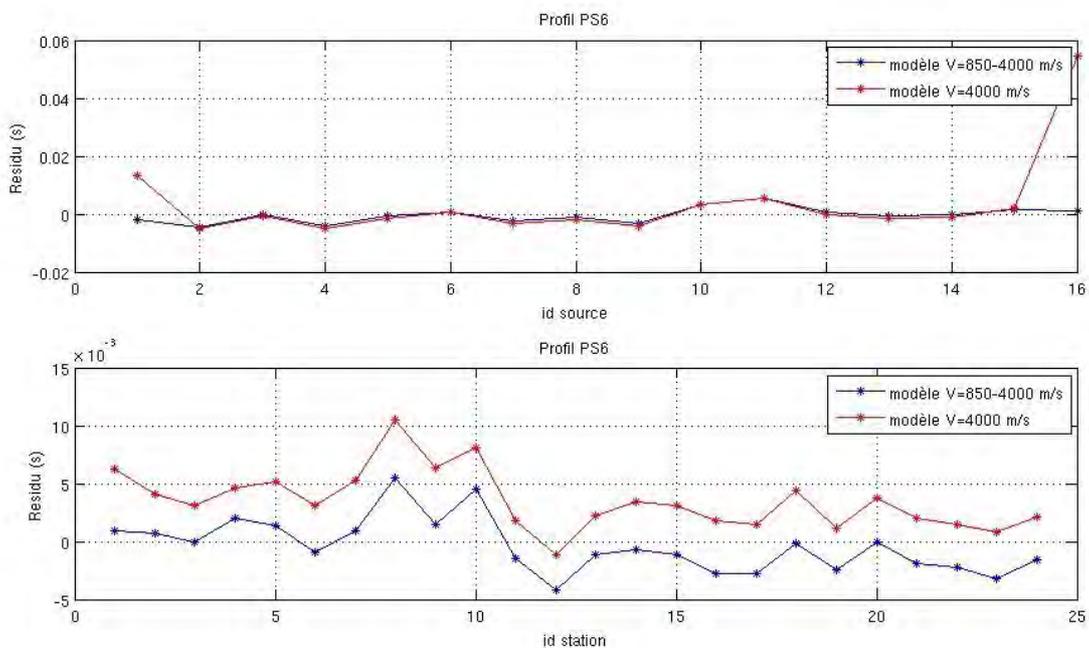


Figure 3.18: Profil PS6 : en haut, Moyennes des résidus par sources obtenues avec un modèle initial $v=850-4000$ m/s et $V=4000$ m/s. En bas : Moyennes des résidus par stations obtenues avec un modèle initial $v=850-4000$ m/s et $V=4000$ m/s.

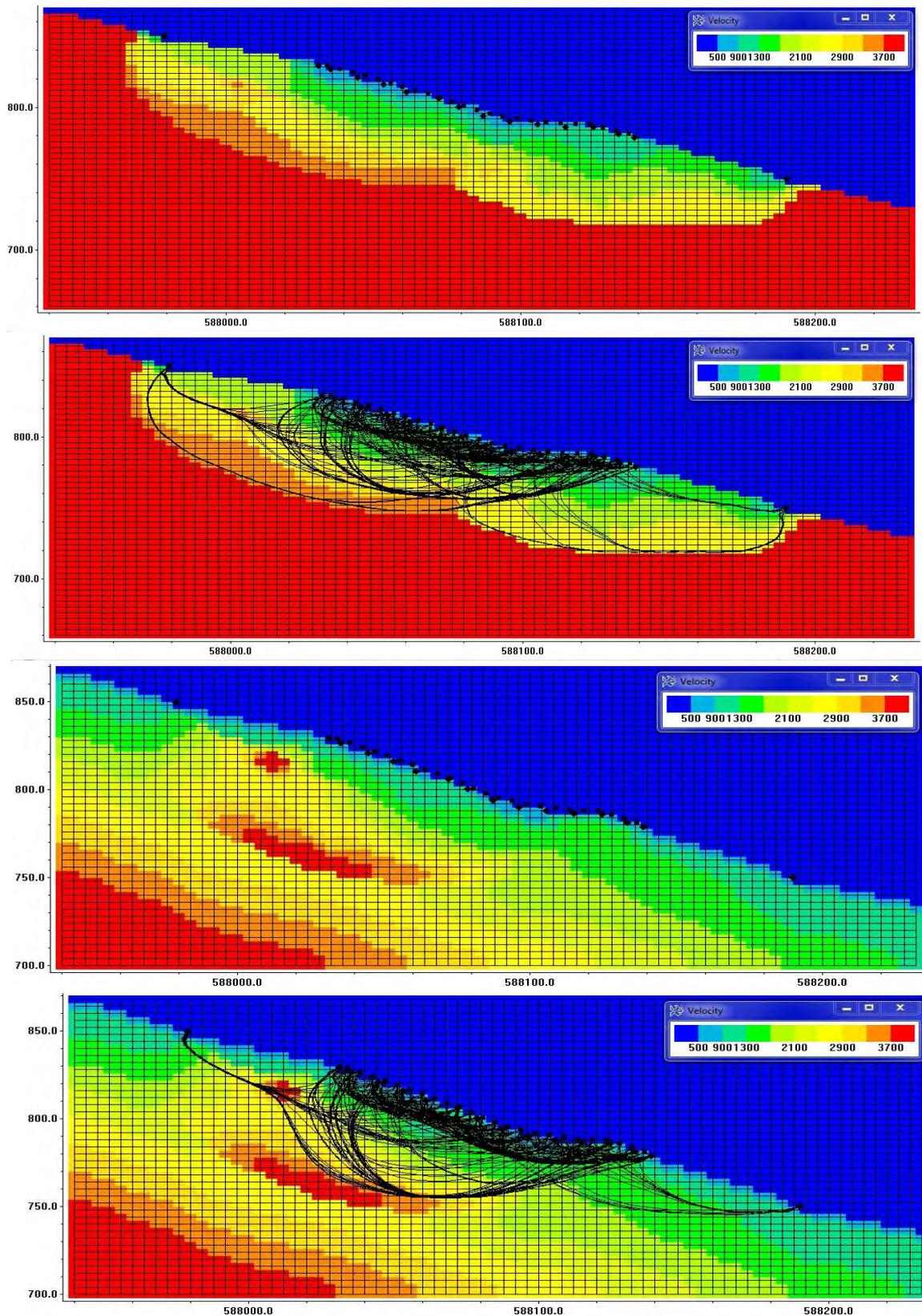


Figure 3.19: Profil PS7:de haut en bas, modèle obtenu avec modèle initial (V=4000 m/s) sans rayon, avec rayon, puis modèle obtenu avec modèle initial (V=850-4000 m/s) sans et avec rayon.

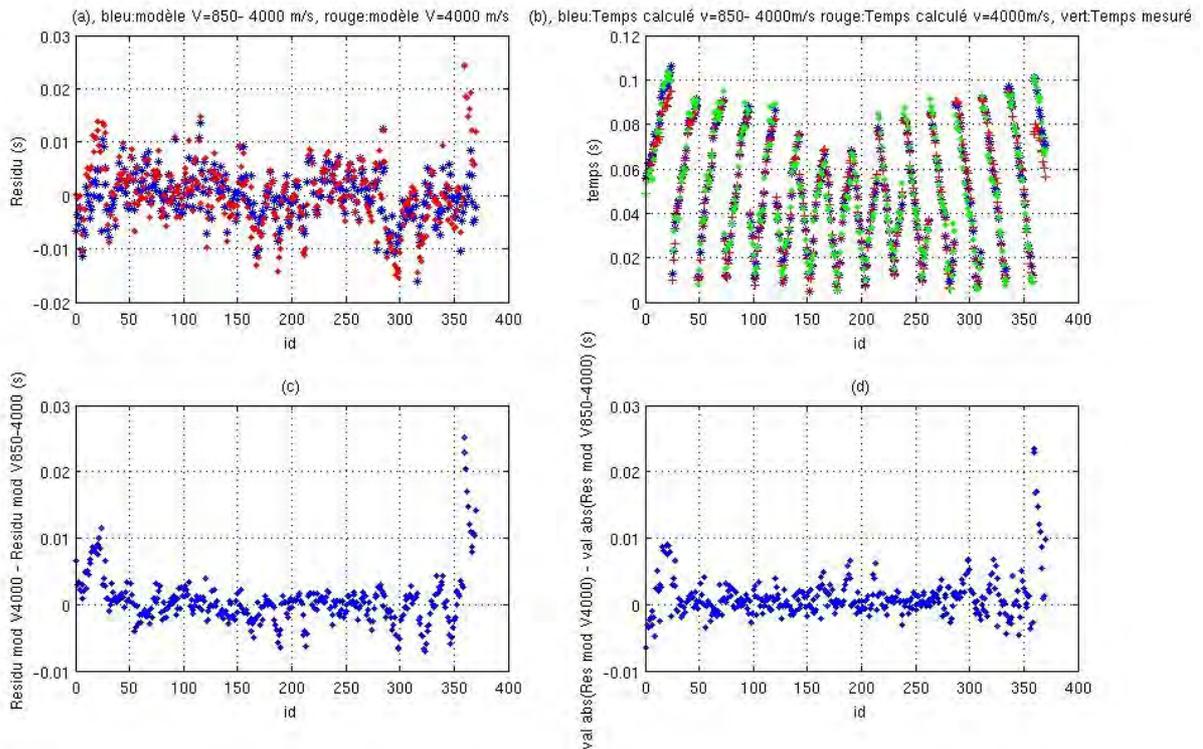


Figure 3.20: Profil PS7 : (a) résidus obtenus avec des modèles initiaux ($V=850-4000$ m/s et $V=4000$ m/s), (b) temps calculés avec $V=850-4000$ m/s, avec $V=4000$ m/s et temps observés, (c) différence entre les résidus obtenus avec modèle initial ($v=4000$ m/s) et résidus obtenus avec modèle initial ($v=850-4000$ m/s) et (d) différence entre les valeurs absolues des résidus obtenus avec modèle initial ($v=4000$ m/s) et les valeurs absolues des résidus obtenus avec modèle initial ($v=850-4000$ m/s).

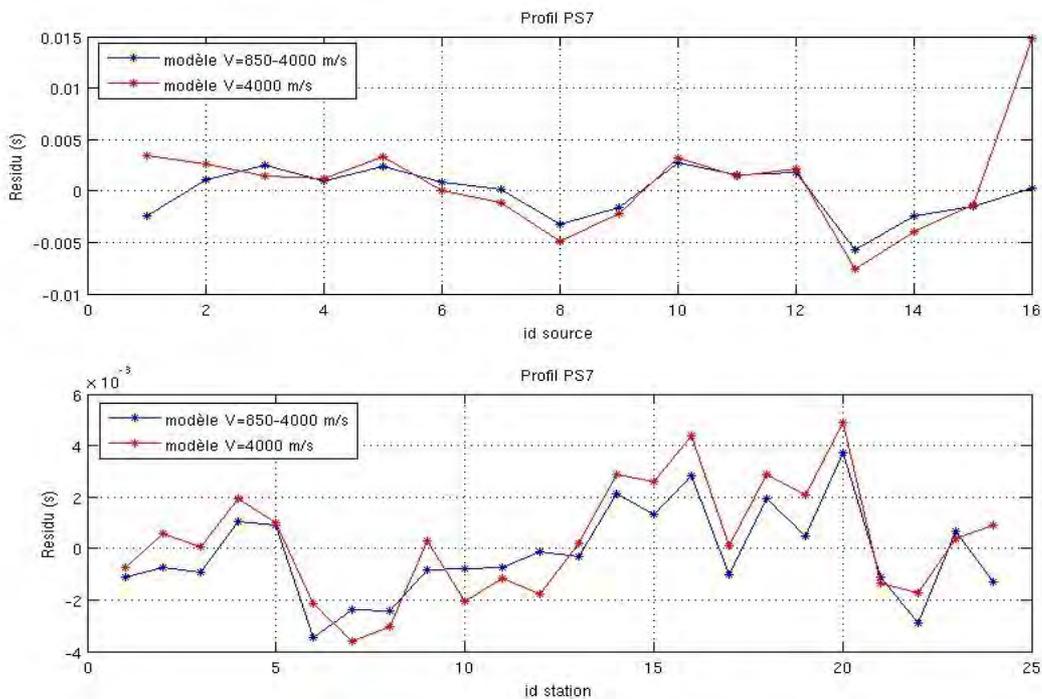


Figure 3.21: Profil PS7 : en haut, Moyennes des résidus par source obtenues avec un modèle initial $v=850-4000$ m/s et $V=4000$ m/s. En bas : Moyennes des résidus par stations obtenues avec un modèle initial $v=850-4000$ m/s et $V=4000$ m/s

	PS1PS2	PS3PS4	PS5	PS6	PS7
Moyenne des résidus (s) Modèle homogène	0.0012	-0.0013	5.71 10 ⁻⁴	0.0035	3.52 10 ⁻⁴
Moyenne des résidus (s) Modèle à gradient	-4.38 10 ⁻⁴	-7.52 10 ⁻⁴	2.07 10 ⁻⁴	-3.76 10 ⁻⁴	-1.90 10 ⁻⁴

Tableau 3.1: Moyenne des résidus pour chaque profil et pour chacun des modèles initiaux utilisés pour l'inversion (Modèle homogène ou modèle à gradient)..

Globalement, les modèles obtenus avec le modèle initial homogène ($V=4000$ m/s) ou avec le modèle initial à gradient de vitesse ($V=850-4000$ m/s) sont cohérents (voir figures 3.7, 3.10, 3.13, 3.16 et 3.19). Cependant, plusieurs remarques peuvent être faites :

- Concernant les résidus (voir figures 3.8, 3.9, 3.11, 3.12, 3.14, 3.15, 3.17 et 3.18), la moyenne des résidus en valeur absolue est plus petite avec le modèle à gradient qu'avec le modèle homogène (voir tableau 1), ceci quel que soit le profil. La moyenne des résidus par source est assez similaire avec les deux modèles exceptés pour les sources correspondant aux grands dépôts (source en bout de profils). Dans ce cas, le modèle homogène produit des résidus par source très importants après inversion contrairement au modèle à gradient. Ceci est particulièrement visible sur les profils la source 15 de PS5 et sur les sources 1 et 16 de PS6 et PS7. D'autre part, la moyenne des résidus par station est quasi systématiquement plus grande pour le modèle homogène que pour le modèle à gradient pour les profils PS1PS2 et PS6.
- Globalement, si l'on considère les cellules traversées par des rayons, l'épaisseur de la zone déstructurée est plus importante avec le modèle initial à gradient, ceci est particulièrement visible sur les profils PS1PS2 (figure 3.7) et PS6 (figure 3.16). Par exemple, l'épaisseur peut augmenter de 15 à 20 % sur le profil PS1PS2 lorsque l'on utilise le modèle à gradient plutôt que le modèle homogène.
D'autre part, le modèle final obtenu apparaît mieux contraint en profondeur avec un modèle initial à gradient. Ceci est particulièrement visible sur les profils PS5, PS6 et PS7 (figures 3.13, 3.16 et 3.19) où la zone à forte vitesse (passage à 4000 m/s) est bien contrainte et peu profonde dans la partie Nord-Ouest des profils et s'approfondit dans la partie Sud-Est des profils. Les épaisseurs obtenues pour les profils PS5, PS6 et PS7 sont cohérentes entre elles. L'approfondissement de la zone déstructurée vers le SE est en accord avec les résultats obtenus sur le profil PS1PS2. Le dispositif utilisé pour les profils PS5, PS6 et PS7 ne permet pas d'atteindre la transition zone saine- zone déstructurée dans la partie SE des profils. De même, pour le profil PS1PS2, les rayons contraignent bien le passage de la zone déstructurée à la zone saine ce qui n'est pas le cas lorsque l'on utilise le modèle homogène.

Ces analyses montrent que le modèle initial choisi est important et qu'il induit après inversion des différences assez conséquentes dans le modèle final en terme de géométrie des structures et de vitesses. De plus, le modèle à gradient permet d'obtenir des résidus globalement plus petits en particulier pour les sources correspondant aux grands dépôts ce qui permet d'obtenir un modèle final plus fiable et mieux contraint qu'avec le modèle initial homogène. Dans le cas précis de cette étude, il apparaît plus opportun d'utiliser le modèle initial à gradient plutôt que le modèle homogène.

En terme d'interprétation, si l'on regarde les modèles finaux obtenus avec le modèle initial à gradient, on peut affiner ou confirmer plusieurs éléments par rapport aux résultats obtenus avec un modèle initial homogène.

Le long du profil PS1PS2 à l'aplomb des récepteurs (figure 3.7), l'épaisseur est de l'ordre de 130 m et apparaît bien contrainte par les données. Aux deux extrémités du profil (au Sud-Ouest et au Nord-Est), la zone déstructurée apparaît plus mince (inférieure ou égale à 20 m) mais est peu contrainte par les rayons.

Les modèles obtenus pour les profils PS5, PS6 et PS7 (figures 3.13, 3.16 et 3.19) montrent un épaissement de la zone déstructurée du Nord-Ouest vers le Sud-Est avec une épaisseur variant de 60-70 m pour les trois profils à respectivement des épaisseurs respectivement supérieures à 70 m, 100 m et 70 m pour les profils PS5, PS6 et PS7 en accord avec le modèle obtenu avec PS1PS2.

Concernant le profil PS3PS4 (figure 3.10), les modèles finaux obtenus avec un modèle initial homogène ou à gradient sont très similaires et présentent :

- une épaisseur de la zone déstructurée quasi nulle au niveau de l'extrémité Sud-Est en accord avec le modèle obtenu pour le profil PS1PS2.
- une épaisseur de la zone déstructurée peu importante à l'extrémité Nord-Ouest (inférieure à 40 m) mais peu contrainte par les rayons.
- une épaisseur de la zone déstructurée très importante dans la partie centrale du profil (d'environ 200 m d'épaisseur) constituant une loupe de roche déstructurée corrélée à la topographie (zone à forte pente).

4. Résultats en sismique réflexion.

Bien que la configuration d'acquisition ne soit pas optimale pour une exploitation des données en sismique réflexion et que la zone déstructurée du glissement de terrain soit très complexe à imager en sismique réflexion, les profils de sismique active PS1 à PS7 ont été traités en sismique réflexion dans le but d'évaluer la possibilité d'imager le glissement de terrain et de visualiser la transition zone saine, zone déstructurée à partir des profils à notre disposition.

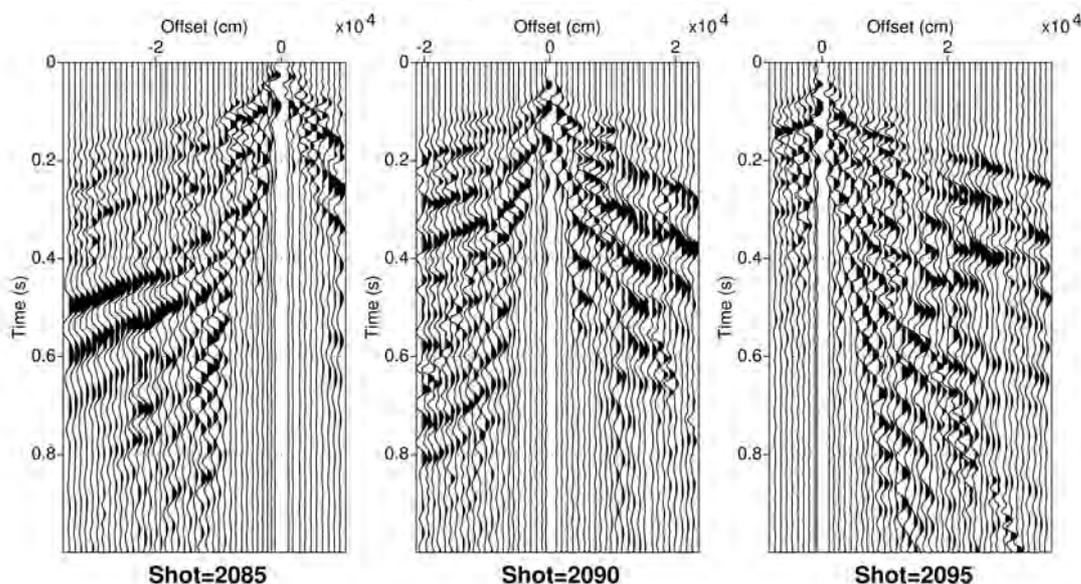


Figure 4.1 : Exemples de point de tir 2085, 2090 et 2095 issus du profil PS1.

Les tests de traitements ont été effectués sur tous les profils sismiques. Nous présentons ici uniquement les résultats obtenus avec le profil PS1 à titre d'exemple.

Le profil PS1 est constitué de 20 points de tir : 2080 à 2099 et de 48 géophones. Une source explosive a été utilisée pour l'acquisition des données. La figure 4.1 présente 3 points de tirs bruts (2085, 2090 et 2095). On remarque une dissymétrie des points de tirs, en particulier pour le point de

tir 2090, qui est due en partie à la topographie le long du profil et sans doute à l'hétérogénéité de la couche superficielle.

4.1. Analyse spectrale, tentative de rehaussement des hautes fréquences et filtrage FK.

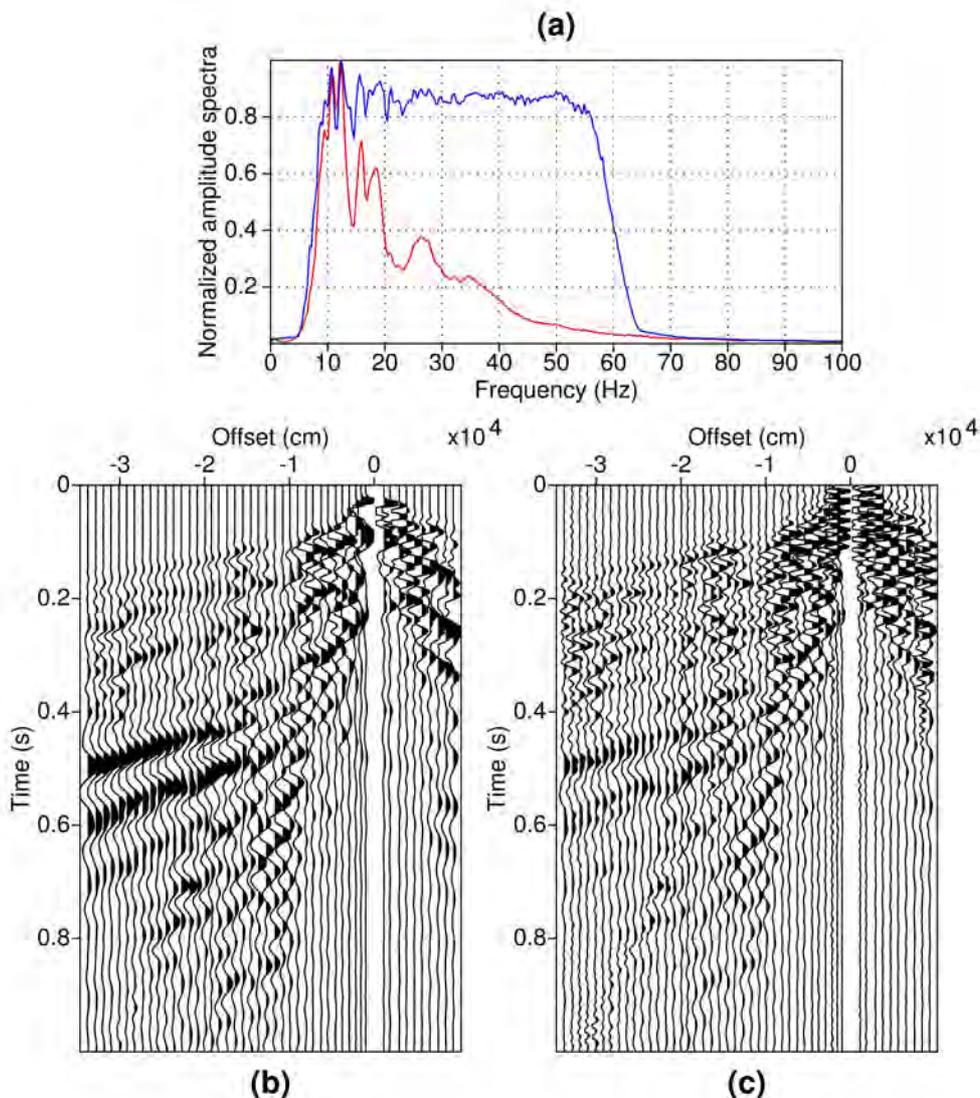


Figure 4.2 : Exemple de rehaussement du contenu spectral sur le point de tir 2085. (a) spectre initial en rouge, spectre rehaussé en bleu. (b) point de tir brut et (c) point de tir après rehaussement des hautes fréquences.

Le contenu fréquentiel est essentiellement compris entre 5 et 40-50 Hz (Figure 4.2a) ce qui correspond à un contenu fréquentiel très bas. L'essentiel de l'énergie est même essentiellement comprise entre 5 et 25-30 Hz. La très grande hétérogénéité de la partie superficielle peut être à l'origine de l'atténuation et de la diffraction des signaux et expliquer ce contenu fréquentiel. L'application d'un filtrage passe haut (fréquence >35 Hz) ne permet pas de différencier le contenu fréquentiel des ondes de surface et d'éventuelles réflexions. Un simple filtrage des données n'est pas suffisant.

Les tentatives pour rehausser les hautes fréquences (Spectral balancing) (figure 4.2a,b et c) n'ont

pas permis de faire ressortir d'éventuelles réflexions. Au dessus de 50-60 Hz, le bruit prédomine.

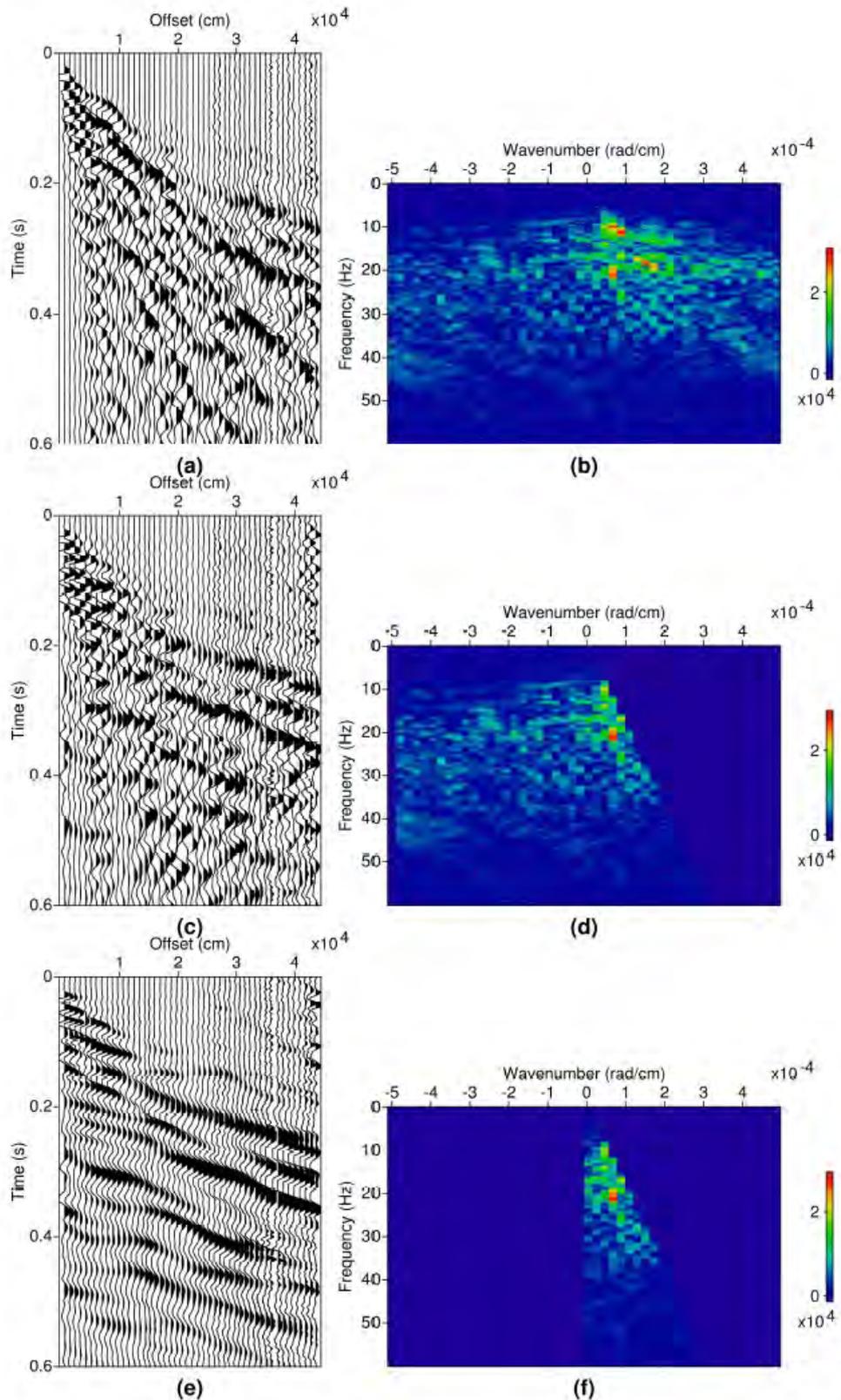


Figure 4.3 : (a) point de tir brut 2097 et (b) spectre de la domaine FK correspondant. (c) point de tir obtenu après filtrage dans le domaine FK de vitesses faibles (> 2000 m/s) et (d) spectre de la domaine FK correspondant. (e) point de tir obtenu après filtrage dans le domaine FK de vitesses faibles (> 2000 m/s) et des vitesses négatives et (f) spectre de la domaine FK correspondant.

D'une façon générale, les tests effectués dans le domaine FK sur les points de tir montrent un

contenu fréquentiel (entre 5-10 Hz et 30-40 Hz) et un nombre d'onde (entre -5 et $5 \cdot 10^{-4}$ rad/cm) restreints en permettant pas de visualiser des pentes bien définies. Un exemple est présenté sur la figure 4.3. On devine cependant éventuellement deux pentes de vitesses positives (figure 4.3b) pouvant correspondre d'une part à les ondes de surface et onde directe et d'autre part, à les ondes réfractées et réfléchies si elles existent. On remarque l'existence de vitesses apparentes négatives qui peuvent notamment être dues à des ondes rétro-propagées dans le milieu superficiel très hétérogène et/ou également liées à des problèmes d'aliasing spatial. Les essais de filtrage des pentes négatives et/ou des vitesses très faibles ne permettent pas de trancher sans ambiguïté sur l'existence ou non de signaux réfléchis. La figure 4.3e montrent des signaux cohérents entre 0 et 0.1 s et à offsets courts mais il paraît hasardeux de les interpréter comme des réflexions.

Des essais de filtrage FK ont également été réalisés sur les profils PS5, PS6 et PS7. Un exemple est présenté sur la figure 4.4. Ces profils présentent une distance inter-géophone plus petite (5m) et donc une gamme de nombres d'onde plus large que sur les autres profils (distance inter-géophone de 10 m). Par contre, on ne dispose que de 24 traces et le contenu fréquentiel reste restreint et basse fréquence. L'analyse dans le domaine FK ne permet pas d'analyse plus fine.

Pour pouvoir approfondir cette analyse, il faudrait pouvoir mieux visualiser les différentes pentes en augmentant la gamme des nombres d'ondes et en élargissant le contenu fréquentiel vers les hautes fréquences tout en ayant un nombre de traces suffisant.

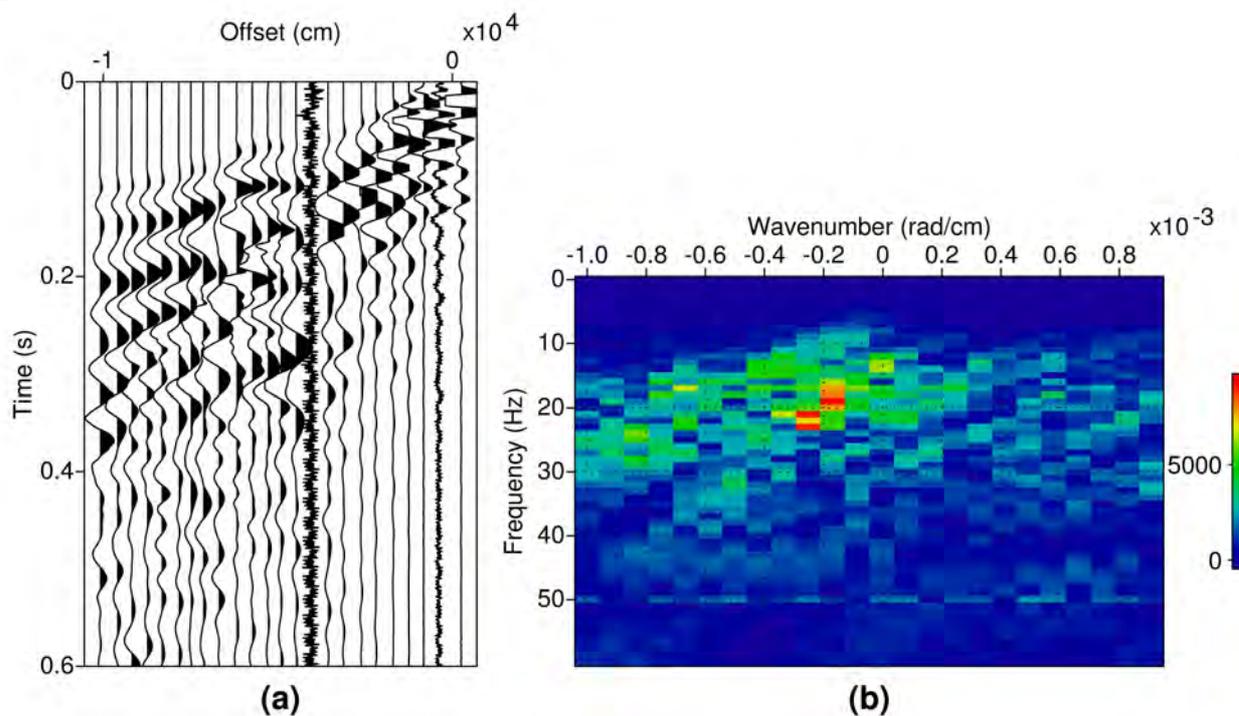


Figure 4.4 : (a) point de tir brut 15 du profil PS7 et (b) spectre de le domaine FK correspondant.

4.2. Modélisation avec le logiciel *skb2*

Avant d'effectuer un traitement complet en sismique réflexion, différents tests de modélisation ont été effectués en utilisant le code développé par Dietrich (1988) qui modélise la propagation d'onde acoustique et sismique dans un milieu stratifié plan. Ce code a été défini à partir de la technique de réflectivité développée par Kennet et Kerry (1979) et la méthode d'intégration en nombres d'ondes discrets (Bouchon et Aki, 1977, Bouchon, 1981).

Les modèles utilisés ont été contraints par les résultats obtenus en tomographe sismique et la fréquence dominante ainsi que les facteurs de qualité utilisés pour la modélisation respectent au

mieux les caractéristiques de la zone d'étude. Avec ces modélisations, le but est de définir s'il est possible d'individualiser les différents trains d'ondes présents dans les points de tir et en particulier des ondes réfléchies qui nous intéressent en premier lieu dans le cadre d'un traitement en sismique réflexion.

L'étude de l'influence de la fréquence dominante du signal sur le sismogramme obtenu dans le cas d'un modèle simple à deux couches et la comparaison entre points de tirs réels et synthétiques va nous permettre de mieux comprendre quels sont les trains d'onde présents dans les données réelles.

Le modèle choisi (figure 4.5) est un modèle à deux couches correspondant à un modèle moyen obtenu à partir des tomographies sismiques (cohérent notamment avec le modèle obtenu sur le profil PS1).

La surface libre n'est pas prise en compte dans les modélisations qui suivent. Le clip est non constant d'un sismogramme à l'autre.

VP=1700 m/s VS=1000 m/s Épaisseur couche 1=80 m

VP=4000 m/s VS=2500 m/s Épaisseur couche 2=500 m

Figure 4.5:Modèle choisi pour effectuer la modélisation. La source est localisée à 10 m du premier géophone et la distance intergéophone est de 10 m.

4.2.1. Influence de la fréquence dominante du signal.

Les simulations ont été effectuées avec une source Explosive pour différentes fréquences dominantes (100, 50, 20 Hz). Pour référence, La composante verticale du point de tir a été calculée avec une fréquence dominante de 100 Hz et un facteur de qualité de 100 pour les 2 couches du modèle utilisé et est présentée dans la figure 4.6. Cet exemple permet de différencier clairement les différents trains d'ondes directs, réfléchis, réfractés et converties en ondes P et S.

Pour simuler la composante verticale d'un point de tir similaire proche des conditions sur le terrain, où l'atténuation est forte dans la première couche déstructurée, nous avons choisi un facteur de qualité pour les ondes P et S égal à 10 ($Q_{S1}=Q_{P1}=10$) pour la première couche déstructurée et un facteur de qualité pour les ondes P et S égal à 100 ($Q_{P2}=Q_{S2}=100$) pour la deuxième couche saine. Les figures 4.7, 4.8 et 4.9 montrent la composante verticale d'un point de tir obtenu pour une fréquence dominante respectivement égale à 100, 50 et 20 Hz.

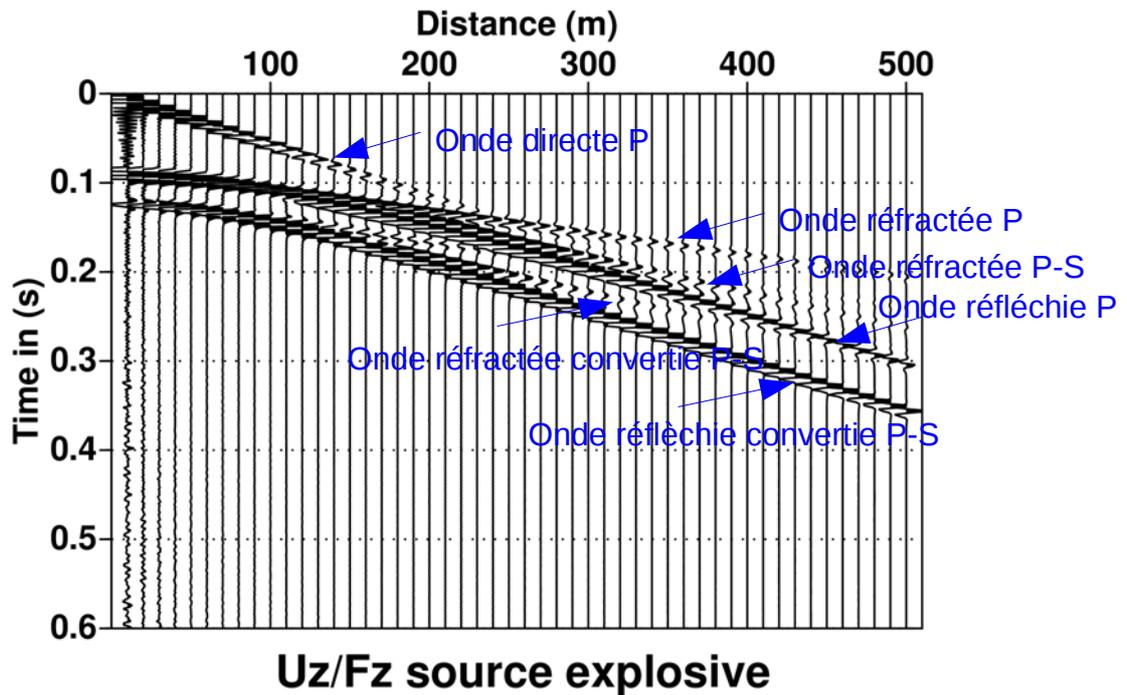


Figure 4.6. Composante verticale du Point de tir synthétique obtenue avec une source Explosive avec le modèle de la figure 4.5. La fréquence dominante F_{pick} est de ≈ 100 Hz. Les facteurs de qualité Pour les ondes P et S sont respectivement $Q_{P1}=Q_{S1}=100$ pour la couche 1 et $Q_{P2}=Q_{S2}=100$ pour la couche 2

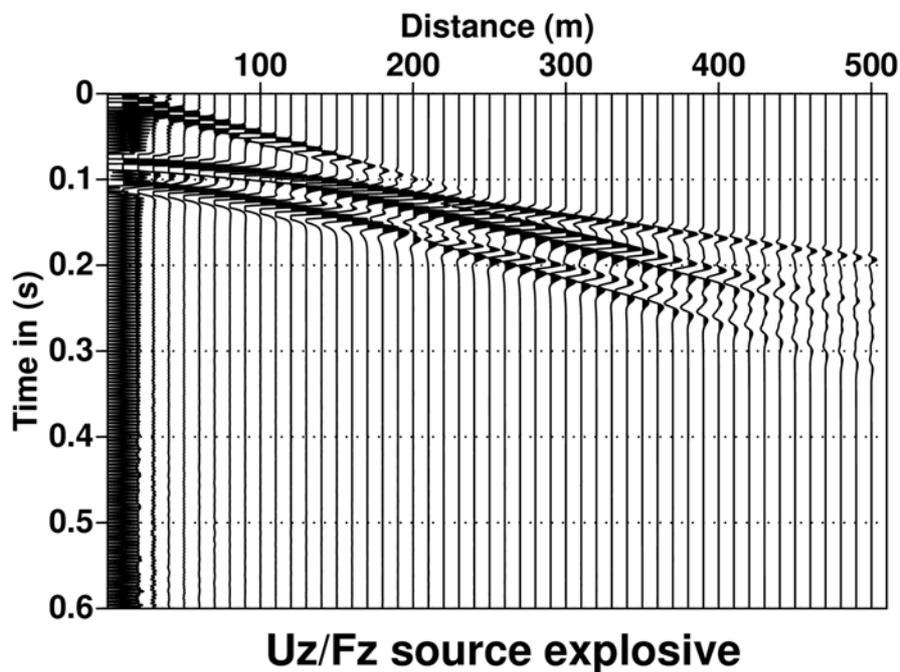


Figure 4.7. Composante verticale du Point de tir synthétique obtenue avec une source explosive avec le modèle de la figure 4.5. La fréquence dominante F_{pick} est de ≈ 100 Hz. Les facteurs de qualité Pour les ondes P et S sont respectivement $Q_{P1}=Q_{S1}=10$ pour la couche 1 et $Q_{P2}=Q_{S2}=100$ pour la couche 2.

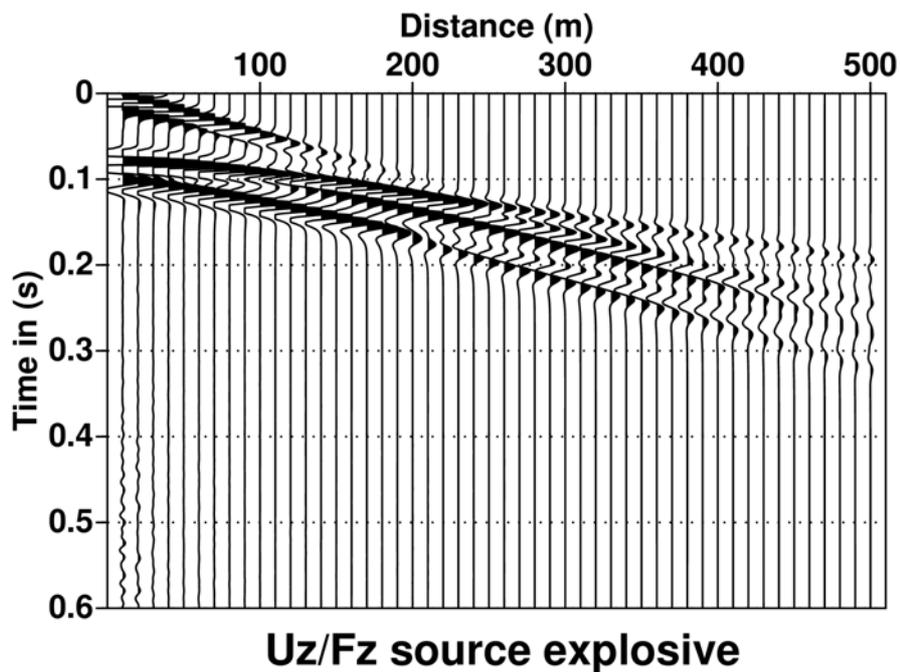


Figure 4.8. Composante verticale du Point de tir synthétique obtenue avec une source explosive avec le modèle de la figure 4.5. La fréquence dominante F_{pick} est de ≈ 50 Hz. Les facteurs de qualité Pour les ondes P et S sont respectivement $QP1=QS1=10$ pour la couche 1 et $QP2=QS2=100$ pour la couche 2.

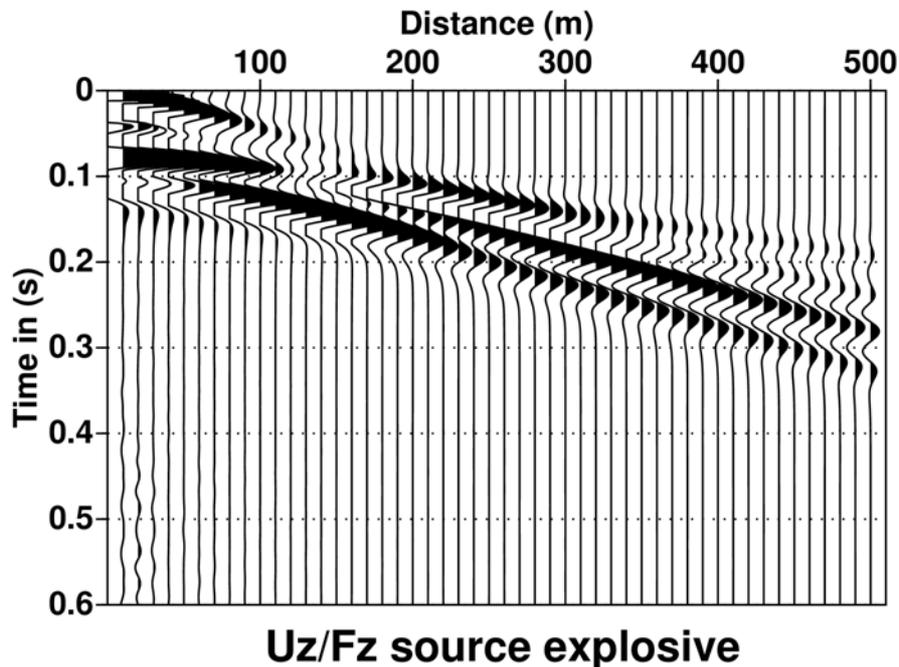
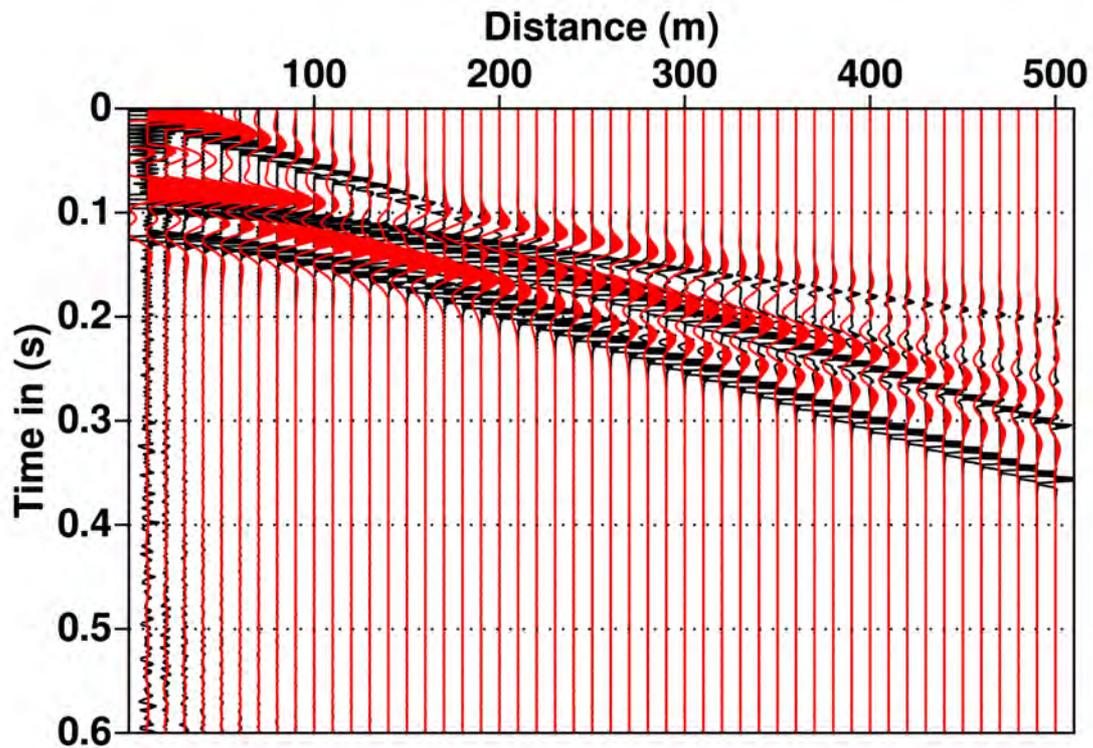
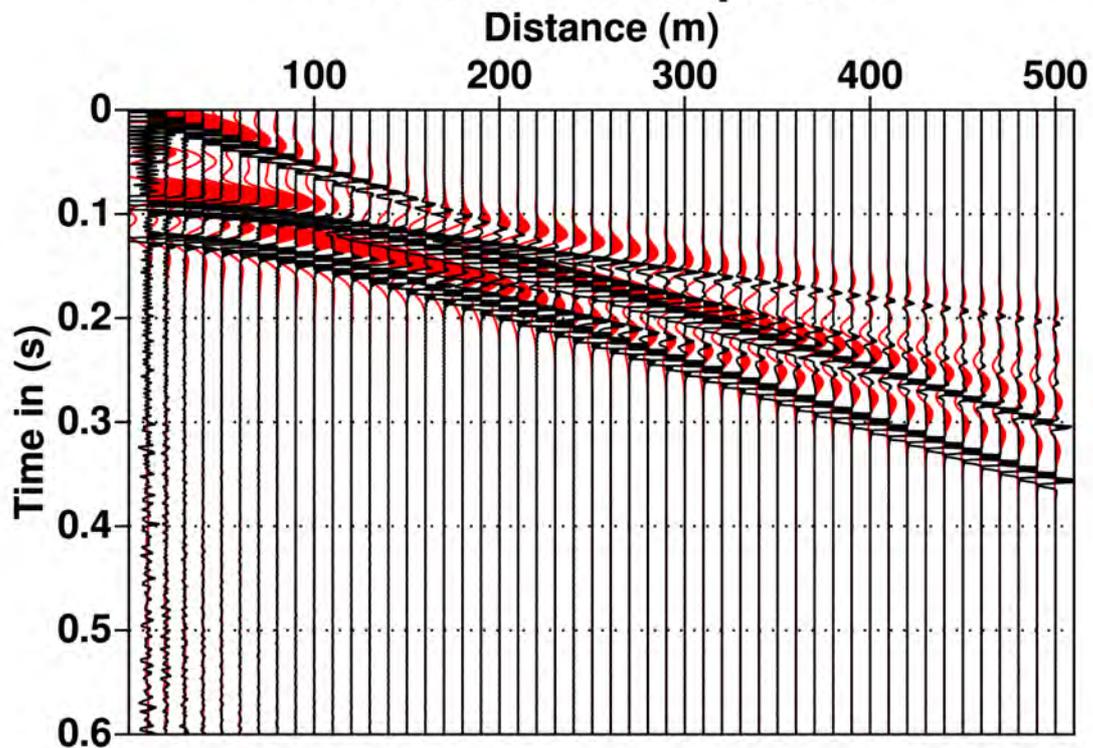


Figure 4.9. Composante verticale du Point de tir synthétique obtenue avec une source explosive avec le modèle de la figure 4.5. La fréquence dominante F_{pick} est de ≈ 20 Hz. Les facteurs de qualité Pour les ondes P et S sont respectivement $QP1=QS1=10$ pour la couche 1 et $QP2=QS2=100$ pour la couche 2.



Uz/Fz source explosive



Uz/Fz source explosive

Figure 4.10: Superposition de la composante verticale du point de tir synthétique obtenue avec une source explosive avec $f_{pick}=100$ Hz et $QP1=QS1=QP2=QS2=100$ (en noir) et de la composante verticale du point de tir synthétique obtenu avec une source explosive avec $f_{pick}=20$ Hz et $QP1=QS1=10$ et $QP2=QS2=100$ (en rouge.) Les 2 figures sont identiques, la superposition des modèles est simplement inversée pour une meilleure visualisation.

La baisse de la fréquence dominante montre clairement l'interférence des différentes phases qui devient de plus en plus marquée quand la fréquence dominante diminue (figures 4.7 à 4.9). A 20 Hz (fréquence dominante proche de celle du signal enregistré dans les données réelles), il devient difficile de dissocier les différentes arrivées (figure 4.9). D'autre part, à basse fréquence, il y a des déphasages dans le signal enregistré par rapport au signal haute fréquence qui génèrent des incertitudes sur les calculs de vitesses de propagation et sur l'épaisseur de la première couche (figure 4.10).

Pour exemple, l'épaisseur de la couche 1 a été calculée pour les points de tir synthétiques obtenus avec une fréquence dominante de 100 et 20 Hz. Cette épaisseur a été obtenue en utilisant la distance Xcross correspondant à l'intersection entre l'onde directe et l'onde réfractée selon la formule classique suivante:

$$Z = \frac{X_{cross}}{2[(V_2 + V_1)/(V_2 - V_1)]^{(1/2)}} \quad (1)$$

avec V1, la vitesse de l'onde P dans la couche 1 et V2, la vitesse de l'onde P dans la couche 2.

Pour le point de tir de fréquence dominante fpick=100 Hz et des facteurs de qualité QP1=QS1=QP2=QS2=100, la distance Xcross est de 250 m, on retrouve une épaisseur Z de 80 m pour la première couche conformément au modèle initial.

Pour le point de tir de fréquence dominante fpick=20 Hz et des facteurs de qualité QP1=QS1=10 et QP2=QS2=100, la distance Xcross=190 m et on obtient une épaisseur de 60 m seulement.

On constate sur cet exemple que le contenu essentiellement basse fréquence du signal enregistré induit des erreurs non négligeables (ici, 25 % de variation de l'épaisseur) sur les calculs d'épaisseur et minimise les épaisseurs.

Concernant la vitesse obtenue avec l'onde réfractée en P, il y a un déphasage mais la pente reste la même, la vitesse calculée reste donc identique.

Par contre, on note une légère variation dans la pente de l'onde directe entre le modèle obtenu avec fpick=100 et QP1=QS1=100 et QP2=QS2=100 et le modèle fpick=20 Hz et QP1=QS1=10 et QP2=QS2=100, la vitesse est légèrement surestimée (V1=1890 m/s au lieu de 1700 m/s).

Aux courts offsets (< 120 m), l'onde réfléchiée en P à basse fréquence dominante (fpick=20 Hz) est déphasée ce qui induit des temps d'arrivée à offset nul plus courts et donc une sous estimation de l'ordre de 17 m sur l'épaisseur de la première couche.

Aux offsets >120 m, il devient difficile de dissocier clairement l'hyperbole de réflexion des ondes P qui interfèrent avec les différents trains d'onde (l'épaisseur et la vitesse ne sont pas bien contraintes).

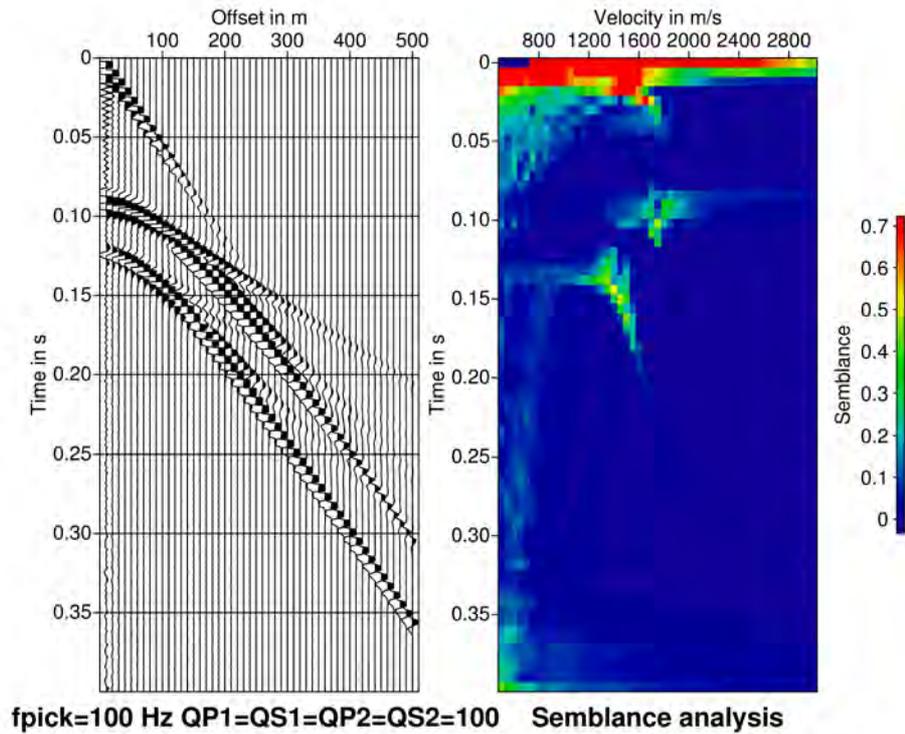


Figure 4.11 : Analyse des vitesses RMS avec le point de tir synthétique obtenu avec la fréquence dominante $fpick=100$ Hz et les facteurs de qualité $QP1=QS1=QP2=QS2=100$.

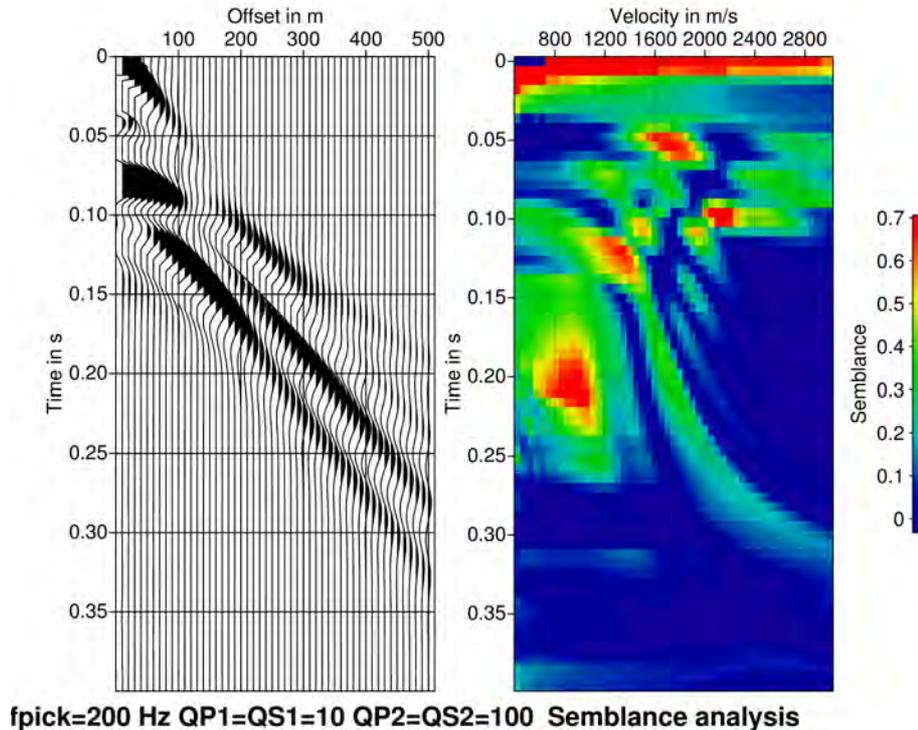


Figure 4.12 : Analyse des vitesses RMS avec le point de tir synthétique obtenu avec la fréquence dominante $fpick=200$ Hz et les facteurs de qualité $QP1=QS1=10$ et $QP2=QS2=100$.

Les analyses de vitesse RMS par analyse de semblance ont été effectuées pour le point de tir de fréquence dominante $fpick=100$ Hz avec des facteurs de qualité $QP1=QS1=QP2=QS2=100$ et le

point de tir de fréquence dominante $f_{pick}=20$ Hz avec des facteurs de qualité $QP_1=QS_1=10$ et $QP_2=QS_2=100$. Les résultats sont présentés sur les figures 4.11 et 4.12. On observe clairement que, pour le point de tir obtenu avec une fréquence dominante basse ($f_{pick}=20$ Hz), l'analyse des semblances n'est pas facilement interprétable et ne permet pas d'obtenir un modèle de vitesse fiable. Les zones de fortes semblances sont peu contraintes et certaines d'entre elles ne correspondent à aucun réflecteur comme par exemple, pour la zone de forte semblance localisée à un temps de 0.2 s et une vitesse de 1000 m/s. Ainsi, les signaux basse fréquence tels que ceux que l'on a sur le glissement de terrain de Séchilienne ne permettront pas d'obtenir des modèles de vitesses corrects et bien contraints.

4.2.2. Comparaison entre points de tirs réels et synthétiques.

Afin d'individualiser les différents trains d'ondes présents dans les données réelles et de vérifier la présence éventuelle d'hyperboles de réflexion dans les données réelles, nous avons comparé des points de tir réels avec des points de tir synthétiques obtenus à partir de modèle basé sur les résultats de la tomographie 2D. Nous présentons deux exemples issus du profil PS1 :

- un point de tir avec la source à proximité du premier géophone correspondant à de petits déports (points de tir 2097)
- un point de tir avec la source éloignée du premier géophone correspondant à de grands déports (points de tir 2098)

4.2.2.1. Exemple du point de tir 2097 (profil PS1).

Le modèle utilisé pour obtenir le sismogramme synthétique comparable au point de tir réel 2097 est décrit dans la figure 4.13. La source est une source explosive située à 5 m du premier géophone. La distance inter-géophone est de 10 m et la fréquence dominante f_{pick} est égale à 20 Hz.

VP=1200 m/s VS=800 m/s Épaisseur 1ère couche=70 m QP=QS=10

VP=4000 m/s VS=2500 m/s Épaisseur 2ème couche=500 m QP=QS=100

Figure 4.13 : Modèle utilisé pour générer le point de tir synthétique comparé au point de tir réel 2097.

Les figures 4.14a et 4.14b présentent la superposition des points de tir réel 2097 (en rouge) et le sismogramme synthétique (en noir) obtenu avec le modèle décrit dans la figure 4.13.

Les ondes directes réelles et simulées ne présentent pas de cohérence. On remarque un train d'onde pas tout à fait linéaire présentant un décalage en temps (de l'ordre de 0.02s pour la première trace qui se situe à 5 m de la source) par rapport à l'origine sur les données réelles. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'en surface la vitesse de propagation des ondes P est plus faible que celle utilisée dans le modèle. Dans ce cas précis, une vitesse de 250 m/s en surface serait cohérente avec les données observées. La grande hétérogénéité de la zone déstructurée en surface peut expliquer le fait que cette arrivée ne soit pas linéaire sur l'ensemble des géophones et corresponde à des vitesses aussi faibles. Par contre, le point de tir réel 2097 montre une bonne cohérence avec l'onde réfractée en P et les différents trains d'onde réfractés et réfléchis obtenus par la modélisation. On peut raisonnablement penser que l'onde réfléchie peut être présente dans les données mais est très difficilement exploitable en sismique réflexion, rien ne permet de la différencier clairement des autres trains d'onde et ainsi de l'extraire.

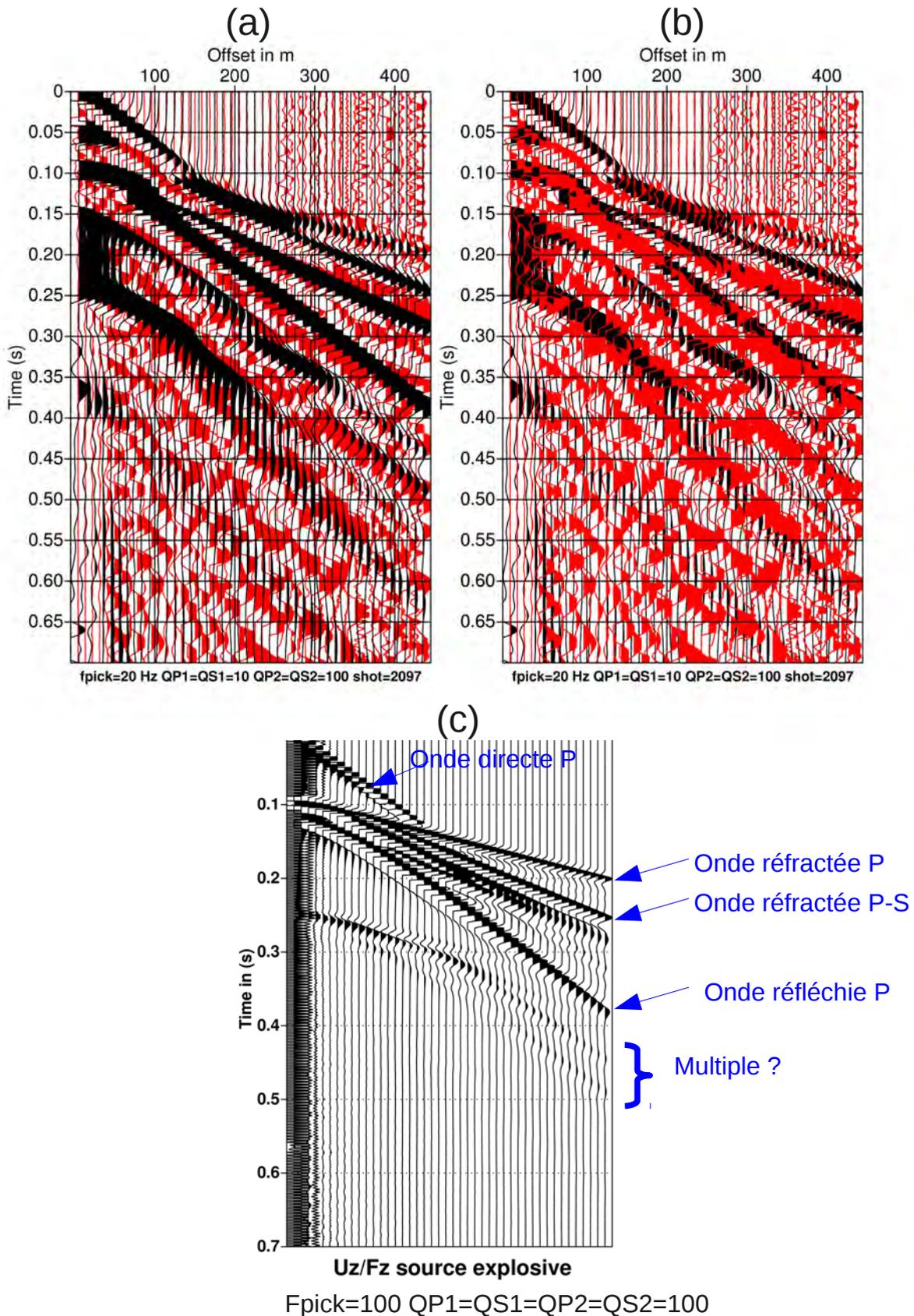


Figure 4.14: (a) et (b) : Superposition du point de tir réel 2097 (en rouge) et du point de tir synthétique issu du modèle présenté en figure 5.9 (en noir). (a) et (b) sont identiques, la superposition des deux points de tir a simplement été inversée. (c) point de tir synthétique obtenu avec le modèle identique mais avec une fréquence dominante $f_{pick}=100$ Hz et des facteurs de qualité tous égaux à 100 ($QP1=QS1=QP2=QS2=100$). Les différents train d'onde y sont identifiés.

4.2.2.2.Exemple du point de tir 2098 (profil PS1).

Le modèle utilisé pour obtenir le sismogramme synthétique comparable au point de tir réel 2098 est décrit dans la figure 4.15. La source est une source explosive située à 100 m du premier géophone. La distance inter-géophone est de 10 m et la fréquence dominante f_{pick} est égale à 20 Hz. La surface libre est prise en compte.

VP=1400 m/s VS=900 m/s Épaisseur 1ère couche=60 m QP=QS=10

VP=4000 m/s VS=2500 m/s Épaisseur 2ème couche=500 m QP=QS=100

Figure 4.15 : Modèle utilisé pour générer le point de tir synthétique comparé au point de tir réel 2098.

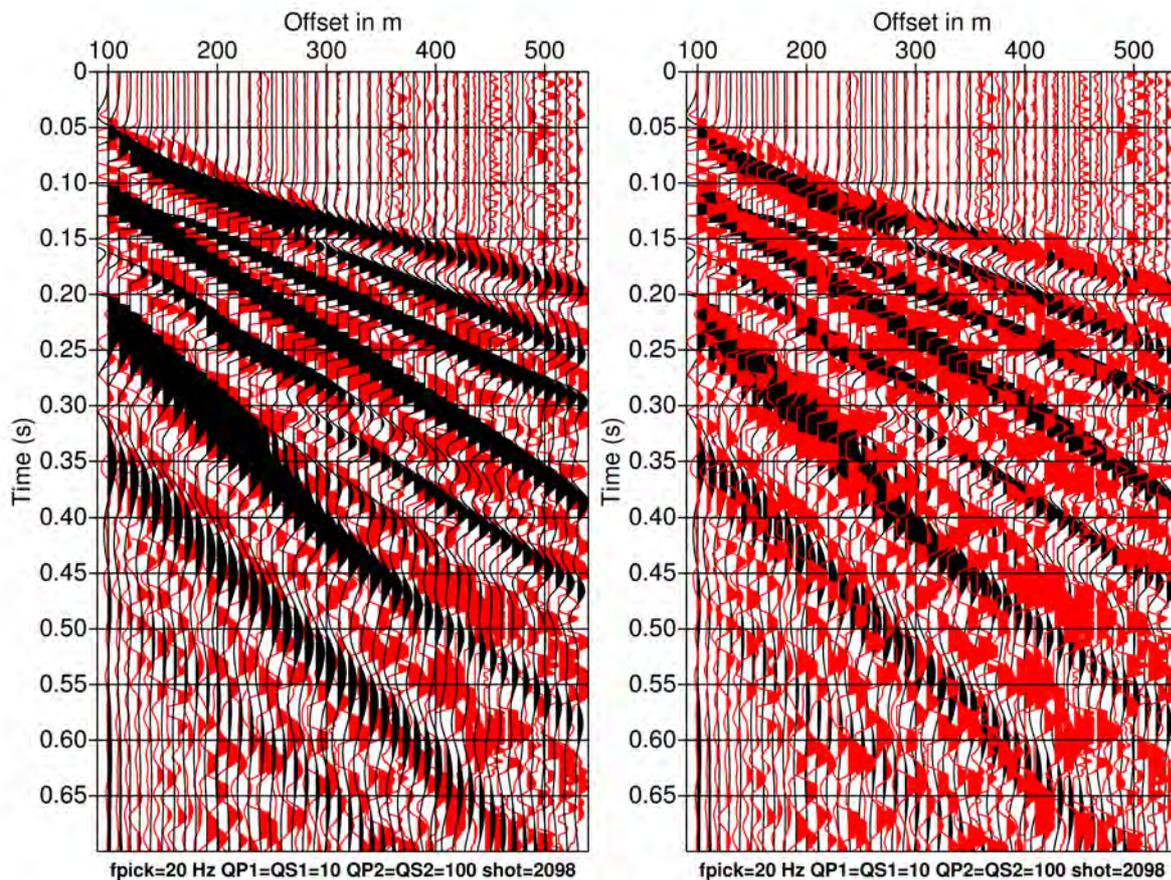


Figure 4.16: Superposition du point de tir réel 2098 (en rouge) et du point de tir synthétique issu du modèle présenté en figure 4.15 (en noir). Les deux figures sont identiques, la superposition des deux points de tir a simplement été inversée.

La figure 4.16 présente la superposition des points de tir réel 2098 (en rouge) et le sismogramme synthétique (en noir) obtenu avec le modèle décrit dans la figure 4.15. Globalement, on retrouve une très bonne superposition des différentes arrivées en particulier la première arrivée (ondes

réfractées). Le modèle utilisée pour obtenir le point de tir synthétique est cohérent avec les résultats obtenus en tomographie sismique 2D.

4.2.3. Conclusions

Ces modélisations montrent clairement la difficultés à analyser les différents trains d'onde contenus dans les données. Ceci est, en particulier, du au contenu fréquentiel très bas des données qui induisent des problèmes de déphasage et des interférences entre des différents trains d'ondes. Cependant, même si l'onde P réfléchie n'est pas facilement dissociable du reste du signal, elle est présente dans les points de tir. Ceci nous a amenés à effectuer une tentative de traitement en sismique réflexion.

4.3. Traitement en sismique réflexion.

La chaîne de traitement suivante a été appliquée aux données sismiques afin d'obtenir une section stackée des données :

- Mise en place de la géométrie,
- Correction statique d'altitude
- Mute de l'onde aérienne
- Égalisation des traces,
- Bining: tous les 5 m avec un rayon de 10m.
- Stack à vitesse constante

Le traitement en sismique réflexion a été appliquée à tous les profils sismiques, A titre d'exemple , le traitement appliqué sur le profil PS1 est présenté dans ce qui suit.

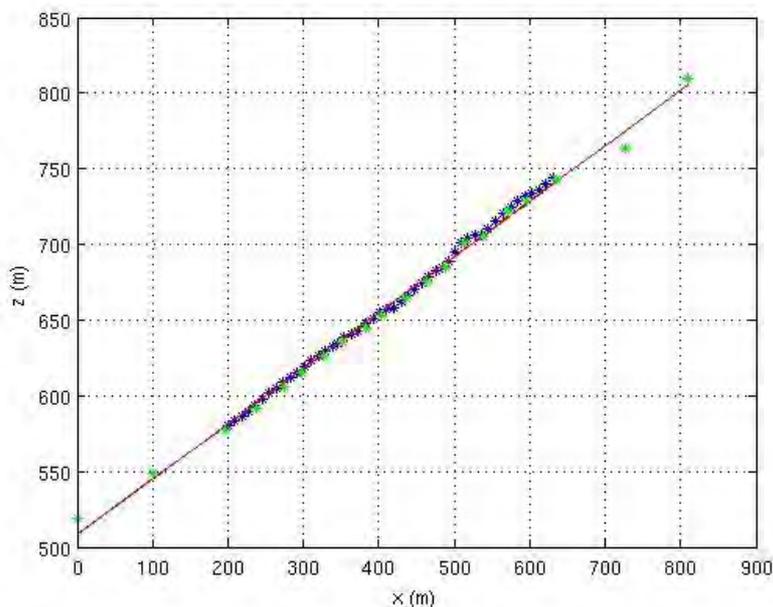


Figure 4.17: Visualisation de z en fonction de x (après rotation et translation du repère) des sources et récepteurs du profil PS1 La droite en rouge correspond au plan « intermédiaire » sur lequel ont été projetés les sources (en vert) et les récepteurs (en bleu). Les corrections des statics d'altitude ont été faites avec une vitesse V de 500m/s.

Comme le montrent la figure 1.2, les variations topographiques sont très significatives. Pour minimiser les corrections d'altitude, nous avons opté pour un plan de référence non pas horizontal mais incliné selon la pente le long du profil sismique comme le montre la figure 4.17 pour le profil

PS1. Le point milieu commun (CMP = Common MidPoint) a été calculé pour chaque couple de

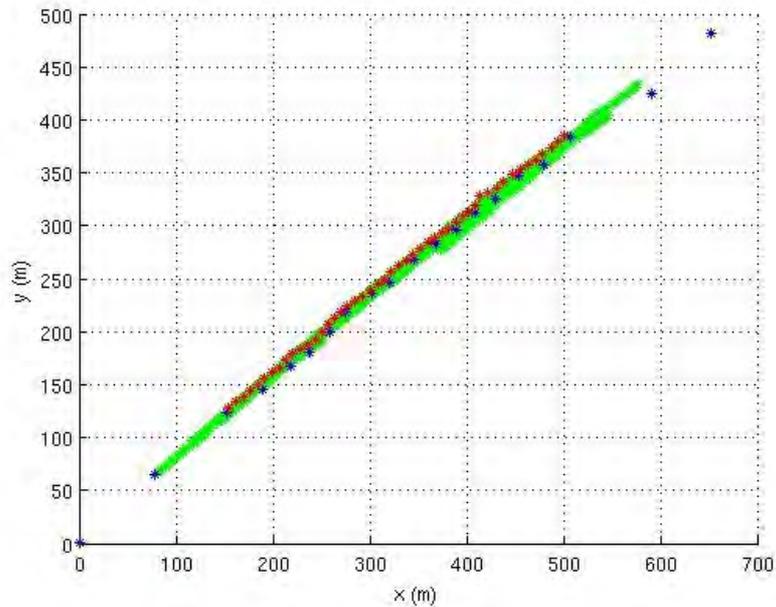


Figure 4.18 : Visu dans un plan xy avec source en bleu, récepteur en rouge et position CMP en vert.

Source-récepteur (figure 4.18). La dispersion des CMP liée au fait que les sources et récepteurs ne sont pas alignés (figure 4.19), nous a conduits à appliquer un binning. Avec une distance inter-géophone de 10 m et étant donnée la dispersion des CMP, nous avons choisi un binning de 5 mètres avec un rayon de 10 mètres. 125 CMP, numérotés 1020 à 1145, ont ainsi été constitués. Le taux de couverture correspondant à chaque CMP est représenté sur la figure 4.20. Il est faible (maximum de 20) et n'est pas constant ce qui est un gros handicap pour obtenir une image stackée de qualité.

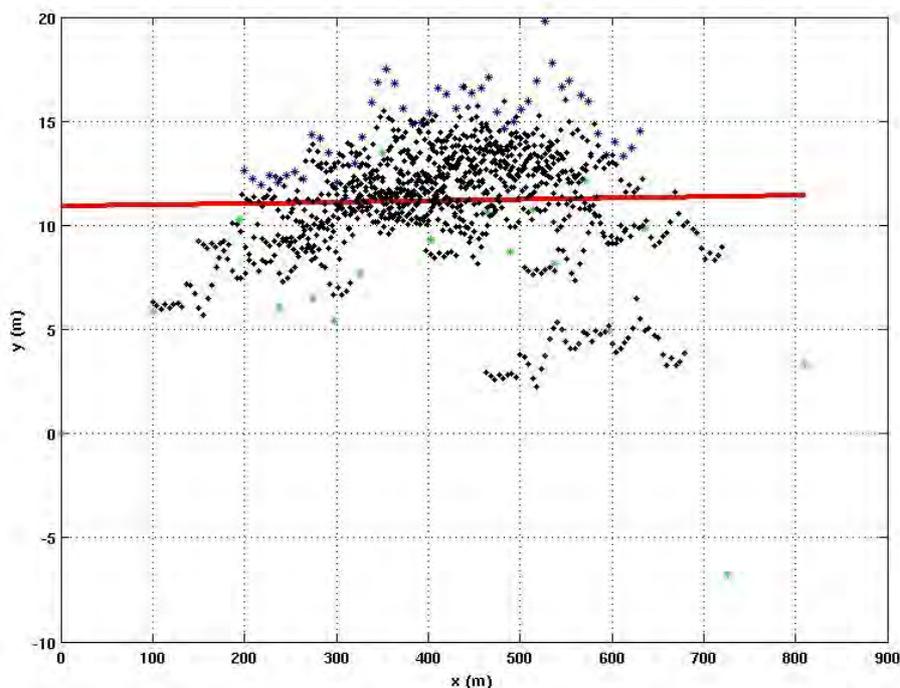


Figure 4.19: Après rotation du repère, localisation des sources (en vert), des récepteurs (en bleu), des CMP (en noir) et de la droite (en rouge) à partir de laquelle a été fait le binning. Attention, forte exagération de l'échelle en y.

Étant donné le faible taux de couverture, nous avons tenté d'analyser les données en utilisant des superCMP. Divers tests ont été effectués en regroupant 4 à 6 CMP en superCMP. Des exemples sont présentés dans les figures 4.21 à 4.24. Les azimuts ont été calculés par rapport à la direction des couples Source-Récepteur (figure 4.20). Les offsets négatifs correspondant aux azimuts supérieurs à 200 degrés et les offsets positifs aux azimuts inférieurs à 50 degrés.

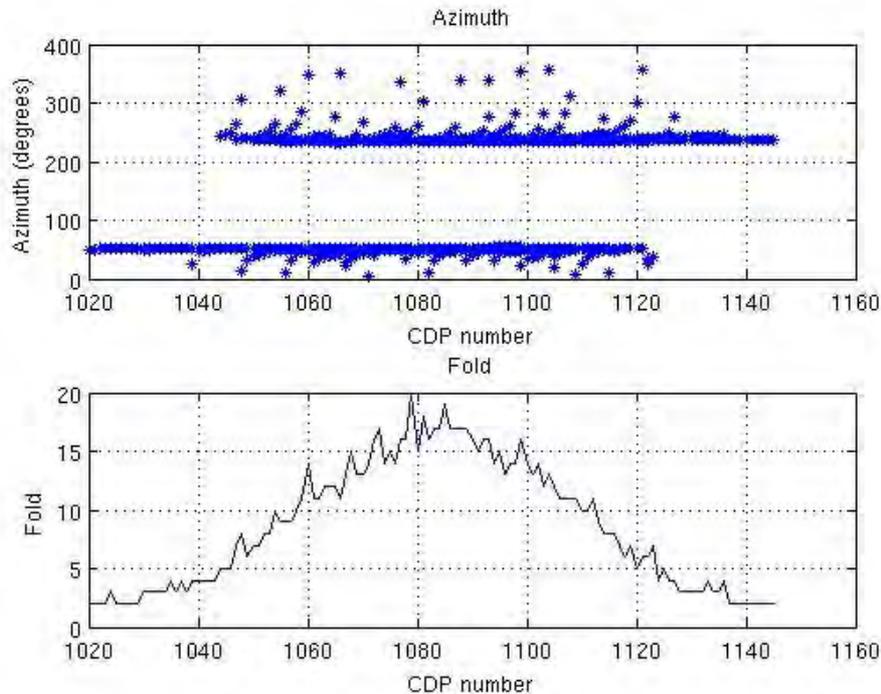


Figure 4.20: Azimut des couples Source -Récepteur pour chaque trace en fonction du numéro de CDP et taux de couverture associé à chaque CDP lorsque l'on utilise un binning de 5 m et un rayon de 10 m.

En collection point milieu commun (CMP) (figures 4.21 à 4.24), on met clairement en évidence un signal différent entre les traces d'offsets positifs et négatifs ce qui est contraire au principe de réciprocité. Une des explications peut être la très grande hétérogénéité de la couche superficielle. On remarque également des problèmes de statiques, peut être dus au milieu très hétérogène et à la dispersion du dispositif source-récepteur

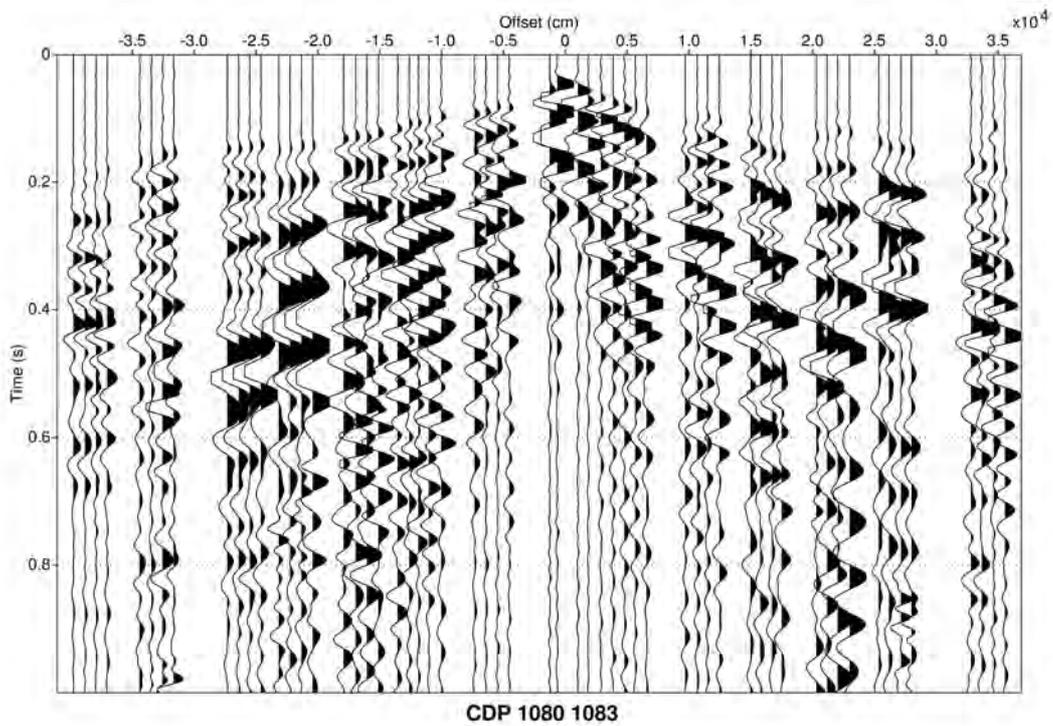


Figure 4.21 : Exemple de SuperCMP regroupant les traces des CMP 1080 à 1083.

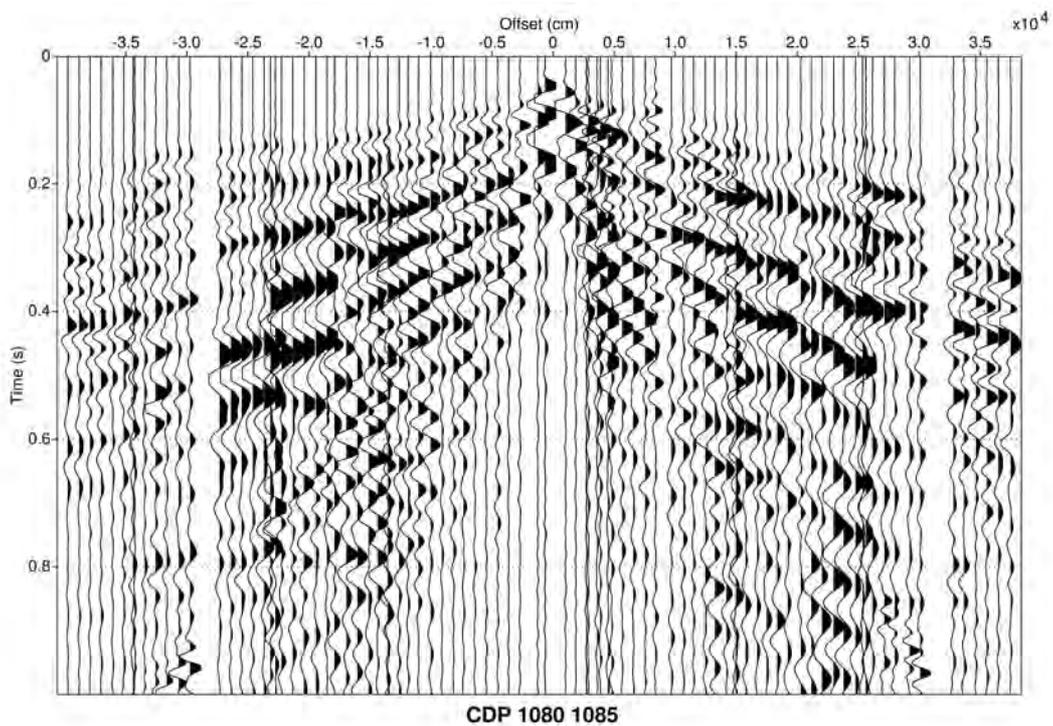


Figure 4.22: Exemple de SuperCDP regroupant les traces des CMP 1080 à 1085.

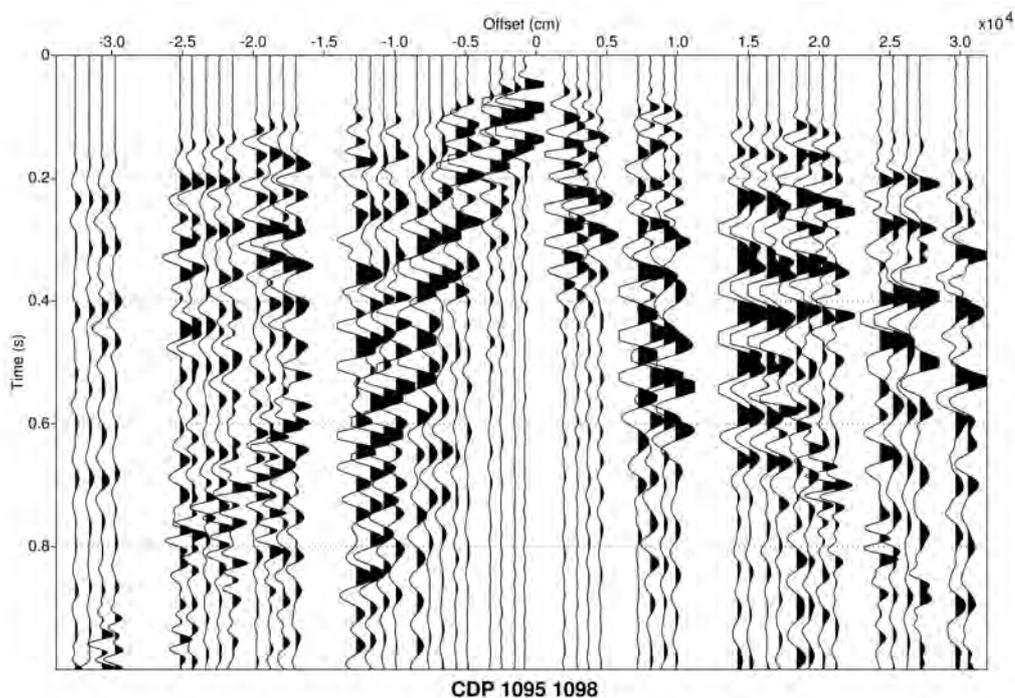


Figure 4.23: Exemple de SuperCDP regroupant les traces des CMP 1095 à 1098.

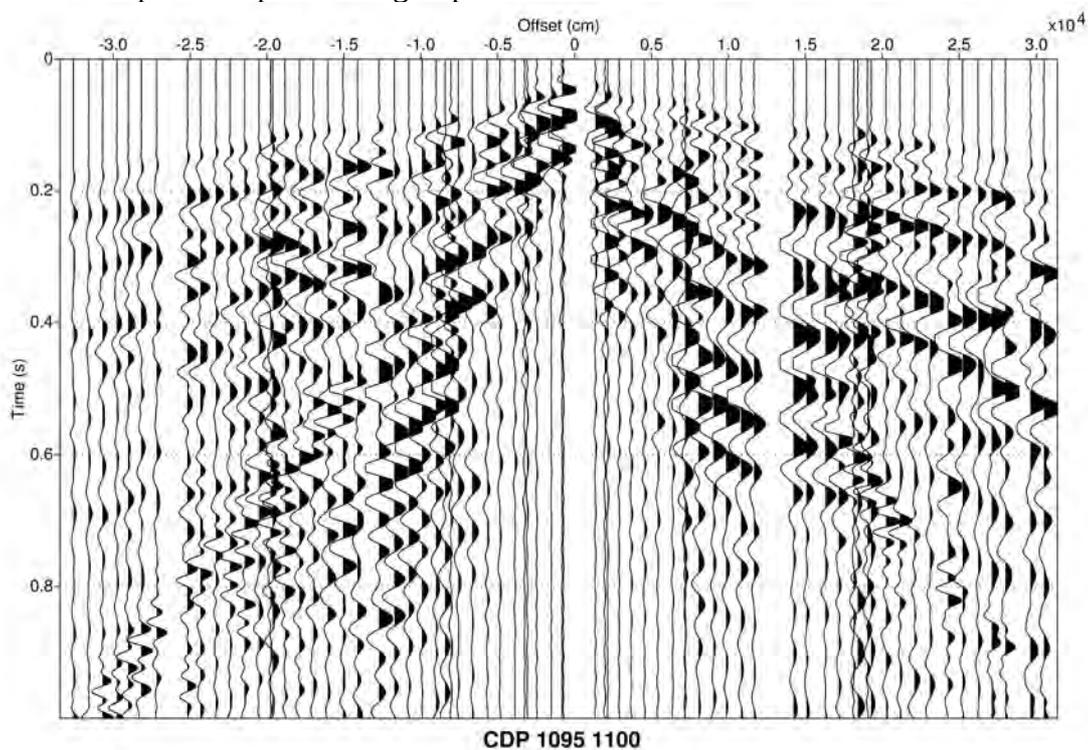


Figure 4.24: Exemple de SuperCDP regroupant les traces des CMP 1095 à 1100.

Nous avons tenté d'effectuer des analyses de vitesse en appliquant des corrections dynamiques (Normal MoveOut, NMO). Les analyses de vitesses de semblance n'ont pas donné de résultats

probants. La superposition d'hyperboles de réflexion sur les signaux cohérents latéralement ne permettent pas de d'obtenir des vitesses en accord avec celle obtenues par les tomographies sismiques. Par exemple, la figure 4.25 montre notamment pour les offsets positifs (Azimuts autour de 50 degrés) des signaux cohérents de fortes amplitudes, qui si on les considère comme des hyperboles, correspondent à de faibles vitesses ($V < 1200$ m/s) alors que les vitesses obtenues par tomographie sismique sont plutôt de l'ordre de plusieurs milliers de m/s. Le stack à vitesse constante ($V = 1200$ m/s) correspondant (figure 4.26) montre deux horizons vers 0.2 et 0.3 s mais ces signaux cohérents paraissent être plutôt reliés à des battements ou des ondes de surface et non à des hyperboles. Le stack à vitesse constante ($V = 3000$ m/s) (figure 4.27) cohérente avec les vitesses obtenues en tomographie quant à lui ne montre pas de signaux cohérents mis à part en début et fin de profils. Ceux ci correspondent à des artefacts dus au faible taux de couverture. Le signal cohérent visualisé vers 0.5 s entre les CDP 1070 et 1090 apparaît aussi bien sur le stack à 1200m/s que sur celui à 3000 m/s et ne peut être attribué à une réflexion.

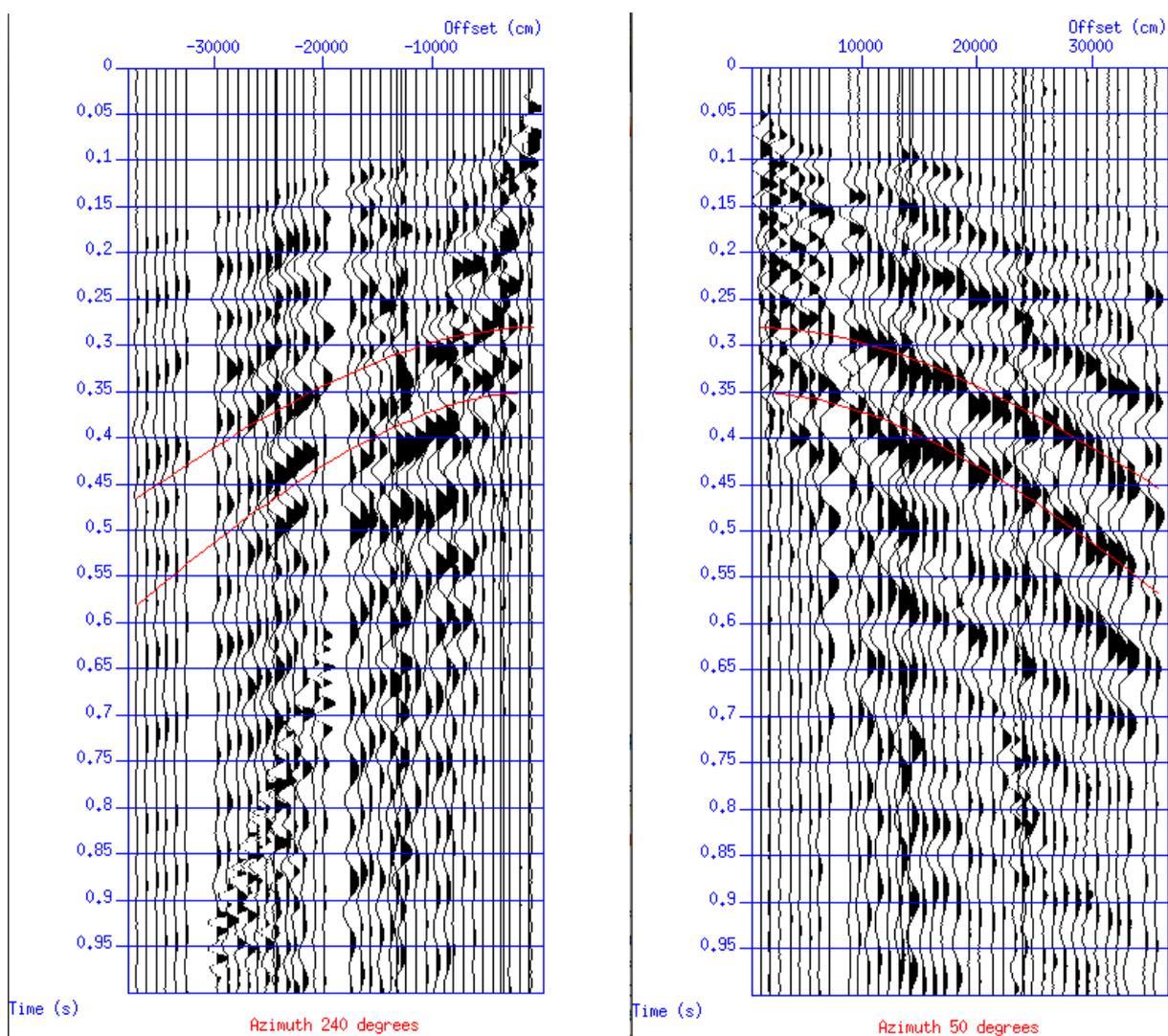


Figure 4.25: SuperCMP 1090-1095 pour azimuth 240 et 50 degrés et superposition d'hyperboles. $t = 0.28$ s $V = 1000$ m/s et $t = 0.35$ s $V = 800$ m/s.

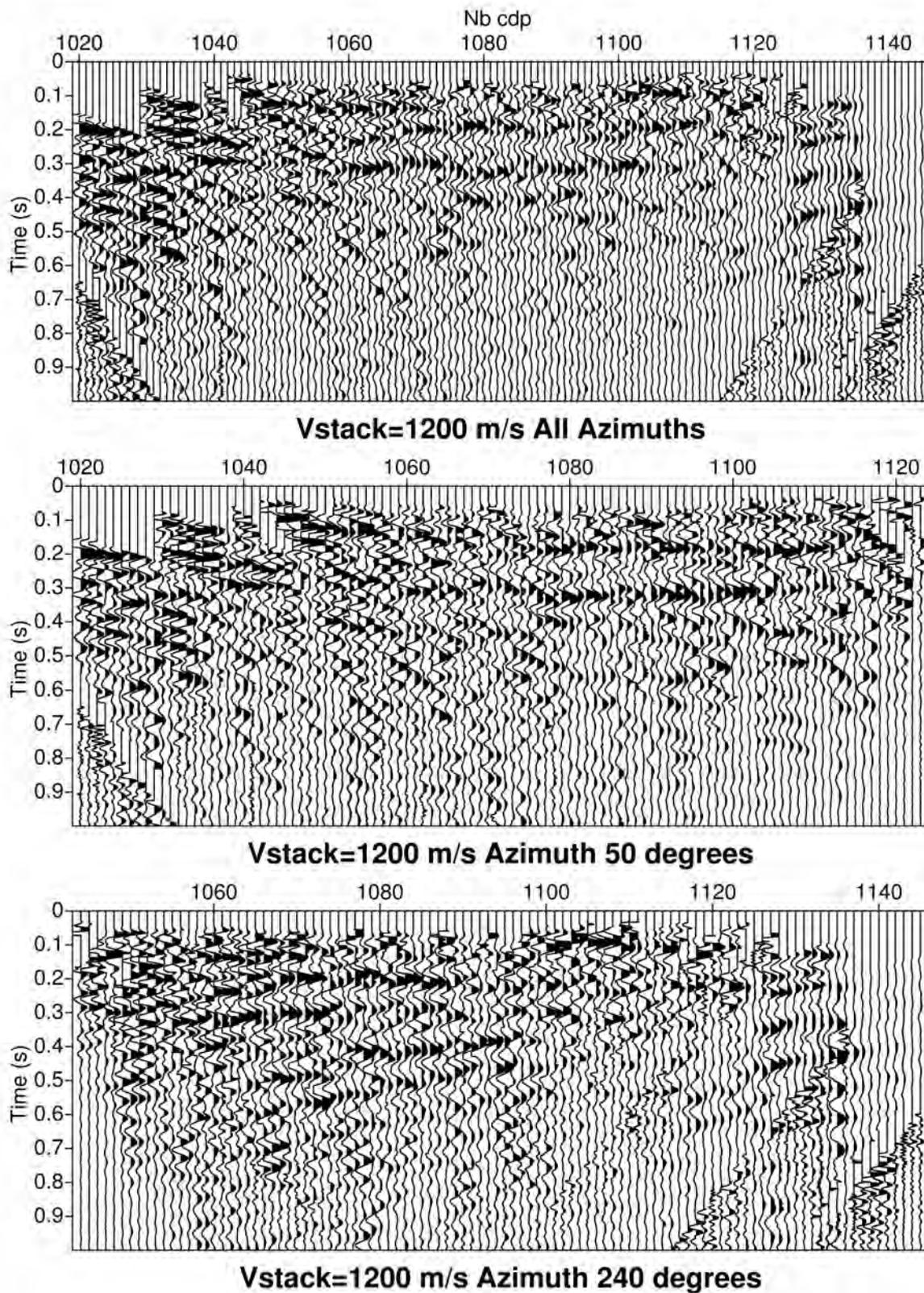


Figure 4.26 : Exemples de stack avec une vitesse de 1200 m/s et un binning de 5 m et un rayon de 10 m.

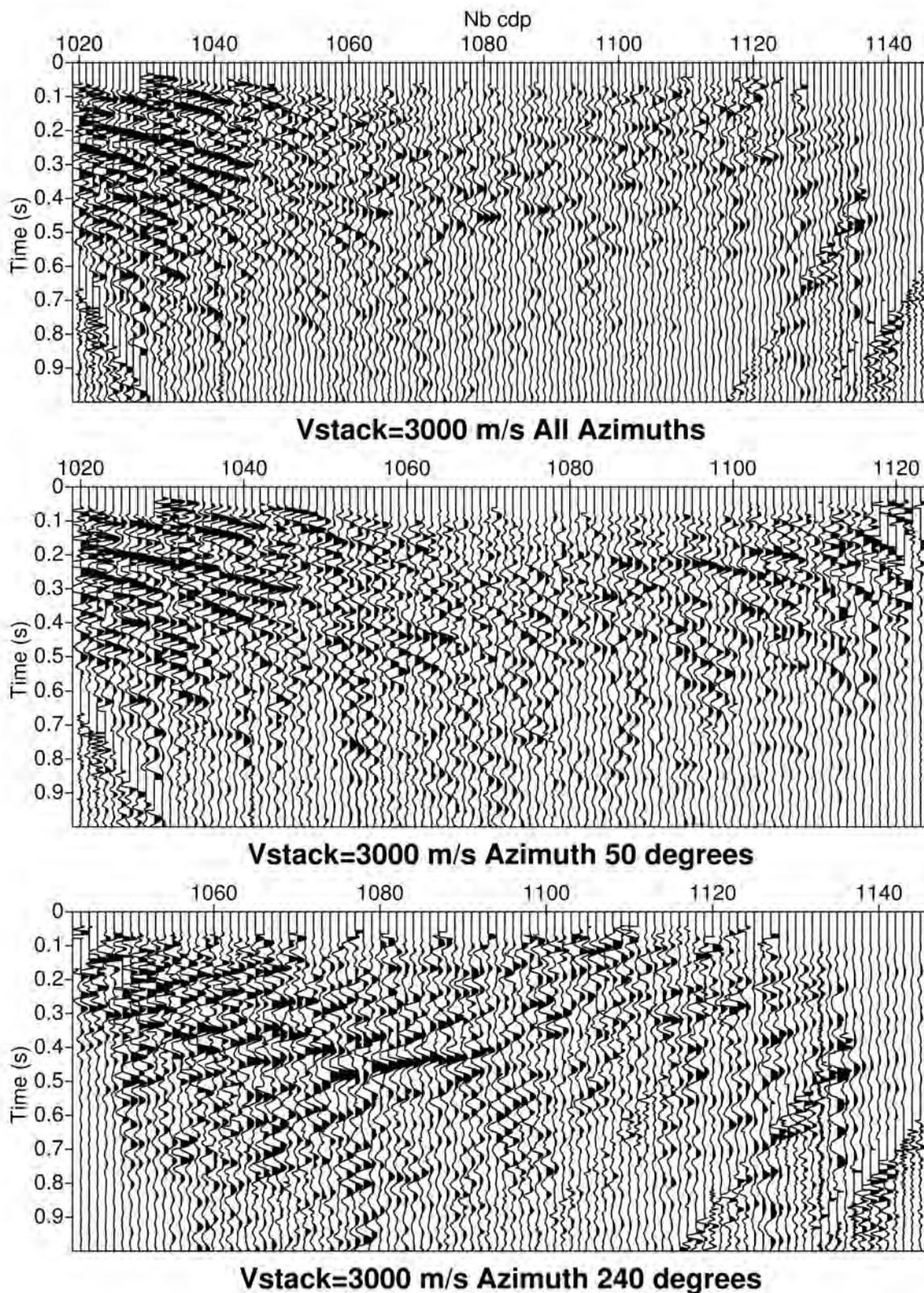


Figure 4.27 : Exemples de stack avec une vitesse de 3000 m/s et un binning de 5 m et un rayon de 10 m.

Le contenu fréquentiel très bas induit des longueurs d'ondes très grandes (pluri-décamétriques) voire $>$ à 100 m et ainsi la résolution résultante est très faible. Il est difficile de déterminer et de superposer des hyperboles avec précision. D'une façon plus générale, l'imagerie fine d'interfaces superficielles est très difficile dans les conditions présentes. En effet, avec une vitesse de l'ordre de

1200 à 3000-4000 m/s et un contenu fréquentiel entre 5 et 20 Hz, la longueur d'onde est de 60 à 150-200 m soit une résolution verticale de 15 à 35-50 m pour un objectif qui se situe à 50-150 m de profondeur. Ceci apparaît insuffisant pour imager de façon précise et contraindre en profondeur une quelconque interface. De plus, la tomographie sismique montre la présence d'un gradient de vitesse et non pas une transition nette entre zone saine et zone déstructurée ce qui n'est pas optimum pour la sismique réflexion.

Les conclusions obtenues avec les autres profils sismiques sont similaires et n'apportent rien de plus.

En résumé, les profils recensés dans ce rapport n'apparaissent pas optimum pour une exploitation en sismique réflexion. L'un des problèmes essentiels est le contenu fréquentiel très bas (compris entre 10 et 20-40 Hz) qui ne permet pas de faire des analyses correctes sur les données. Les longueurs d'onde sont très grandes, la résolution très basse, les filtrages ne peuvent être appliqués correctement, le stack ne permet pas de visualiser les signaux cohérents que l'on peut interpréter comme étant des réflexions.

D'autre part, la géométrie d'acquisition n'est pas adaptée à de la sismique réflexion : distance inter-géophone trop grand (d'où présence d'aliasing spatial), taux de couverture insuffisant. De plus, la dispersion des sources et récepteurs par rapport à une ligne optimale a sans doute une influence importante sur la qualité des données étant donné que le terrain est très hétérogène en proche surface et que les réflecteurs éventuels sont à faible profondeur (< 130 m). Les fortes variations topographiques complexifient aussi le traitement.

De plus, la très grande hétérogénéité de la couche superficielle ajoute encore à la difficulté (atténuation, dispersion du signal, piégeage d'une onde dans une cavité ou une couche particulière). Aucun réflecteur n'est clairement identifié dans ces profils et il est très difficile de conclure à la présence ou non de réflecteurs.

Pour pouvoir avoir une réponse définitive quant à la possibilité d'imager et de visualiser la géométrie et la structure du glissement de terrain, l'idéal serait de pouvoir faire une acquisition avec une géométrie d'acquisition adaptée à une acquisition en réflexion avec une distance inter-géophone beaucoup plus petite (≤ 2.5 m), un taux de couverture plus élevé et constant sur tout le profil, une minimisation des écarts de positionnement des sources et géophones par rapport à la ligne d'acquisition, un nombre de traces suffisant. D'autre part, il faudrait essayer d'obtenir un contenu fréquentiel plus haute fréquence (jusqu'à 100 Hz) en testant éventuellement différents types de sources. Une voie à explorer également serait d'utiliser des géophones plus haute fréquence.

5. Analyses et inversion des ondes de surface:

L'analyse et l'inversion des ondes de surface est susceptible de fournir des informations sur les vitesses des ondes S dans les terrains superficiels. Nous avons tenté d'exploiter les ondes de surface sur l'ensemble des profils sismiques PS1 à PS7.

D'après Bodet (2005), il faut respecter un certain nombre de paramètres dans l'analyse des ondes de surface pour obtenir des résultats exploitables. Ces paramètres sont définis dans ce qui suit et ont été estimés à partir d'analyses préliminaires des ondes de surface qui montrent que les vitesses sont globalement comprises entre 400 m/s et 2000m/s

Les paramètres à respecter sont les suivants :

- La distance minimum source- récepteur D_{min} doit être supérieure à la demie longueur d'onde maximale ($D_{min} > \lambda_{max}/2$).

Les géophones utilisés ont une fréquence propre de 4.5 Hz. Ainsi, si on considère que la fréquence minimale utilisable est de l'ordre de la fréquence propre des géophones (~ 5 Hz) alors $\lambda_{max}=2000/5=400$ m. La distance minimale Source-récepteur est alors de 200 m.

Dans de nombreux cas, la vitesse est plutôt inférieure à 1200-1600 m/s dans ce cas, la distance minimale Source-Récepteur est respectivement 120 m et 160 m.

- L'épaisseur minimum de la première couche H1 est égale à la demie longueur d'onde minimum ($H1_{min}=\lambda_{min}/2$). Si on considère une vitesse de 400m/s à une fréquence de 15-20 Hz, on obtient $H1_{min}=10-14$ m. Dans beaucoup de cas, la vitesse des ondes S dans la première couche, VS1 est plutôt de 1000 m/s soit un $H1_{min}=25-33$ m.
- La profondeur maximum Z_{max} interprétable est égale à la demie longueur d'onde maximale ($Z_{max}=\lambda_{max}/2$). Ainsi, D_{min} est supérieure ou égale à Z_{max} .
- La distance minimum intergéophone, d_{min} doit être plus petite que $\lambda_{min}/2$ soit suivant la vitesse mesurée, plus petite que 10-14 m ou 25-33 m. Tous les profils respectent cela.
- la longueur d'onde maximum λ_{max} ne doit pas excéder 40-50 % de la longueur totale du profil,

Les analyses des ondes de surface peuvent être perturbées par les offsets lointains. En effet, on peut avoir une contamination par les ondes de volumes à cause de l'atténuation de leurs hautes fréquences. Il est donc nécessaire d'analyser l'effet des offsets lointains lors de l'analyse des ondes de surface.

L'analyse des ondes de surface avec en particulier la détermination de la courbe de dispersion par image FK a été effectuée avec le logiciel GEOPSY et l'inversion des courbes de dispersion avec le module DINVER de GEOPSY.

Différentes analyses ont été testées sur les données dans le but d'obtenir :

- des Modèles moyens sur la longueur de chacun des profils
- l'identification d'éventuelles variations latérales de vitesses le long des profils

Pour cela, plusieurs types de modèles ont été utilisés :

- des modèles initiaux à 2 ou 3 couches
- des modèles avec ou sans gradient de vitesse dans la première couche.

Les résultats obtenus pour les profils PS1 à PS7 sont présentés dans ce qui suit.

5.1. Analyses du profil PS1PS2.

La figure 5.1 montre la position des géophones et des sources des profils PS1PS2 potentiellement utilisables pour l'analyse des ondes de surface.

Pour les points de tirs respectant les différents critères définis ci-dessus, la courbe de dispersion a été déterminée. Il s'agit des points de tirs en bout de profil qui permettent d'avoir des offsets suffisamment grands.

Le profil PS1 comprend 20 points de tir (fichier 2080 à 2099). Le profil PS2 compte 17 points de tir mais plusieurs d'entre eux ont dus être retirés du fait de leur mauvaise qualité. Au final, les points de tir utilisés sont : 2050, 2051, 2052, 2053, 2054, 2102, 2103, 2104, 2066, 2068, 2077, 2105, 2106, 2107, 2108, 2109, 2110

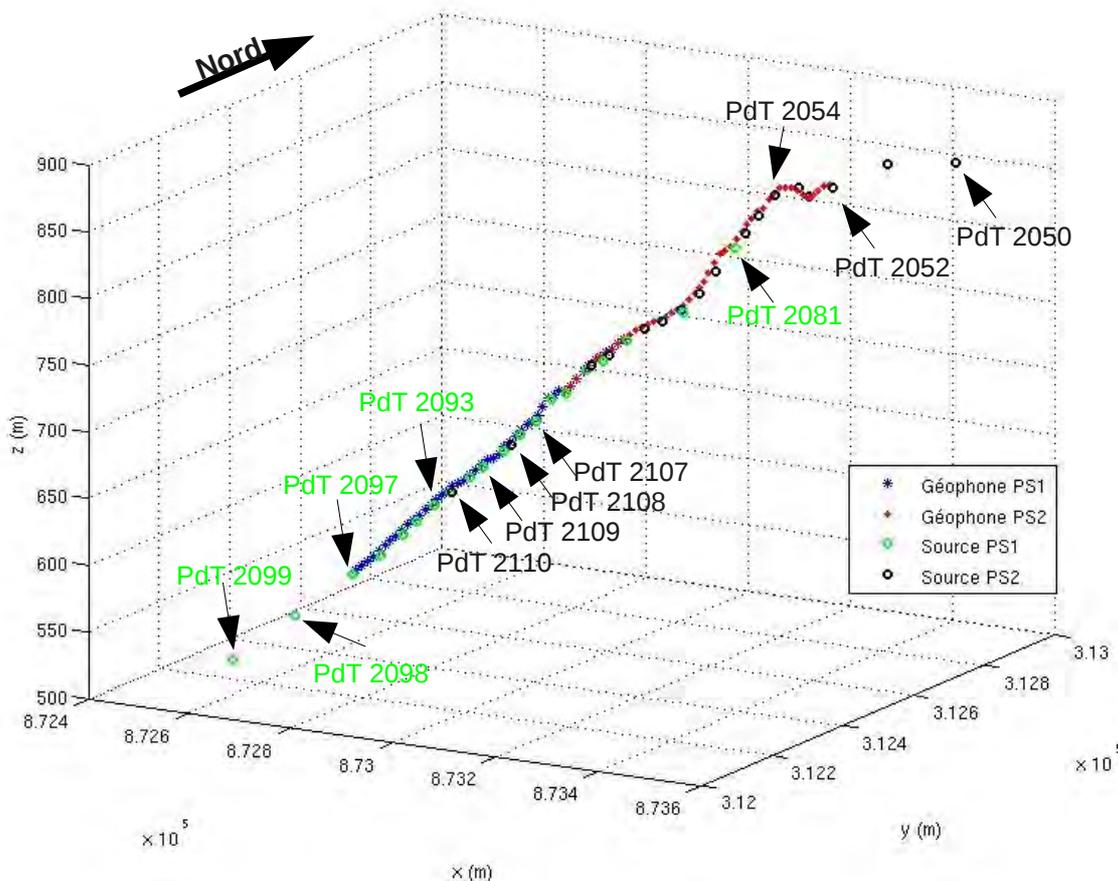


Figure 5.1 : Profil PS1 (Points de tir de PdT2081 à PdT2099 (notés en vert) positionnés par ordre croissant le long de la ligne et géophones (étoiles bleues)). Profil PS2 (Points de Tir : PdT2050 à PdT2110 (notés en noir) et géophones (Points rouges))

Un exemple de droite de dispersion obtenue pour différentes gammes d'offset avec le point de tir 2097 de PS1 est présenté sur la figure 5.2.

Globalement, la courbe de dispersion localisée dans la zone rose est exploitable dans une gamme de fréquence très restreinte comprise entre 5 et en plus 20 Hz. Dans la figure 5.2a, la courbe de dispersion moyenne c'est à dire calculée sur les offsets compris entre 150 m et 470 m est la mieux contrainte. Celle correspondant aux offsets proches présente la même tendance (figure 5.2b) et celle correspondant aux offsets lointains (Figure 5.2c) est essentiellement exploitable pour les basses fréquences (6-15 Hz) et est cohérente avec les deux autres courbes.

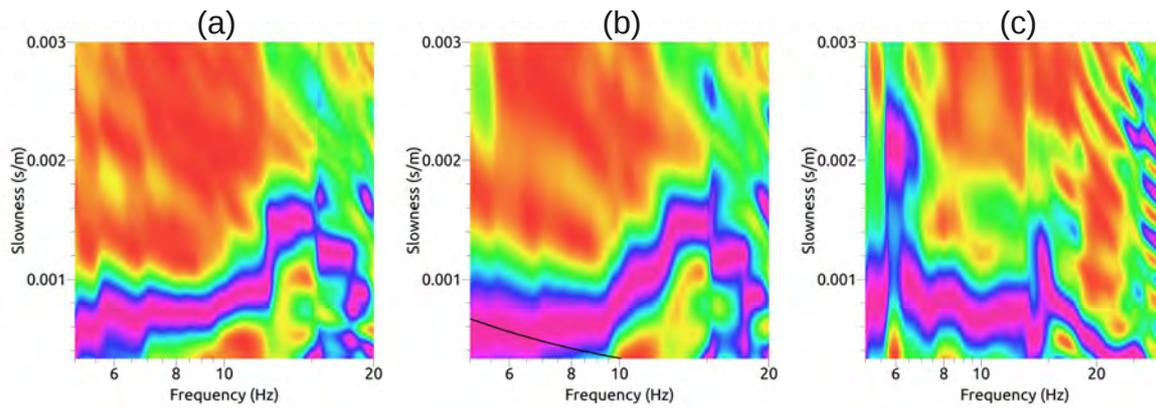


Figure 5.2 : Courbe de dispersion obtenue pour le point de tir 2097 pour les offsets compris (a) entre 150 et 470 m, (b) entre 150 et 300 m et (c) entre 300 et 470 m.

5.1.1. Essais d'analyse pour obtenir un modèle moyen sur PS1.

L'inversion de la courbe de dispersion obtenue pour le point de tir 2097 a été effectuée en utilisant un modèle à 2 couches basé sur les résultats de la tomographie sismique (figure 5.3). La courbe de dispersion obtenue avec l'ensemble des traces exploitables (hypothèse du champ proche respectée) c'est à dire à partir de 120 m a été inversée pour obtenir un modèle moyen en vitesse des ondes P et des ondes S sur l'ensemble de la zone couverte par le point de tir étudié (figure 5.4).

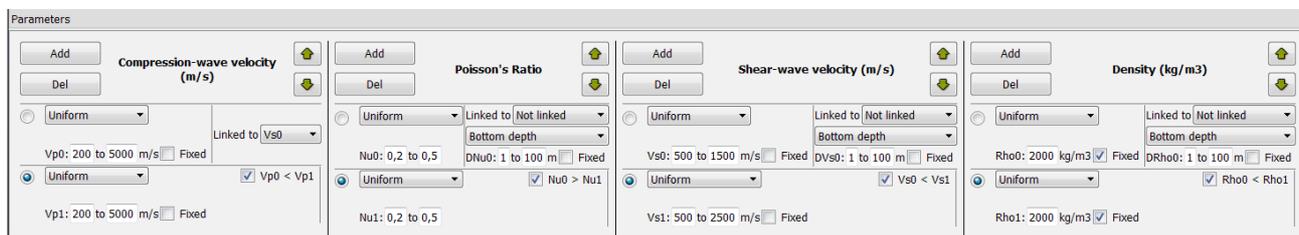


Figure 5.3. Paramètres du modèle à 2 couches utilisé pour l'inversion des courbes de dispersion.

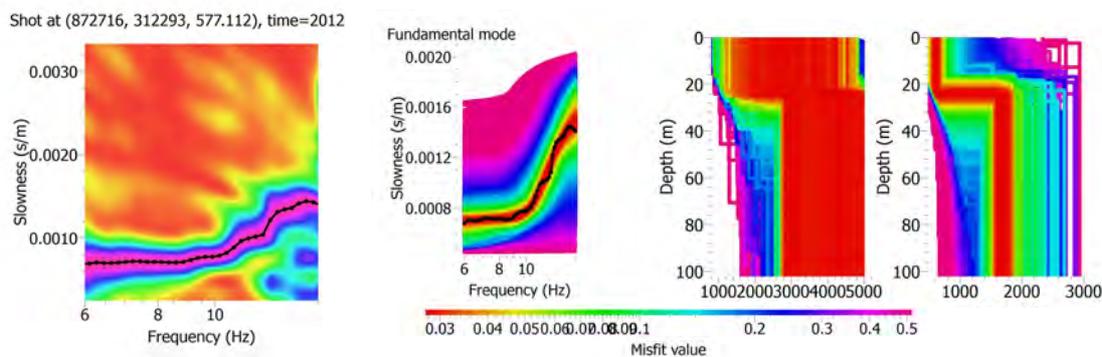


Figure 5.4 : De gauche à droite, Courbes de dispersion obtenue pour le point de tir 2097 pour les offsets compris entre 120 et 470 m avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3, les données expérimentales correspondent aux points noirs, courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S.

L'épaisseur H1 de la première couche est de l'ordre de 20-30 m et donc à la limite de la fiabilité puisque l'épaisseur minimum de la première couche H1 min calculée est de l'ordre de 28 m. Les

vitesse moyenne des deux couches VS1 et VS2 sont respectivement de l'ordre de 800-900 m/s et de 1600-1800 m/s. La profondeur d'investigation Z calculée est de 150 m. D'autres inversions ont été testées avec un modèle à 3 couches et avec des vitesses P et S liées ou non. Les résultats sont sensiblement équivalents.

La détermination et l'inversion de la courbe de dispersion obtenue pour le point de tir 2098 sur les traces à partir d'un offset de 120 m sont également présentées (figure 5.5). La courbe de dispersion n'est exploitable que jusqu'à 12 Hz c'est à dire encore moins contrainte que la courbe obtenue pour le point de tir 2097. Les modèles obtenus pour les vitesses en ondes P ou S montrent deux familles avec respectivement une épaisseur H1 d'environ de 20 m ou 50 m, des vitesses des ondes P VP1 de l'ordre de 1000 m/s et 2000 m/s, des vitesses des ondes S VS1 de l'ordre de 800 m/s et 1200 m/s. Les vitesses des ondes P dans la deuxième couche sont peu contraintes, par contre, la vitesse des ondes S VS2 est identique pour les 2 familles de courbes et égale à celle obtenue pour le point de tir 2097 avec une valeur VS2 de l'ordre de 1800 m/s. Sachant que l'épaisseur minimum H1min calculée est de l'ordre de 50 m, la première famille de courbe n'est pas utilisable.

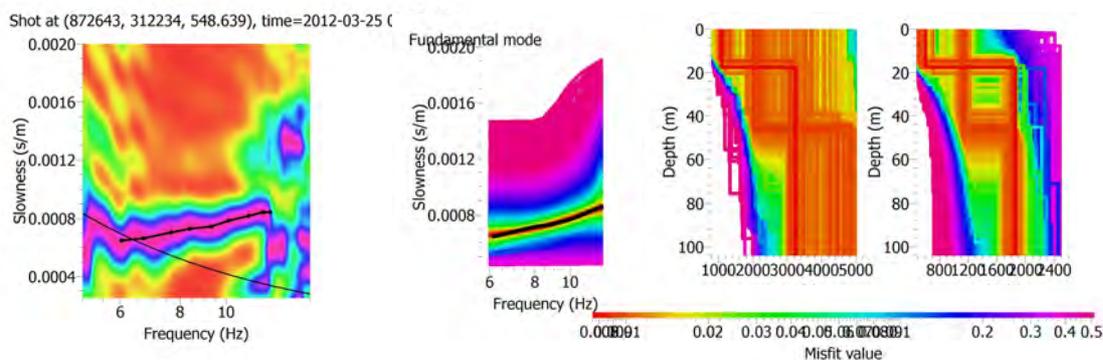


Figure 5.5 : De gauche à droite : Courbes de dispersion obtenue pour le point de tir 2098 pour les offsets compris entre 120 et 470 m avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3, les données expérimentales correspondent aux points noirs, courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S.

L'inversion avec un modèle à 3 couches avec les vitesses des ondes P et S liées ou non liées donnent les résultats présentés dans la figure 5.6. Les modèles obtenus pour les vitesses de ondes S avec VP et VS liés et non liés sont sensiblement équivalents : la première couche est inexistante ou très peu épaisse <10 m et inexploitable et l'interface entre la deuxième et troisième couche se situe entre 45-55 m de profondeur avec des vitesses VS2 et VS3 de 1200 et 1800 m/s cohérentes avec celles obtenues pour un modèle à 2 couches.

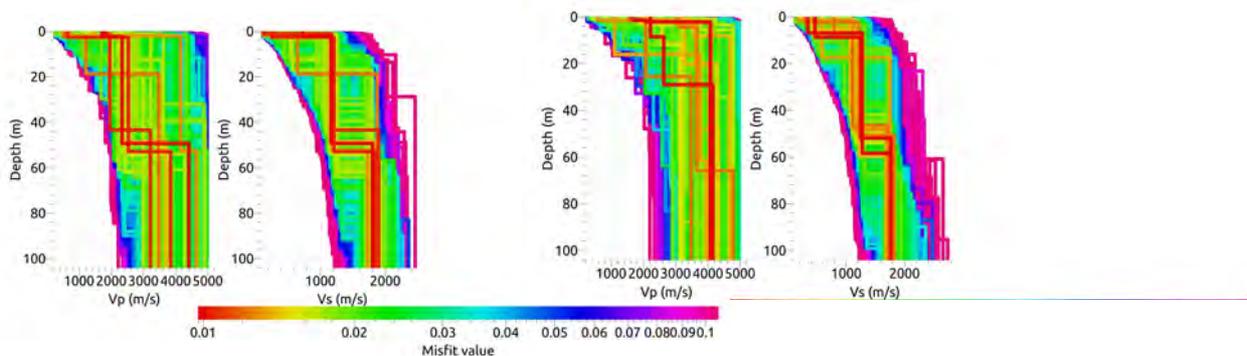


Figure 5.6. Les deux figures de gauche: modèles de vitesses en ondes P et modèle de vitesses en ondes S pour un modèle à 3 couches avec VP et VS liées. Les deux figures de droite: modèles de

vitesse en ondes P et modèle de vitesses en ondes S pour un modèle à 3 couches avec VP et VS non liées.

L'analyse du point de tir 2081 situé à l'autre extrémité de la ligne PS1 (figure 5.1) montre une courbe de dispersion exploitable entre 6 et 12 Hz. Avec un modèle à 2 couches, l'inversion produit des modèles de vitesse des ondes S VS1 et VS2 avec les vitesses de l'ordre de 800 m/s et 1800-2000m/s avec une épaisseur de la première couche entre 25-35 m.

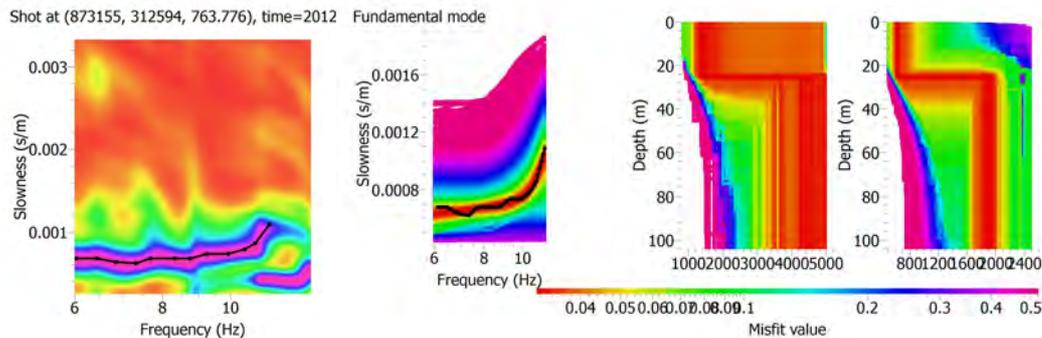


Figure 5.7 : De gauche à droite : Courbes de dispersion obtenue pour le point de tir 2081 pour les offsets compris entre 120 et 470 m avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3, les données expérimentales correspondent aux points noirs, courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S.

Avec un modèle à 3 couches, on obtient globalement les mêmes résultats avec une première couche quasi inexistante.

En conclusion, Les courbes de dispersion pour les points de tir 2097 et 2081 sont assez similaires avec une augmentation de la lenteur au dessus de 0.001 s/m et l'inversion produit des modèles moyens assez cohérents avec une interface vers 25-28 m de profondeur et une vitesse VS1 de l'ordre de 800 m/s et une vitesse VS2 de l'ordre de 1800 m/s. Par contre, la courbe de dispersion relative au point de tir 2098 à des lenteurs maximums plus faibles (<0.00085 s/m) ce qui explique les différences obtenues sur les modèles des ondes S. Quand on compare avec le modèle VP obtenu par tomographie sismique, c'est aussi très cohérent.

L'essai d'inversion avec un modèle à trois couches ne permet pas de modéliser l'interface à plus grande profondeur. Ceci peut être du au fait que la courbe de dispersion ne contient pas de pointé en dessous de 6 Hz ce qui induit une profondeur d'investigation assez limitée. De plus, comme le montre les résultats de la tomographie sismique, la variation de vitesse au sein de la zone déstructurée correspond à un gradient de vitesse et non pas à des transitions nettes de vitesses.

5.1.2. Essais d'analyse pour identifier d'éventuelles variations latérales de vitesses au niveau de PS1:

Pour cette analyse, les points de tir 2097 et 2081 dont les sources sont en bout de profil et le point de tir 2093 dont la source est localisée dans le profil ont été utilisés (figure 5.1). Pour chaque point de tir, les traces utilisées sont comprises entre 120 m et 320 m d'offset. Cette analyse permet obtenir respectivement un modèle moyen sur la partie Sud-Ouest, Nord-Est et centrale du profil PS1 avec les points de tir 2097,2081 et 2093. Les figures 5.8, 5.9 et 5.10 présentent les résultats obtenus pour chaque point de tir.

La gamme de fréquence sur laquelle est définie la courbe de dispersion est comprise entre 6 et 13 Hz environ pour les 3 points de tir. Le modèle utilisé pour l'inversion est un modèle à 2 couches. Les modèles obtenus après inversion pour les points de tir en bout de profil 2097 et 2081 (figures 5.8 et 5.9) sont très similaires avec des vitesses des ondes S VS1 et VS2 de l'ordre de 800-900 m/s et 1800 m/s et une épaisseur H1 de l'ordre de 25-30 m d'épaisseur. Avec le point de tir 2093, les vitesses de ondes S obtenues VS1 et VS2 sont de l'ordre de 1200 m/s et 1800-2000 m/s avec une épaisseur H1 entre 50 et 70 m, plus importante que celle obtenue avec les points de tir en bout. La lenteur reste inférieure à 0.0008 s/m au delà de 11 Hz pour le point de tir 2093 contrairement aux deux autres profils ce qui explique la différence dans les modèles obtenus.

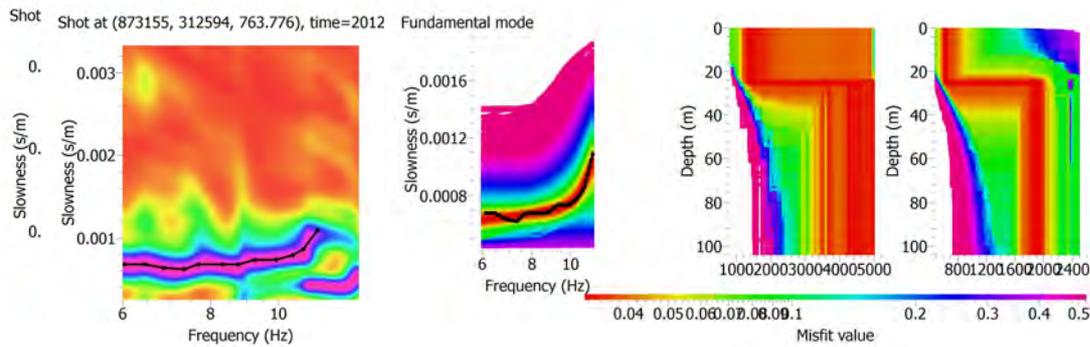


Figure 5.8 : De gauche à droite : Courbes de dispersion obtenue pour le point de tir 2097 pour les offsets compris entre 120 et 320 m avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3 (les données expérimentales correspondent aux points noirs), courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S.

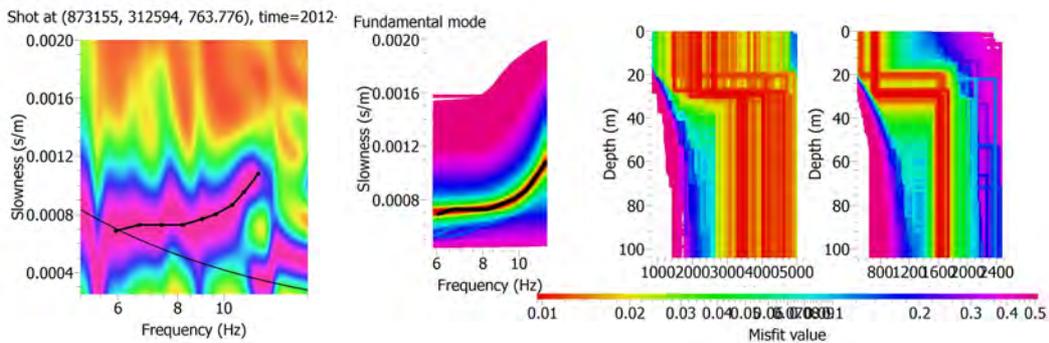


Figure 5.9 : De gauche à droite : Courbes de dispersion obtenue pour le point de tir 2081 pour les offsets compris entre 120 et 320 m avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3 (les données expérimentales correspondent aux points noirs), courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S.

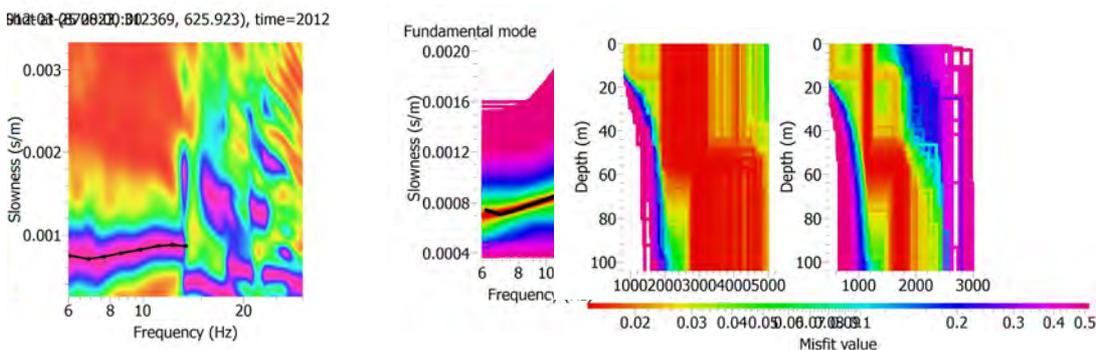


Figure 5.10 : De gauche à droite : Courbes de dispersion obtenue pour le point de tir 2093 pour les offsets compris entre 120 et 320 m avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3 (les données expérimentales correspondent aux points noirs), courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S.

5.1.3. Essais d'analyse pour obtenir un modèle moyen sur PS2.

De même que pour le profil PS1, nous avons tenté d'obtenir un modèle moyen sur toute la longueur du profil PS2 avec plusieurs points de tir (2110, 2108, 2109, 2054 et 2052) (voir figure 5.1) en utilisant un modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3 et en utilisant toutes les traces à partir d'un offset minimum (correspondant à une $\frac{1}{2}$ longueur d'onde max).

Globalement, toutes les courbes de dispersion sont exploitables entre 6 et une douzaine de Hz exceptés pour le point de tir 2052 (entre 6 et 15 Hz). Les lenteurs associées évoluent de 0.0006-0.0007 s/m dans les basses fréquences à des valeurs de l'ordre de 0.0007-0.0009 s/m aux plus hautes fréquences excepté pour le point de tir 2108 (lenteurs comprises entre 0.001 et 0.0014 s/m).

Pour le point de tir 2110, le modèle de vitesse en onde S (figure 5.11) montre une interface vers 60-70 m de profondeur avec un passage de 1000-1100m/s à 1900-2000m/s qui semble être le passage entre la zone déstructurée et saine obtenue en tomographie sismique.

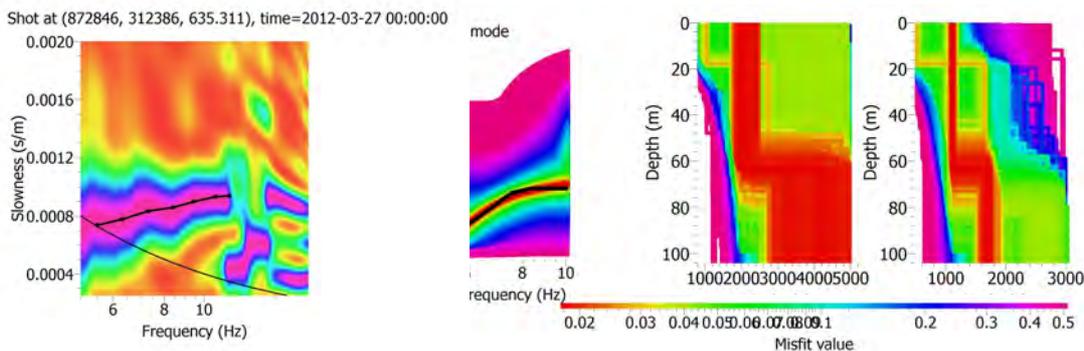


Figure 5.11 : De gauche à droite : Courbes de dispersion obtenue pour le point de tir 2110 pour les offsets compris entre 190 et 500 m avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3 (les données expérimentales correspondent aux points noirs), courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S.

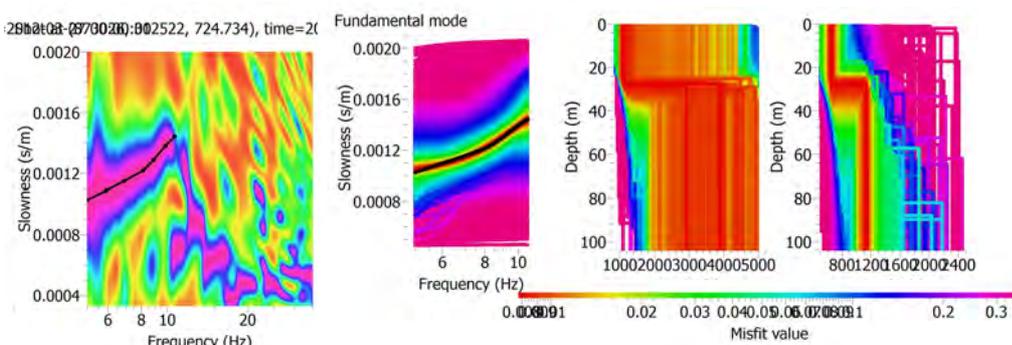


Figure 5.12 : De gauche à droite : Courbes de dispersion obtenue pour le point de tir 2108 pour les offsets compris entre 120 et 410 m avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3 (les données expérimentales correspondent aux points noirs), courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S.

modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S.

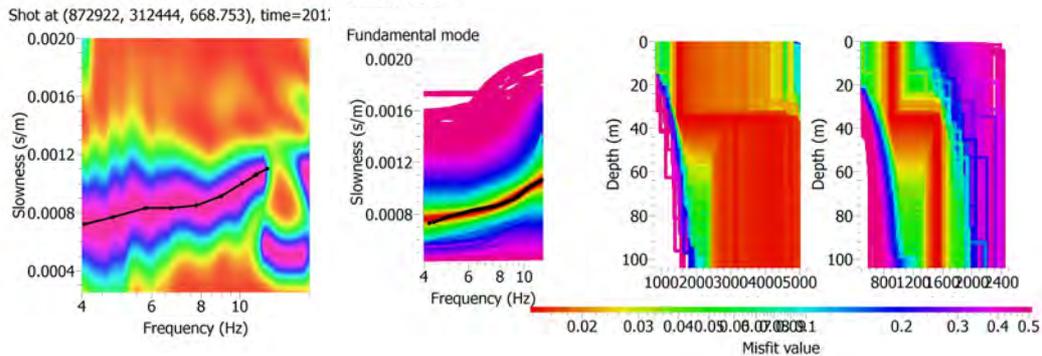


Figure 5.13 : De gauche à droite : Courbes de dispersion obtenue pour le point de tir 2109 pour les offsets compris entre 120 et 400 m avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3 (les données expérimentales correspondent aux points noirs), courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S

Dans le cas des points de tir 2108 et 2109 (figures 5.12 et 5.13), l'interface est entre 30-40 m mais à la limite de validité ($H_{1min}=33$ m), avec respectivement un passage de 600 et 1100 m/s et de 800-900 m/s à 1600 m/s. La profondeur d'investigation maximum, Z_{max} est de 110 m et ne permet d'atteindre la zone saine si l'on se réfère au modèle obtenu en tomographie sismique. L'inversion a été testée en excluant les offsets lointains ($<$ à 350 m) et en utilisant un modèle à 3 couches, les modèles obtenus sont sensiblement équivalents.

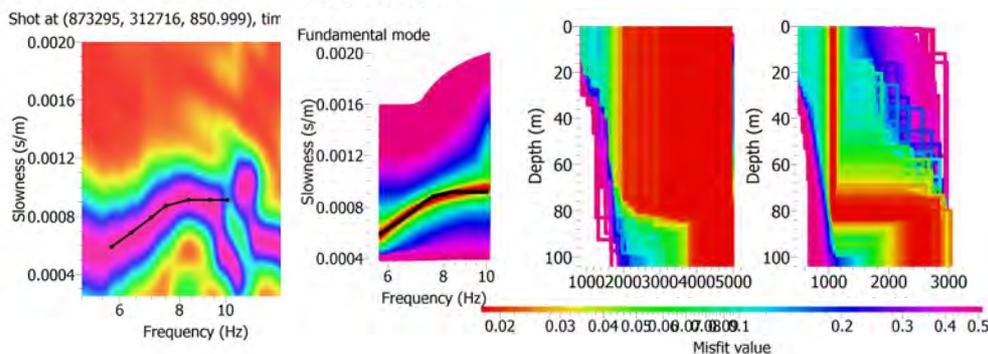


Figure 5.14 : De gauche à droite : Courbes de dispersion obtenue pour le point de tir 2054 pour les offsets compris entre 120 et 380 m avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3 (les données expérimentales correspondent aux points noirs), courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S

Les modèles obtenus pour les points de tir 2052 et 2054 (figures 5.14 et 5.15) montrent des vitesses $VS1$ respectivement égale à 1000-1100 m/s et 1400 m/s et des vitesses $VS2$ égales à 2000-3000 m/s et 2300 m/s avec une interface à 70-80 m et 50 m de profondeur.

Globalement, les résultats obtenus sur les différents points de tir permettent d'avoir une idée du modèle moyen sur la longueur du profil PS2. Pour les points de tir 2108 et 2109, la profondeur d'investigation ne permet pas d'atteindre la zone saine et ainsi les modèles à 2 couches obtenus pour des points de tirs correspondent uniquement à la zone déstructurée avec un passage de vitesses des ondes S de 600-800 m/s à 1100-1600 m/s à une profondeur de 30 m environ. Par contre, les points de tir 2010, 2052 et 2054 montrent une interface vers 50-80 m de profondeur avec des vitesses $VS1$

et VS2 respectivement égales à 1100-1400 m/s et supérieures à 1900 m/s
 La profondeur de l'interface zone déstructurée - zone saine apparaît plus superficielle que celle obtenue par la tomographie sismique.

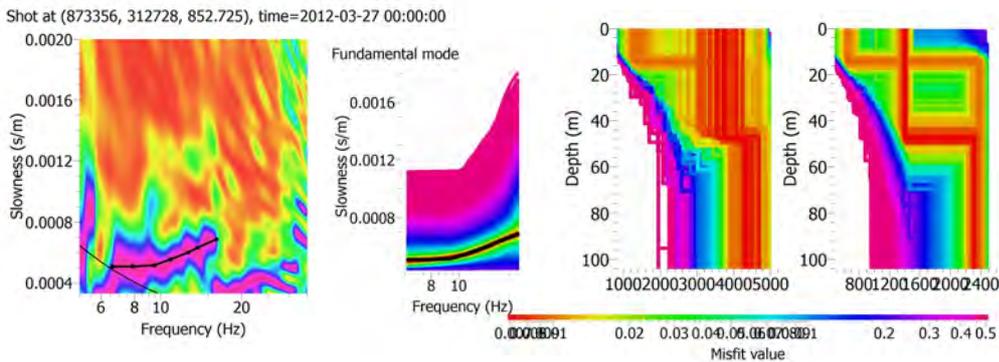


Figure 5.15 : De gauche à droite : Courbes de dispersion obtenue pour le point de tir 2052 pour les offsets compris entre 110 et 410 m avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3 (les données expérimentales correspondent aux points noirs), courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S

5.2. Analyses du profil PS3PS4.

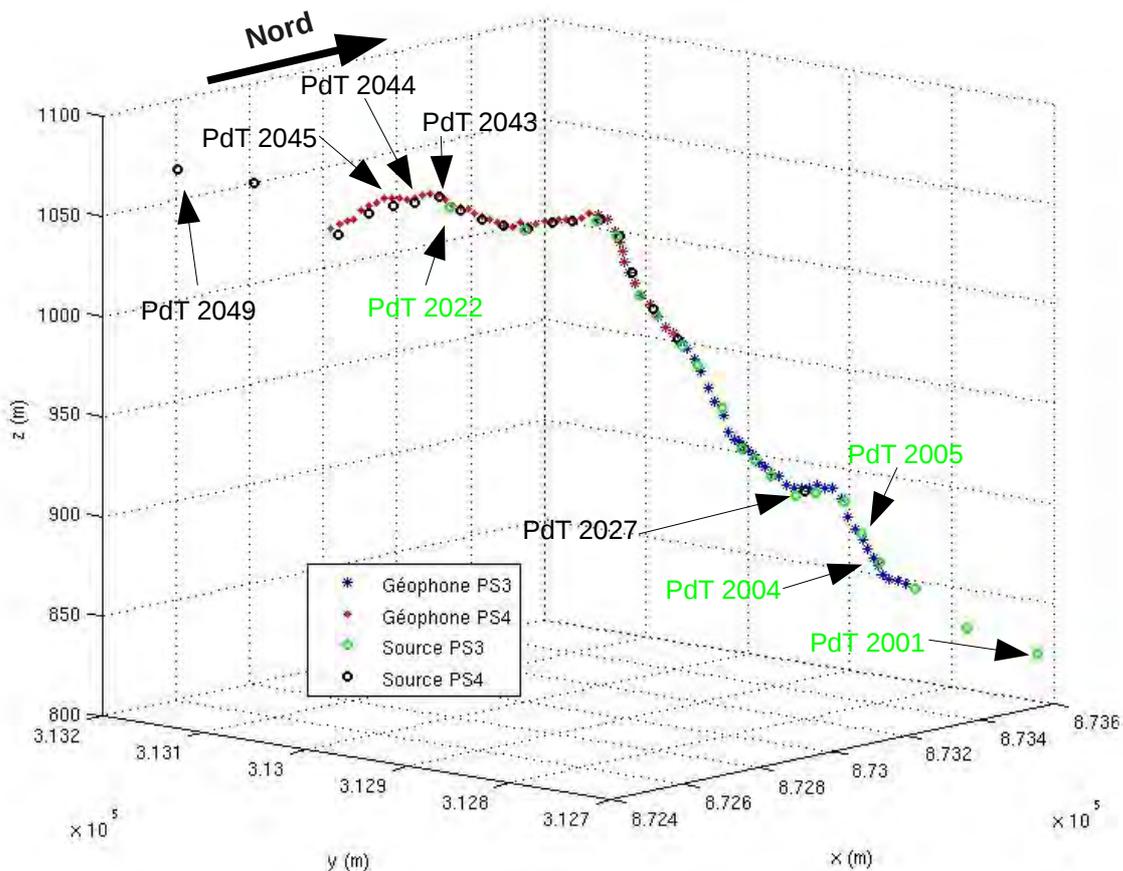


Figure 5.16 : Profil PS3(Points de tir de PdT2001 à PdT2022 (notés en vert) positionnés par ordre croissant le long de la ligne et géophones (étoiles bleues)). Profil PS4 (Points de Tir :PdT2027 à PdT2049 (notés en noir) positionnés par ordre croissant le long de la ligne et géophones (Points rouges))

La figure 5.16 montre la position des géophones et des sources des profils PS3PS4 potentiellement utilisables pour l'analyse des ondes de surface.

Le profil PS3 comprend 20 points de tir (fichiers 2001 à 2022). Les fichiers 2002 et 2017 n'existent pas. Le profil PS4 compte 20 points de tir (fichiers 2027 à 2049). Les fichiers 2038, 2047 et 2048 n'existent pas.

5.2.1. Essais d'analyse pour obtenir un modèle moyen sur PS3PS4.

L'inversion a été effectuée en utilisant les traces ayant un offset supérieur ou égale à 110 m (correspondant à une $\frac{1}{2}$ longueur d'onde max). Un modèle à deux couches a été utilisé (voir figure 5.3). Les résultats obtenus pour le point de tir 2004 et 2005 de PS3 sont présentés dans les figures 5.17 et 5.18.

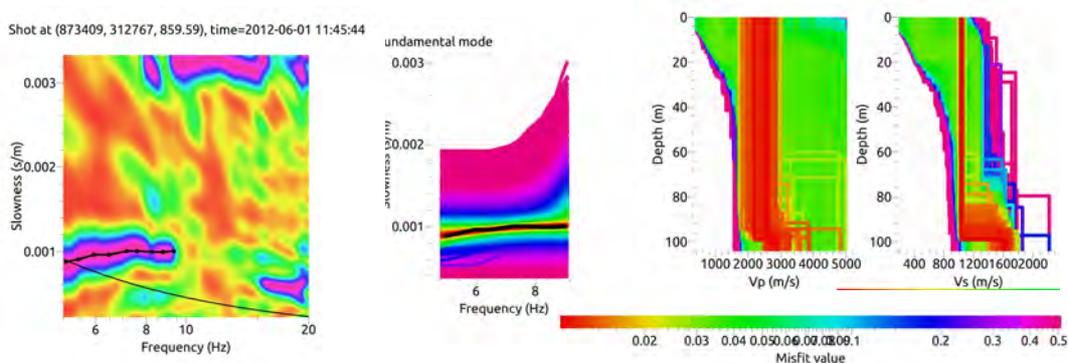


Figure 5.17 : De gauche à droite : Courbes de dispersion obtenue pour le point de tir 2004 pour les offsets supérieurs à 110 m avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3 (les données expérimentales correspondent aux points noirs), courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S

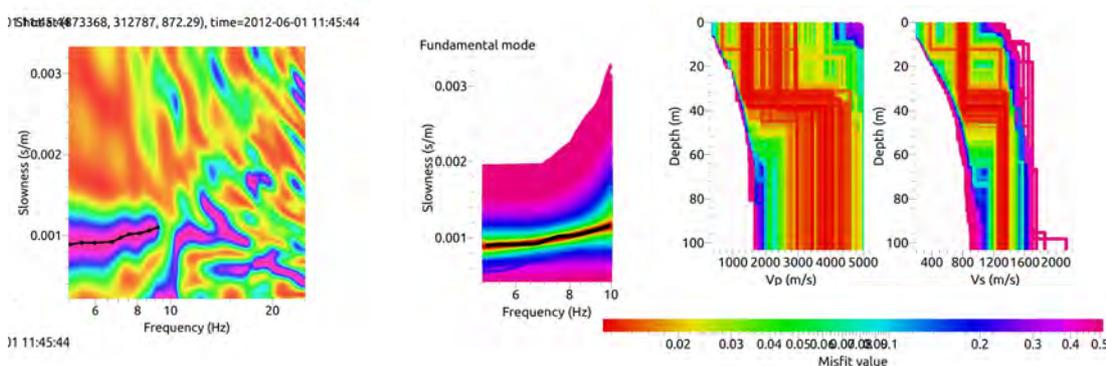


Figure 5.18 : De gauche à droite : Courbes de dispersion obtenue pour le point de tir 2005 pour les offsets supérieurs à 110 m avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3 (les données expérimentales correspondent aux points noirs), courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S

Les modèles obtenus pour le point de tir 2004 montrent une interface à 90-100 m de profondeur avec un passage des vitesses des ondes S de 1000 à 1600 m/s. Ceux obtenus pour le point de tir 2005 montrent une interface beaucoup superficielle 30-40 m de profondeur avec un passage des

vitesse des ondes S de 800 m/s à 1300 m/s.

Les résultats obtenus pour les points de tir 2045, 2044, 2043 et 2027 du profil PS4 sont présentés sur les figures 5.19 à 5.22. Bien que les courbes de dispersion soient délicates à définir, nous avons tenté des inversions. Les modèles obtenus sont assez similaires pour les points de tir 2045 et 2044 avec une interface assez profonde vers 80 -100 m de profondeur avec le passage d'une vitesse des ondes S de 1000 m/s à une vitesse supérieure à 2000 m/s. L'interface pour le point de tir 2043 est plus superficielle à 60 m de profondeur avec des vitesses des ondes S de 1000 à 1300-1600 m/s. Enfin, l'interface pour le point de tir 2027 est plus superficielle à 20 m de profondeur avec des vitesses des ondes S de 500 à 1500 m/s. Ces résultats sont très cohérents avec le modèle obtenu en tomographie sismique qui montre de grosses variations d'épaisseur de la zone déstructurée du Sud-Ouest vers le Nord-Est.

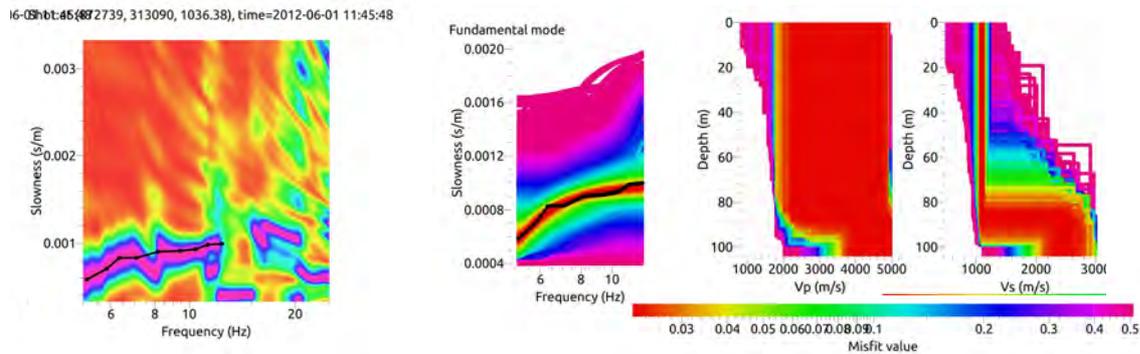


Figure 5.19 : De gauche à droite : Courbes de dispersion obtenue pour le point de tir 2045 pour les offsets compris entre 110 et 440 m avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3 (les données expérimentales correspondent aux points noirs), courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S

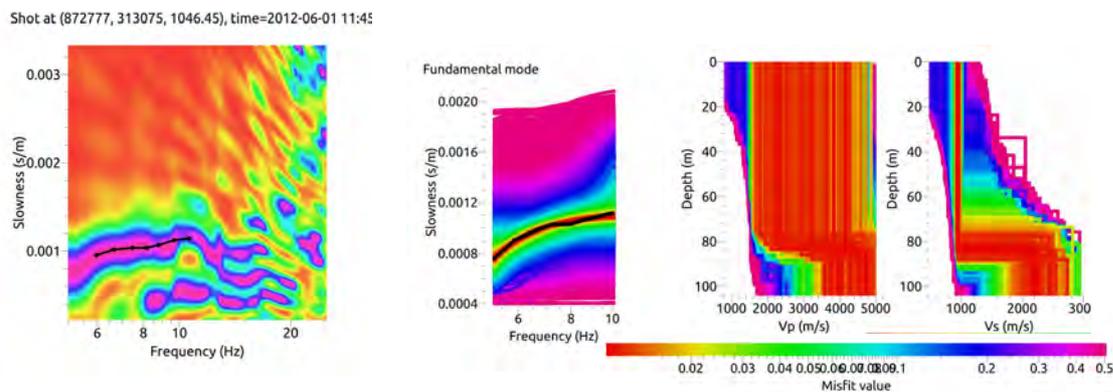


Figure 5.20 : De gauche à droite : Courbes de dispersion obtenue pour le point de tir 2044 pour les offsets compris entre 110 et 410 m avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3 (les données expérimentales correspondent aux points noirs), courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S

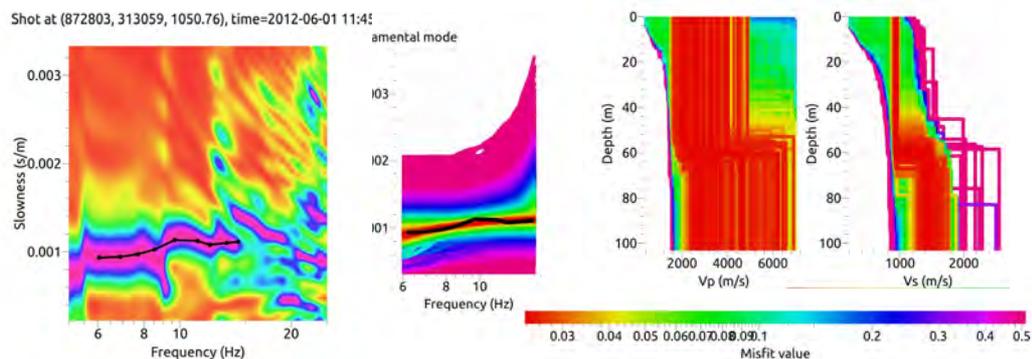


Figure 5.21 : De gauche à droite : Courbes de dispersion obtenue pour le point de tir 2043 pour les offsets compris entre 90 et 380 m avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3 (les données expérimentales correspondent aux points noirs), courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S

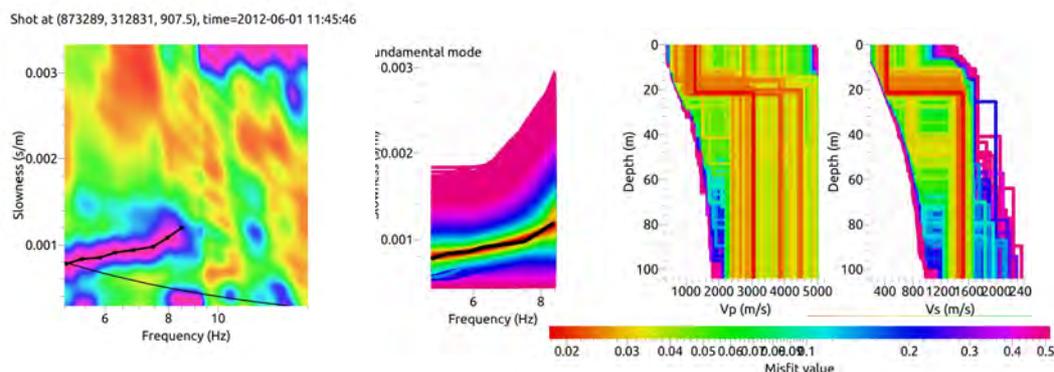


Figure 5.22 : De gauche à droite : Courbes de dispersion obtenue pour le point de tir 2027 pour les offsets supérieur à 120 m avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3 (les données expérimentales correspondent aux points noirs), courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S

5.3. Analyses des profils PS5, PS6 et PS7.

La figure 5.23 montre la position des géophones et des sources des profils PS5, PS6 et PS7 potentiellement utilisables pour l'analyse des ondes de surface.

Le profil PS5 comprend 15 points de tir (fichiers 1000 à 1014), le profil PS6, 16 points de tir (fichiers 1015 à 1030) et le profil PS7, 16 points de tir (fichiers 1031 à 1049). La distance intergéophone est de l'ordre de 5m pour ces trois profils et les offsets maximum sont inférieurs à 250 m ce qui limite la résolution des courbes de dispersion, la longueur d'onde maximum exploitable et par conséquent la gamme de fréquences exploitable.

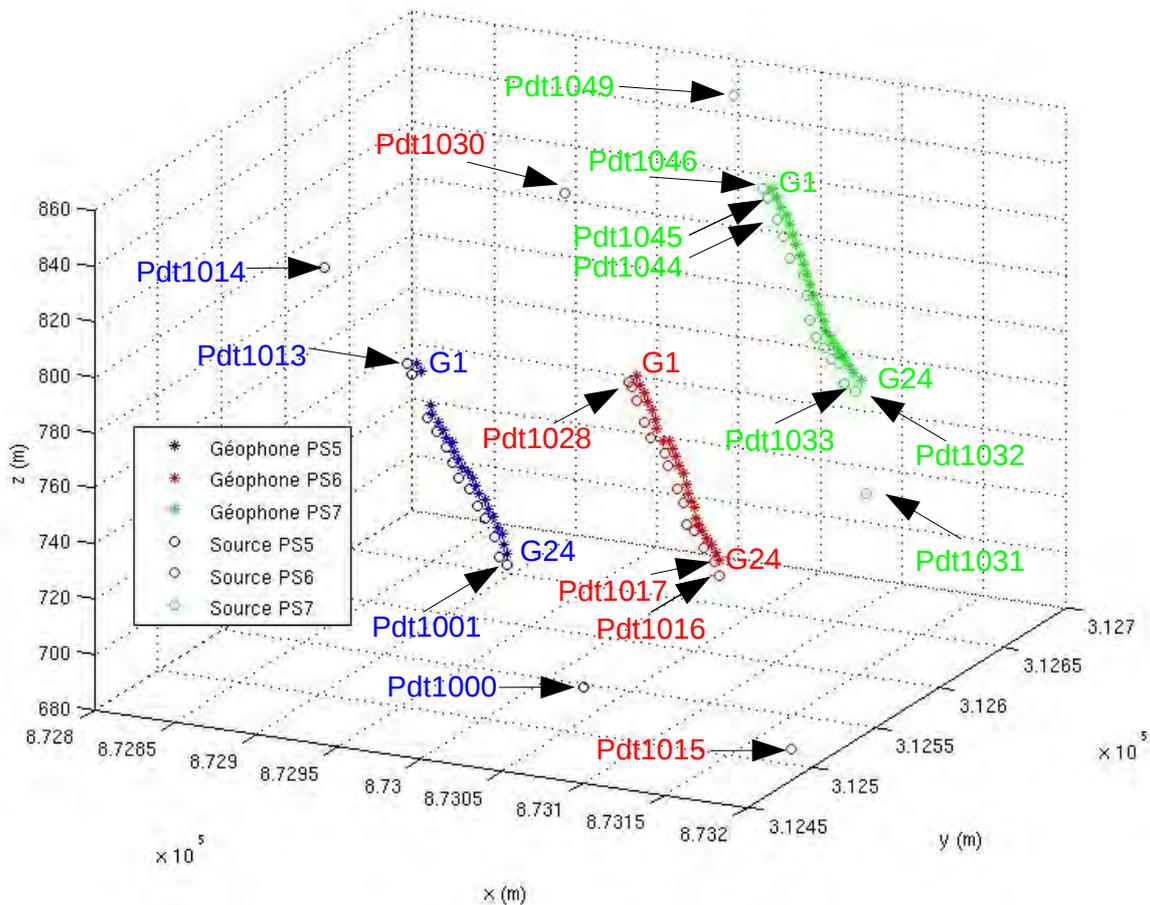


Figure 5.23 : Profil PS5(Points de tir de PdT1000 à PdT1014) (notés en bleu) positionnés par ordre croissant le long de la ligne et géophones (étoiles bleues)). Profil PS6 (Points de Tir :PdT1015 à PdT1030) (notés en rouge) positionnés par ordre croissant le long de la ligne (étoiles rouges)), Profil PS7 (Points de Tir :PdT1031 à PdT1049) (notés en vert) positionnés par ordre croissant le long de la ligne (étoiles vertes))

5.3.1. Essais d'analyse pour obtenir un modèle moyen sur PS5, PS6 et PS7.

Les analyses ont été effectuées sur les points de tir en bout de profil afin de conserver les offsets les plus grands possibles. Ainsi, l'inversion a été effectuée en utilisant les traces ayant respectivement un offset supérieur ou égal à 50 m ou 30 m pour les points de tir dont la source est à l'extérieur du dispositif et au niveau du premier géophone. Un modèle à deux couches a été utilisé (voir figure 5.3). Les résultats obtenus pour le point de tir 1000, 1001, 1013 et 1014 de PS5 sont présentés dans la figure 5.24.

Les courbes de dispersion obtenues sur la figure 5.24 ne sont pas exploitables. En effet, si on considère comme le propose Bobet, 2005 que la longueur d'onde maximum ne doit pas excéder 40-50 % de la longueur du profil, la limite inférieure des lenteurs et des fréquences associées montrent que la courbe de dispersion exploitable est extrêmement réduite voire inexploitable, le contenu fréquentiel étant trop restreint aux basses fréquences.

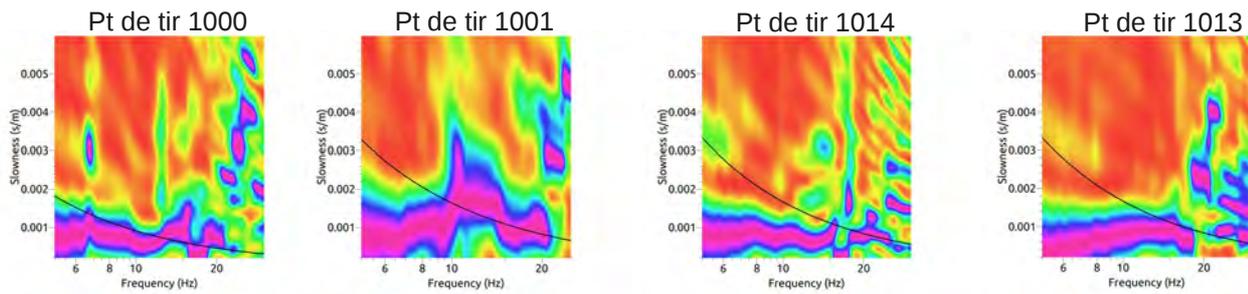


Figure 5.24 : Courbes de dispersion obtenues pour les points de tir 1000, 1014 en utilisant les offsets compris entre 50 et 210 m et courbes de dispersion obtenues pour les points de tir 1001 et, 1001 en utilisant les offsets compris entre 30 et 120 m. La courbe noire représente la limite inférieure (définie avec la longueur d'onde maximale) à partir de laquelle la courbe de dispersion est exploitable.

Les résultats obtenus pour le point de tir 1015, 1016, 1017 et 1028 de PS6 sont présentés dans la figure 5.25 à 5.28. Ces figures présentent de gauche à droite les courbes de dispersion obtenues pour le point de tir étudié avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3, (les données expérimentales correspondent aux points noirs), les courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, les modèles de vitesses en ondes P, les modèles de vitesses en ondes S. Les courbes de dispersion sont exploitables uniquement sur la gamme de fréquence entre 12-15 et 20-25 Hz. Après inversion, les modèles obtenus sont très superficiels avec une profondeur d'investigation maximum Z_{max} comprise entre 30 et 50 m suivant les points de tirs ce qui ne permet pas d'atteindre la zone saine. L'épaisseur de la première couche H1 n'est pas exploitable car inférieure au H1min requis et la vitesse des ondes S VS2 dans la deuxième couche est identique pour tous les points de tir analysés avec une valeur d'environ 1200 m/s excepté le point de tir 1016 VS2=800 m/s).

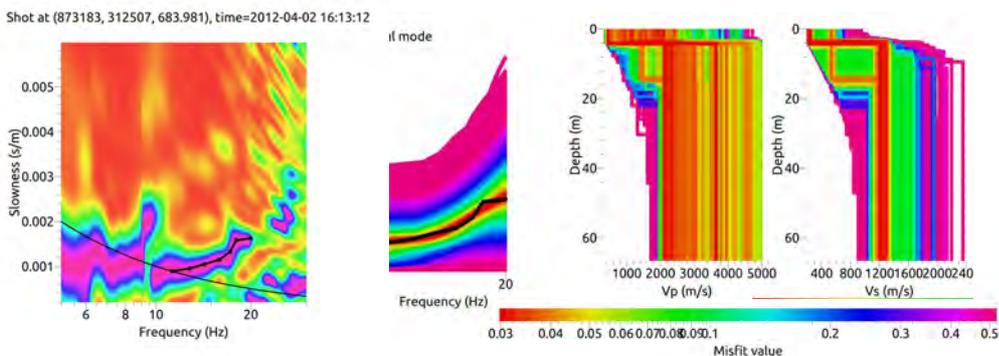


Figure 5.25: Résultats de l'inversion pour le point de tir 1015 obtenus pour avec les traces d'offsets compris entre 50 et 210 m .

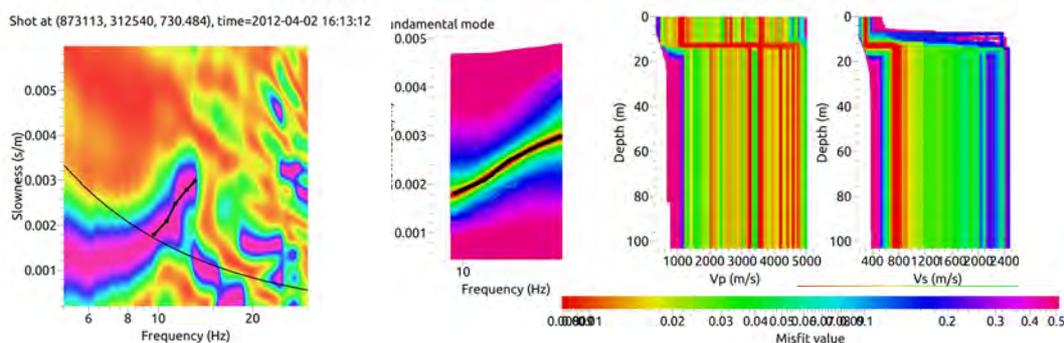


Figure 5.26: Résultats de l'inversion pour le point de tir 1016 obtenus pour avec les traces d'offsets compris entre 30 et 120 m .

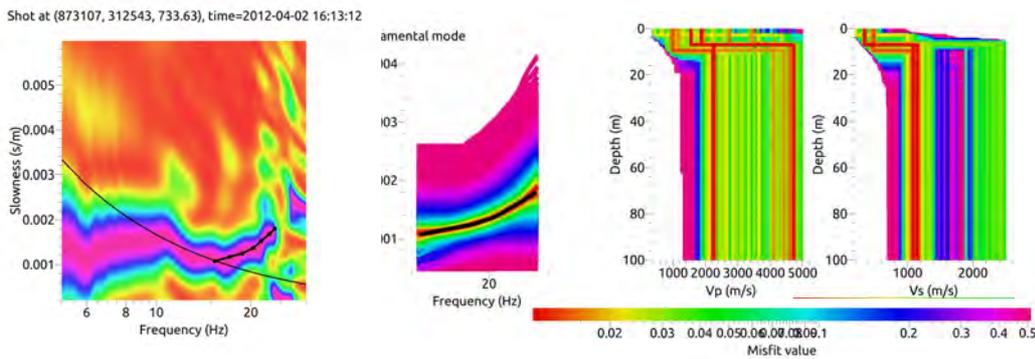


Figure 5.27 : Résultats de l'inversion pour le point de tir 1017 obtenus pour avec les traces d'offsets compris entre 30 et 110 m .

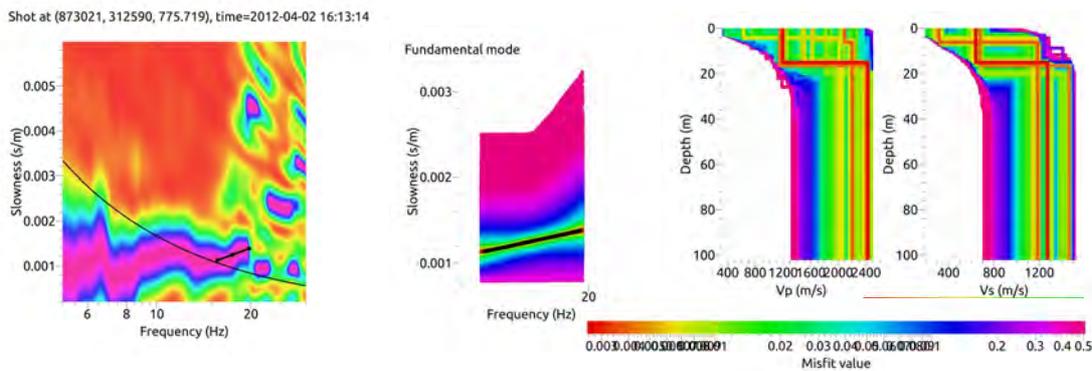


Figure 5.28 : Résultats de l'inversion pour le point de tir 1028 obtenus pour avec les traces d'offsets compris entre 30 et 110 m .

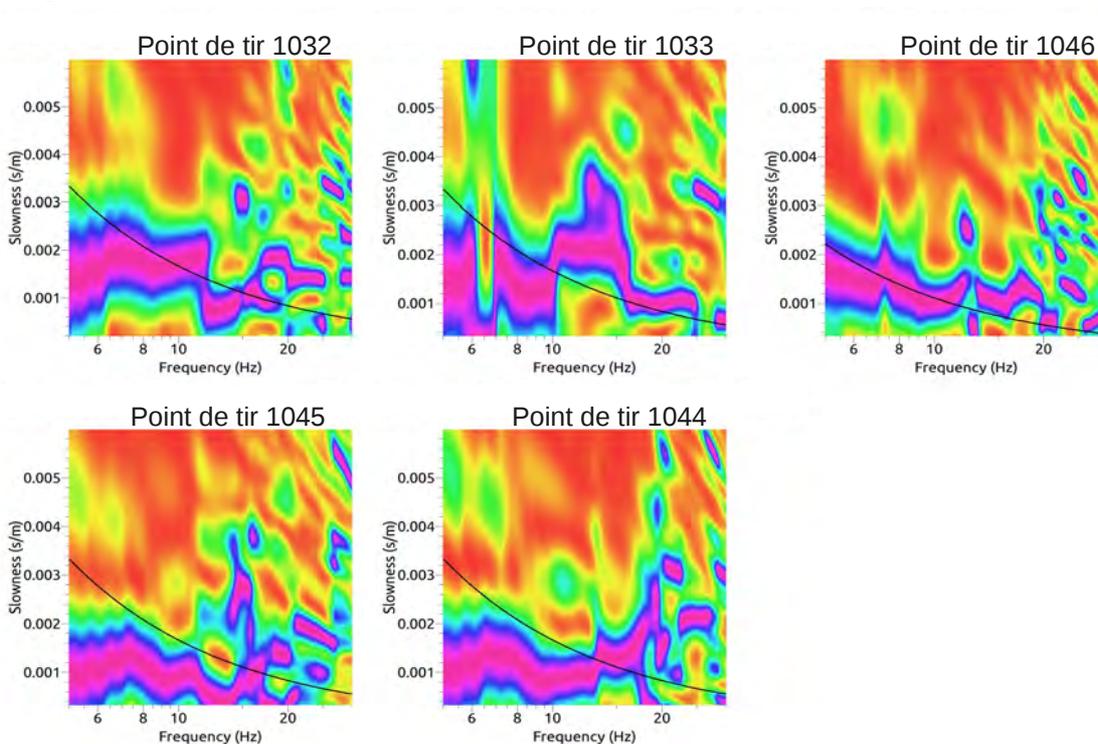


Figure 5.29 : Courbes de dispersion obtenue pour les points de tir 1032, 1033, 1046, 1047 et 1048 pour respectivement les gamme d'offset 30-120 m, 30-115 m, 30-175 m, 30-115 m et 30-175 m .

Les points de tir 1031, 1032, 1033, 1045, 1046 et 1047 de PS7 ont été étudiés. Ils présentent tous une courbe de dispersion exploitable (figures 5.29 et 5.30) très réduite et restreinte dans une gamme de fréquence assez élevée ce qui réduit tout comme pour les profils PS5 et PS6 la profondeur d'investigation à au plus 50 m de profondeur et ne permet pas d'atteindre la zone saine. Le modèle de vitesse obtenu pour le point de tir 1031 est présenté dans la figure 5.30. La vitesse de la deuxième couche est là encore d'environ 1200 m/s.

Globalement, les résultats sur PS5, PS6 et PS7 sont cohérent avec une vitesse VS2 dans l'ordre de 1200 m/s dans la zone déstructurée et la profondeur d'investigation ne permet pas d'atteindre la zone saine.

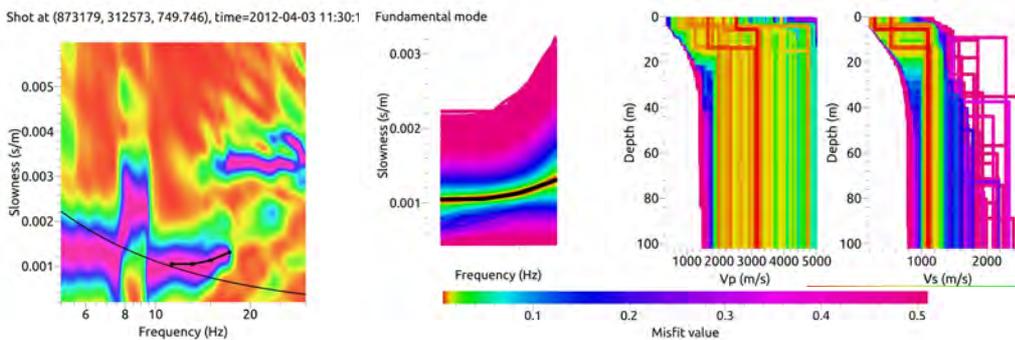


Figure 5.30 : De gauche à droite : Courbes de dispersion obtenue pour le point de tir 2031 pour les offsets compris entre 50 et 180 m avec le modèle à 2 couches défini dans la figure 5.3 (les données expérimentales correspondent aux points noirs), courbes de dispersion correspondant aux modèles obtenus après inversion, Modèles de vitesses en ondes P, Modèle de vitesses en ondes S

5.4. synthèse des résultats

Modèles Vs obtenus avec onde de surface

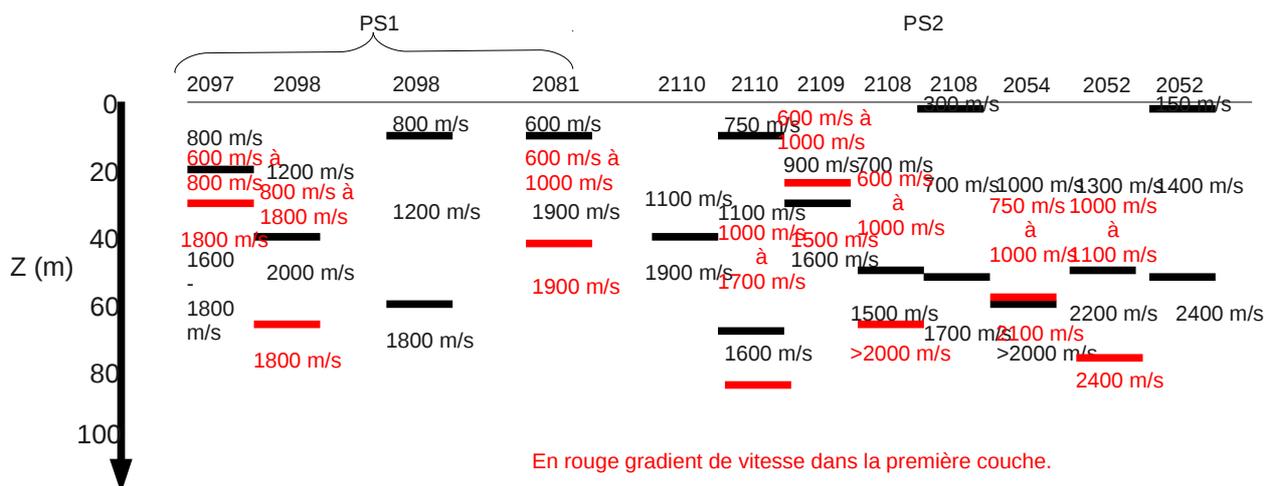


Figure 5.31 : Synthèse des modèles de vitesses en ondes S obtenus pour les points de tirs étudiés du profil PS1PS2. Modèle à 2 ou 3 couches homogènes en noir et modèles à 2 couches avec gradient de vitesse des ondes P dans la première couche variant de 500-3000 m/s en rouge.

Des inversions ont également été testées en utilisant un modèle à deux couches avec un gradient de vitesse des ondes P dans la première couche de 500 à 3000 m/s. Nous ne détaillons pas ici les résultats obtenus pour chaque point de tir. Par contre, une synthèse des modèles de vitesse en onde S obtenus avec un modèle à deux ou trois couches et avec et sans gradient de vitesse et relatifs aux profils PS1PS2 et PS3PS4 sont présentés dans les figures 5.31 et 5.32. Tous les modèles obtenus montrent une cohérence satisfaisante à l'exception de quelques points de tir où le modèle à gradient défini une interface zone déstructurée-zone saine plus profonde comme par exemple les points de tir 2081 de PS1 et 2027 et 2043 de PS4.

Modèles Vs obtenus avec onde de surface

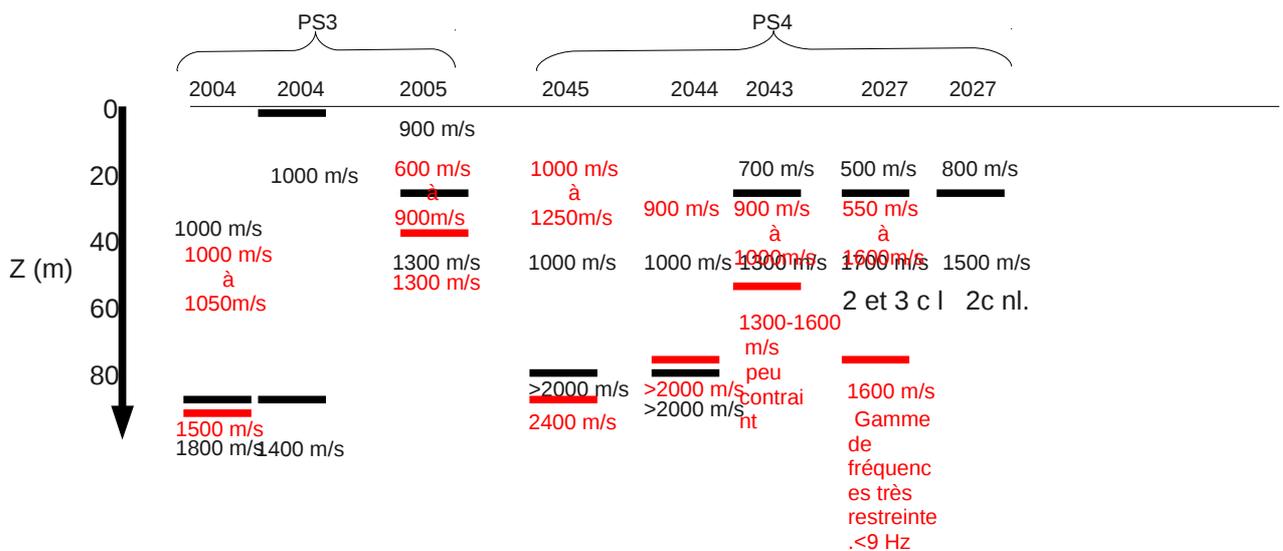


Figure 5.32: Synthèse des modèles de vitesses en ondes S obtenus pour les points de tirs étudiés du profil PS3PS4. Modèle à 2 ou 3 couches homogènes en noir et modèles à 2 couches avec gradient de vitesse des ondes P dans la première couche variant de 500-3000 m/s en rouge.

La conclusion générale de ces analyses sur les ondes de surface est que même si les modèles obtenus en vitesses des ondes S ont globalement une tendance cohérente avec les modèles de tomographie sismique, il reste cependant des instabilités d'un point de tir à l'autre.

L'obstacle premier dans ces analyses d'onde de surface est la gamme de fréquence exploitable qui est extrêmement réduite. D'autre part, les courbes de dispersion sont peu contraintes et donc rendent les résultats de l'inversion instables. Enfin, les analyses de courbe de dispersion ayant été déterminées sur l'ensemble des offsets utilisables pour un point de tir donné, ont logiquement définis des modèles moyens alors que l'on sait la zone déstructurée hétérogène. Les analyses des ondes de surface effectuées sur une partie des offsets seulement n'ont pas été concluantes soit à cause d'une faible résolution des courbe de dispersion, soit parce qu'elle n'ont pas permis de montrer de variations probantes par rapport aux analyses effectuées sur l'ensemble du profil.

6. Conclusions

Afin de caractériser en 3 dimensions le mouvement de terrain des "Ruines de Séchilienne" nous avons exploité l'ensemble des données de sismique active et sismologiques disponibles. Dans cette

optique, nous avons effectué des modélisations directes et une inversion tomographique en 3 dimensions avec l'ensemble des données sismiques et sismologiques afin d'obtenir un modèle global de la distribution des vitesses de ondes P. L'inversion tomographique en 3 dimensions n'a pas donné de résultats probants. Les causes principales sont liées au manque de contraintes en 3 dimensions. Il paraît nécessaire d'augmenter la densité des données avec des directions et offsets plus diversifiés pour pouvoir envisager une inversion en 3 dimensions. D'autre part, les données sismologiques que nous avons tentées d'utiliser pour compléter la base de données ne bénéficiaient pas d'un calage temporel. Nos tentatives pour déterminer ce calage temporel en utilisant l'onde aérienne ont montré que l'incertitude restait très importante. Cependant, l'analyse des résidus après inversion nous a permis de contraindre et d'affiner les vitesses de ondes P et l'épaisseur de la zone déstructurée dans le mouvement de terrain. Nous avons également effectué une reprise des inversions tomographiques des profils en 2 dimensions en contraignant le modèle initial avec les informations obtenues à partir des modélisations directes et de l'étude des résidus en 3 dimensions. Ainsi, l'utilisation de modèles initiaux avec un gradient de vitesse a permis d'affiner les modèles finaux par rapport à ceux obtenus avec un modèle initial à vitesses constantes.

D'autre part, bien que la configuration d'acquisition ne soit pas optimale, nous avons tenté une exploitation en sismique réflexion des profils de sismique active. Au préalable, une étude de l'influence du contenu fréquentiel très bas sur les éventuelles hyperboles de réflexion a été effectuée sur des points de tirs synthétiques générés à partir de modèles initiaux basés sur les résultats obtenus en tomographie sismique. Ces modélisations ont mis en évidence des problèmes de déphasage et d'interférence entre les différents trains d'onde. Ainsi, les ondes réfléchies ne sont pas facilement dissociables des autres trains d'onde mais elles sont présentes dans les points de tir. Après un traitement en sismique réflexion des différents profils, il s'est avéré qu'il était difficile de visualiser des signaux cohérents que l'on puisse interpréter comme étant des réflexions. L'acquisition de nouvelles données avec des paramètres d'acquisition optimum pour un traitement en sismique réflexion permettrait d'avoir une réponse définitive sur la possibilité d'imager la structure du glissement de terrain.

Enfin, nous avons également tenté d'exploiter les ondes de surface en vue d'obtenir un modèle de vitesse des ondes S. Globalement, les modèles obtenus avec différents points de tirs sont cohérents avec les résultats de la tomographie sismique des ondes P. Cependant, la gamme de fréquence exploitable est très réduite et peu contrainte ce qui induit des instabilités dans différents modèles obtenus.

Cette étude montre la difficulté d'exploiter des données sismiques dans un contexte aussi complexe avec une zone déstructurée très hétérogène qui induit notamment un contenu fréquentiel dans les données extrêmement faible et restreints.

Références :

Bodet L. 2005. Limites théorique et expérimentales de l'interprétation de la dispersion des ondes de rayleigh : Apport de la modélisation numérique et physique. Thèse de Doctorat. Université de Nantes. 167 PP.

Bouchon M. and Aki K. 1977. Discrete wave-number representation of seismic-source wave fields. Bull. Seism. Soc. Am. , 67, 259-277.

Dietrich, M., 1988. Modeling of marine profiles in the t-x and tau-p domains. Geophysics, 53, 453-465.

Kennett B.L.N. And Kerry N.J., 1979. Seismic waves in a stratified half space. Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 57, 557-583.

Le Roux O., Jongmans D., Kasperki J., Schwartz S., Potherat P., Lebrouc V., Lagabrielle R., Meric O. 2011. Deep geophysical investigation of the large Séchilienne landslide (Western Alps, France) and calibration with geological data, *Engineering Geology*, 120, 18-31.

Meric O., Garambois S., Jongmans D., Wathelet M., Chatelain J.-L. And Vengeon J.-M. (2005). – Application of geophysical methods for the investigation of the large gravitational mass movement of Séchilienne, France. – *Can. Geotech. J.*, 42, 1105-1115.

Podvin P. and Lecomte I. 1991. Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools. *Geophysical Journal international*. Vol 105, 271-284.