



## **Imagerie sismique d'un glissement de terrain**

**Fait par** : *KHELIL Manel*

**Encadré par** : *M. Hervé PERROUD* « herve.perroud@univ-pau.fr »

### **Résumé**

Ce travail porte sur l'imagerie d'un glissement de terrain. Nous nous intéressons ici à la région NW du département de l'Hérault où la déformation est associée à des événements climatiques ponctuels appelés « les événements cévenols » ainsi qu'à la présence de couches évaporitiques du Trias. Les méthodes géophysiques, comme l'imagerie sismique, sont bien adaptées à l'étude structurale des glissements de terrain et à la compréhension de leurs mécanismes internes. A cet effet deux lignes sismiques haute résolution ont été acquises sur le site, la première dans la direction N-S sur 110 m de longueur et la deuxième dans la direction de la pente sur 130 m. Il sera particulièrement intéressant de voir si les résultats permettent de distinguer la structure de décollement. Nous présentons ici les résultats préliminaires obtenus après l'acquisition et le traitement des données sismiques de la première ligne, en tenant compte de la topographie et de l'hétérogénéité du milieu.

**Mots clés** : *sismique haute résolution, corrections statiques, imagerie sismique.*

# Table des matières

1. Introduction.....	1
2. Contexte géologique et géographique de la région.....	2
2.1. Géographie.....	2
2.2. Géologie.....	2
3. Principe de la méthode sismique et dispositif.....	5
4. Traitement des données.....	6
4.1. Correction d'amplitude.....	7
4.2. Filtrage.....	7
4.2.1. Filtrage passe bande.....	7
4.2.2. Filtrage en pente (F-K).....	7
4.3. Le mute.....	8
4.4. Corrections statiques.....	8
4.4.1. Le pointé.....	9
4.4.2. Pour $-1.5 \leq x \leq +1.5 m$ .....	10
4.4.3. Pour $2.5 \leq x \leq 11.5 m$ .....	12
4.5. Analyse de vitesses et stack.....	14
5. Conclusion .....	19
Références.....	20

## Table des figures

<b>Figure 1.</b> Morphologie caractéristique de versants des vallées du Nord-Lodévois.....	p3
<b>Figure 2.</b> Extrait de la carte géologique du BRGM au 1/50 000.....	p4
<b>Figure 3.</b> Diagraphies et litho-stratigraphie et rhéologie des formations de la vallée du Laurounet.....	p5
<b>Figure 4.</b> Schéma des zones du pointé.....	p9
<b>Figure 5.</b> Pointé des arrivées première avec suxpicker sur le tir 19.....	p10
<b>Figure 6.</b> Représentation des temps de la directe en fonction de la valeur absolue de l'offset pour le tir 59.....	p11
<b>Figure 7.</b> Représentation des positions des géophones en fonction du temps $t_{S1R}$ et $t_{S2R}$ .....	p12
<b>Figure 8.</b> Représentation des positions des géophones en fonction de $t_{S1R} - t_{S2R}$ .....	p13
<b>Figure 9.</b> Pointé CRG 3 avec suxpicker.....	p13
<b>Figure 10.</b> Graphe de couverture.....	p14
<b>Figure 11.</b> CDP 60 avec scénario 1.....	p16
<b>Figure 12.</b> CDP 60 avec scénario 2.....	p17
<b>Figure 13.</b> Section finale affichée en xwigb.....	p18
<b>Figure 14.</b> Section finale affichée en ximage.....	p18
<b>Tableau 1.</b> Les deux scénarios du prétraitement.....	p6
<b>Tableau 2.</b> Zones définies pour faire le pointé.....	p9

## **1. Introduction**

Les glissements de terrain sont des phénomènes naturels d'origines très diverses résultant de la déformation et du déplacement du sol. Le risque de ces glissements concerne en France de nombreuses régions, principalement les zones de montagne, et notamment le Languedoc-Roussillon. Des glissements de grande ampleur existent également dans le NW du département de l'Hérault qui sont actuellement sous haute surveillance afin de tenter de limiter leurs conséquences. La problématique des glissements de terrain, compte tenu des enjeux socio-économiques associés, a fait l'objet de nombreuses études dans le monde, ce qui démontre l'importance de cette thématique dans l'environnement méditerranéen.

La géophysique permet des investigations peu (ou pas) destructives pratiquement sans limite de profondeur et dans tous les milieux si l'on adopte la méthode appropriée. Elle amène généralement des connaissances plus générales, très souvent à un coût moindre que celle obtenues au moyen de forages. Les méthodes sismiques permettent de distinguer des couches possédant un contraste de vitesse/densité, tel que les roches ou les masses en glissement ont pratiquement toujours des vitesses sensiblement plus lentes que le substratum en place non tectonisé.

Ce travail a pour but l'imagerie sismique et pour faire on va dans un premier temps passer par l'étape du prétraitement et préparation des données. Ensuite on va aborder la deuxième étape qui est le passage sismique géologie afin de produire une image du sous-sol. Enfin, nous espérons aborder une interprétation et fournir davantage informations afin de caractériser le glissement d'une manière plus intégrée et identifier le niveau de décollement.

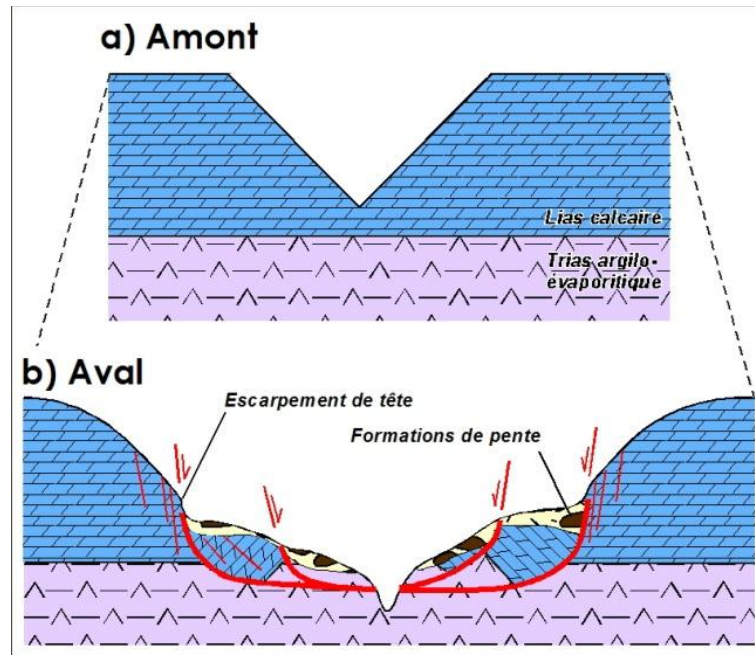
## **2. Contexte géographique et géologique de la région**

### **2.1. Géographie**

Le glissement de terrain se situe au Nord-Ouest du département de l'Hérault (Lodève) qui fait partie de la région [Languedoc-Roussillon](#). Lodève est une commune française, située dans l'arrière-pays héraultais à 45 km de Montpellier et environ 80 km de la mer Méditerranée et se trouve sur l'axe autoroutier A 75. Elle est située dans la vallée étroite de la Lergue (affluent du fleuve Hérault), au pied du Causse du Larzac. La géographie de l'Hérault est marquée par la diversité de sa géologie. Ceci s'étage des contreforts sud du [Massif central](#) jusqu'à la mer [Méditerranée](#), en passant par les zones de [garrigues](#) et la basse plaine du Languedoc viticole.

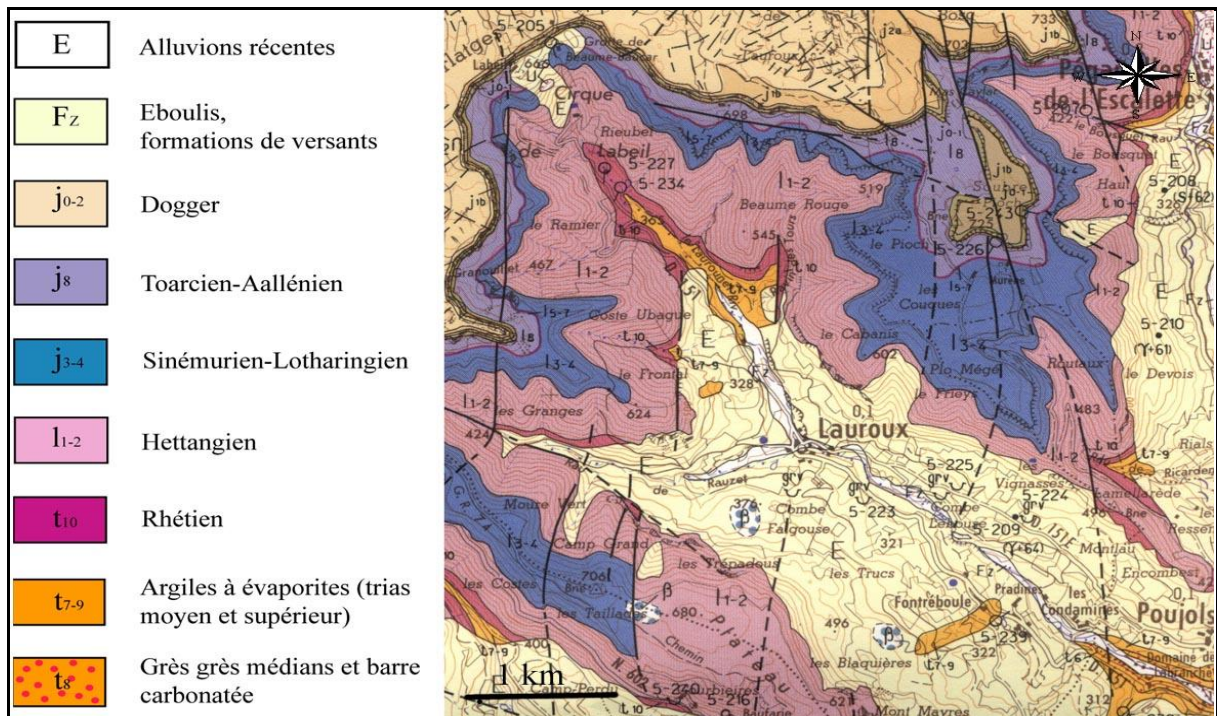
### **2.2. Géologie**

Les vallées du Nord-Lodévois, au pied du Causse du Larzac, trouvent leur origine dans la formation de reculées qui ont incisé, durant le Plio-Quaternaire, les formations calcaires du Jurassique inférieur et moyen au droit de couloirs fracturés. Ces zones de faiblesses ont guidé les écoulements karstiques et ensuite conditionné l'instabilité des versants. En amont, ces vallées sont étroites avec une forme caractéristique en « V » suivant des pentes réglées proches de 40°, qui dénotent de l'équilibre dynamique entre les processus d'érosion et d'encaissement qui reste intégralement dans les formations calcaires (Figure 1a). Vers l'aval, le thalweg atteint les argiles évaporitiques du Trias sous-jacent, les processus d'instabilité des versants sont alors initiés. Les versants, bosselés et beaucoup moins pentus, sont alors encombrés par les formations de pente qui masquent le substratum géologique. Le risque de mouvement de terrain devient alors effectif (Figure 1b).



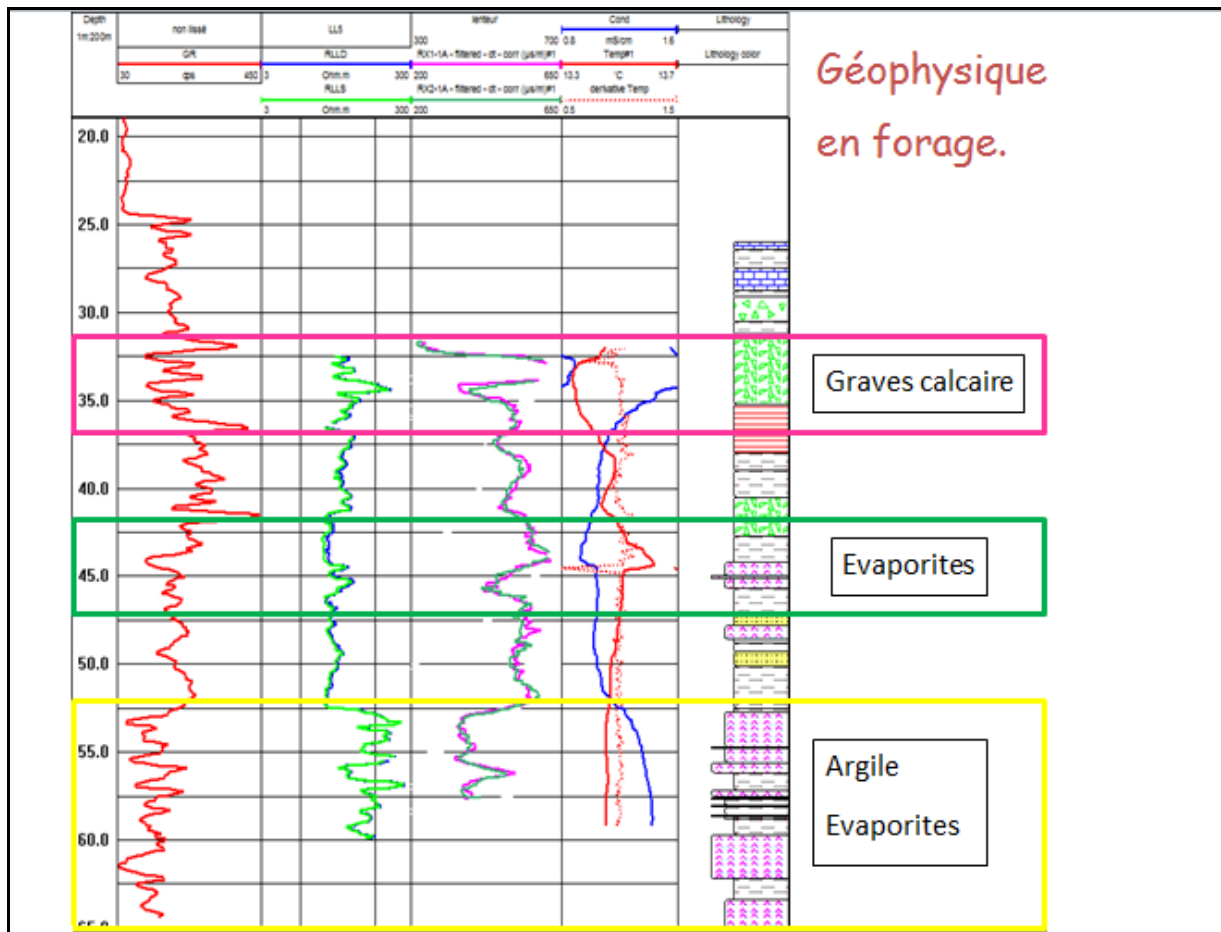
**Figure 1 : Morphologie caractéristique de versants des vallées du Nord-Lodévois (D'après : Dynamique d'un glissement de terrain; relations pluviométrie - interaction eau/roche - déformations).**

La disposition morphologique décrite ci-dessus est particulièrement visible le long de la vallée du Laurounet, où l'encombrement de la vallée par les formations de versant masque le substratum géologique et rend subtile l'identification des masses glissées (Figure 2).



**Figure 2 : Extrait de la carte géologique du BRGM au 1/50 000 (D'après : Dynamique d'un glissement de terrain; relations pluviométrie - interaction eau/roche - déformations).**

Dans le détail, la succession litho-stratigraphique reconnue sur ce secteur est la suivante (Figure 3) :



**Figure 3 : Diagraphies et litho-stratigraphie des formations de la vallée du Laurounet**

### 3. Principe de la méthode sismique et dispositif utilisé

La sismique consiste à provoquer un ébranlement mécanique en surface à partir d'une source (impulsionnelle ou vibratoire) et à enregistrer, à l'aide des récepteurs (géophones, hydrophones), les ondes sismiques réfléchies ou réfractées provenant des surfaces séparant des milieux d'impédances acoustiques différentes. Les données de ce travail ont été acquises avec la masse, l'idée est de taper plusieurs fois avec un marteau qui pèse quelques kilogrammes sur une plaque synthétique (pour un meilleur couplage) afin d'améliorer le rapport signal sur bruit. C'est une source impulsionnelle (large spectre) qui génère un signal causal, riche en hautes fréquences et qui n'est pas répétable. Les tirs ont été effectués sur tout le



profil (110 m) espacés de 1 m, et les géophones ont été disposés sur 58 m de longueur et espacés de 1 m. La sismique haute résolution peut atteindre des fréquences de 150-200 Hz, qui vise généralement des objectifs à moyenne profondeur ou même 400-500 Hz dans des cas particuliers.

La sismique haute résolution s'applique essentiellement à des objectifs peu profonds. Elle est fondée sur l'exploitation des ondes courtes provenant des fréquences élevées. Ceci nécessite l'utilisation de sources puissantes et capables de générer des impulsions très hautes fréquences et des récepteurs spéciaux à large bande (jusqu'à 250 Hz). De plus, pour éviter le phénomène d'aliasing on prendra un pas d'échantillonnage suffisamment petit. Dans ce travail le pas d'échantillonnage est de l'ordre du quart de la milli seconde.

#### **4. Traitement des données**

Pour la phase du prétraitement, deux scénarios ont été mis en place.

Le premier consiste en l'application d'un taper suivi du filtrage passe bande, ensuite l'application d'un top et bottom mute.

Le deuxième comporte sur l'application du taper puis le filtrage F-K avec et sans biais pour les nombres d'onde (K) positifs et négatifs, ensuite le filtrage passe bande et à la fin le top mute. Le gain étant appliqué à la fin lors de l'affichage. Le tableau suivant résume les étapes des deux scénarios :

<b>Scénario 1</b>	<b>Scénario 2</b>
Taper	Taper
Filtre PB	Filtre F-K avec et sans biais (pour les K positifs et négatifs)
Top mute	Filtre PB
Bottom mute	Top mute

**Tableau 1. Les deux scénarios du prétraitement**

## **4.1. Corrections d'amplitude**

La divergence géométrique de l'onde et l'atténuation intrinsèque du milieu conduisent à une diminution rapide de l'amplitude de l'onde avec le temps de propagation. Il est nécessaire de traiter les amplitudes, afin de compenser leur atténuation. Il y'a différentes façons de le faire :

- Contrôle par l'opérateur du gain (conversion en db, . . .)
- Compensation de la divergence géométrique (multiplication par un  $t_{pow}$ , . . .), ou de l'atténuation
- Egalisation latérale (division de chaque trace par son amplitude moyenne)

## **4.2. Filtrage**

*4.2.1. Filtrage passe bande :* Du fait de sa propagation dans le sous-sol, l'onde sismique a un spectre d'amplitude limitée à une bande de fréquences qui dépend de la profondeur d'investigation et la taille des dispositifs, elle est d'autant plus large quand le dispositif est réduit et serré comme le cas de la sismique haute résolution. Il faut analyser les spectres d'amplitude correspondants aux différents signaux enregistrés, par analyse de Fourier. On détermine ainsi la bande de fréquence à l'intérieur de laquelle le rapport signal sur bruit est acceptable et le signal utile est dominant. Ainsi, toute opération sur les traces doit se faire dans cette bande, et les signaux aux autres fréquences vont être mis à zéro. Dans ce travail on a pris l'intervalle entre 0 et 200 Hz. On remarque que l'onde sonore est filtrée en prenant cet intervalle.

*4.2.2. Filtrage en pente (F-K) :* les ondes de surface ont une divergence géométrique cylindrique (et non pas sphérique), leur amplitude devient supérieure à celle des ondes de volume quand on s'éloigne de la source. Etant lentes, elles arrivent avec un certain retard mais elles peuvent interférer avec les ondes de volume réfléchies en profondeur. Donc il est judicieux d'utiliser le filtrage f-k pour les filtrer. Les vitesses des ondes de surface sont de l'ordre de 270 m/s donc leur pente

est 0.0037, on a construit un filtre f-k autour de cette pente pour les nombre d'onde positive et négative.

### **4.3. Le mute**

On peut être amené à mettre à zéro une portion des traces qui ne contient que du bruit, par exemple avant l'arrivée des premiers signaux enregistrés par chaque récepteur. La commande SU qui permet de réaliser le mute est « sumute » qui reçoit en entrée le fichier où on souhaite faire le mute. On a pointé sur des données bruts afin d'établir deux fichier « txt » qui contiennent les valeurs des positions (xmute) et les temps (tmute) qu'on a pointé, ces valeurs définissent une sorte de « ligne ou limite » au-dessus de laquelle on a mis les traces à zéro c'est le **top mute**, ou en-dessous c'est le **bottom mute**. On a pris des points de tir vers les offsets négatifs, au milieu et vers les offsets positifs afin d'établir un fichier xmute-tmute valable pour tout le profil. Pour éviter des artefacts de traitement, on a réalisé le "mute" de façon progressive plutôt que brutale, en utilisant des zones tampons ("taper").

### **4.4. Corrections statiques**

En sismique terrestre les points d'émission et de réception sont situés à des cotes qui sont fonction de la topographie. Egalement, la couche superficielle dite zone altérée (Weathering zone ou WZ) est constituée d'une couche généralement lente, peu propice à la propagation sismique, qui introduira donc des retards et des déformations de l'ondelette et sera de basse fréquence. La collection points milieux communs avant correction statique fera apparaitre une fluctuation des temps d'arrivées des signaux. On choisira donc un niveau de référence (Datum Plane ou DP) auquel on ramènera tous les points d'émission et de réception de l'ensemble de l'étude. Ensuite on remplira fictivement la zone de terrains lents (WZ) située en-dessous du DP par un terrain dont la vitesse sera égale à celle du substratum.

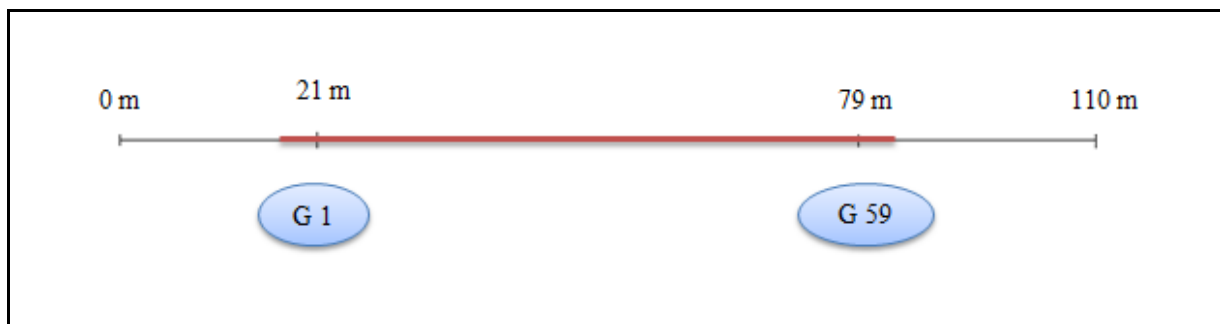
Vu la topographie de la zone étudiée, les corrections statiques s'avèrent très nécessaires. On a choisi comme datum une ligne imaginaire qui a comme coordonnées la position et l'altitude de la première source.

4.4.1. *Le pointé* : c'est une étape délicate et très importante, où on va procéder aux pointés des arrivées de l'onde directe ainsi de l'onde réfractée pour déterminer  $V_0$ ,  $V_1$  et la profondeur de la zone altérée. Ceci est réalisé avec la commande SU « Suxpicker » qui permet de faire le pointé en créant un fichier contenant les temps et les positions correspondants.

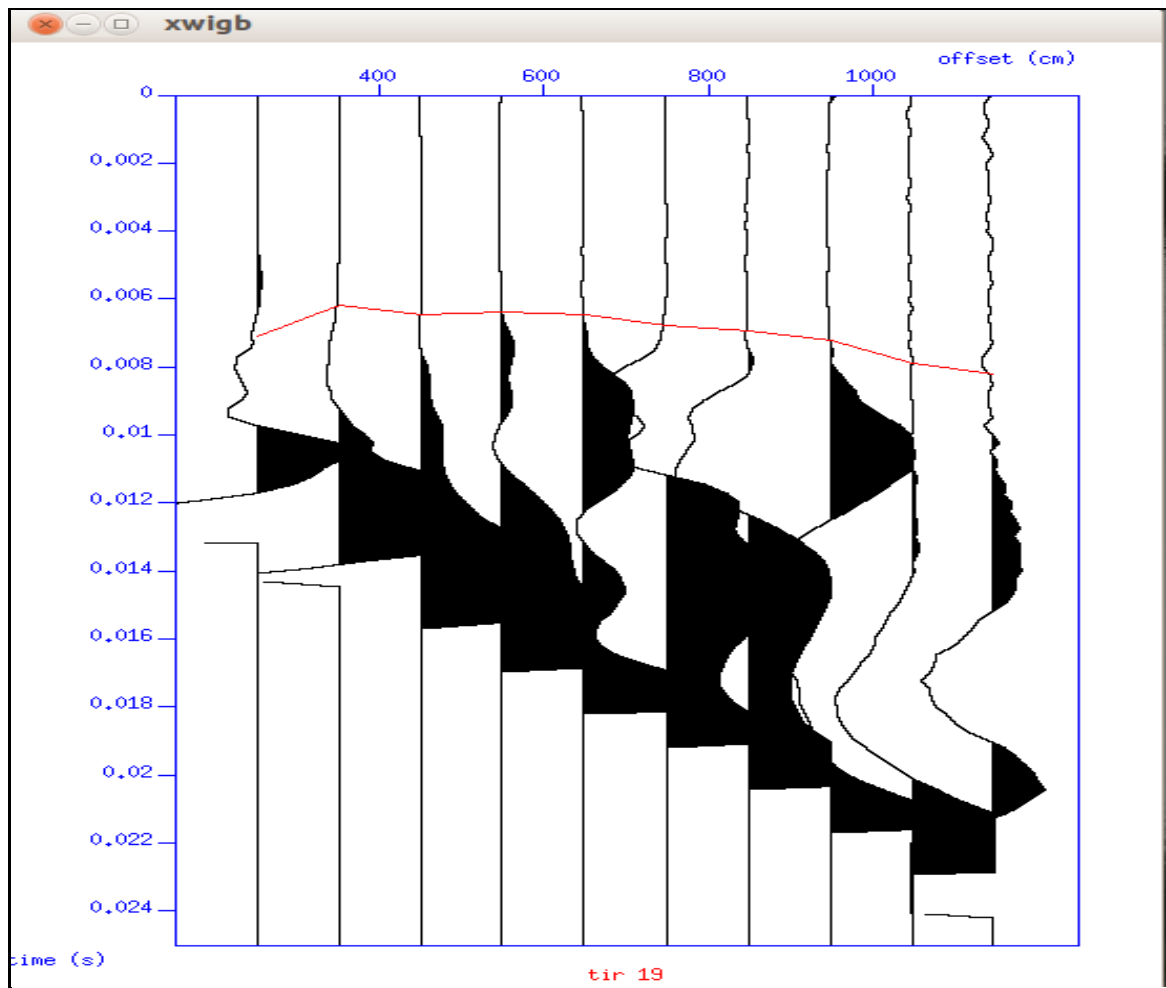
On a défini 6 zones à pointer qui font chacune 10 m, pour avoir pour chaque tir son tir inverse. On a décalé les tirs de 2.5 m de part et d'autre pour couvrir toute la zone où se trouvent les récepteurs. A la fin, les 6 paquets à pointer sont :

<b>N° paquet</b>	<b>N° point de tir</b>	<b>N° géophones</b>
1	19 - 33	1 - 10
2	29 - 43	11 - 20
3	39 - 53	21 - 30
4	49 - 63	31 - 40
5	59 - 73	41 - 50
6	69 - 82	51 - 59

**Tableau 2. Zones définies pour faire le pointé**



**Figure 4. Schéma des zones du pointé**



**Figure 5. Pointé des arrivées première avec suxpicker sur le tir 19**

#### 4.4.2. Pour $-1.5 \leq x \leq +1.5 \text{ m}$ :

On va pointer les ondes directes pour calculer  $V_0$ . On obtiendra deux valeurs de  $V_0$  par zone et on fera la moyenne, sauf pour la zone 1 et 6 il y'aura une seule valeur de  $V_0$ . On va tracer les courbes du temps de la directe en fonction de la valeur absolue de l'offset, ainsi que les droites de régression pour chaque courbe. Puis en appliquant la méthode des moindres carrés on obtient  $V_0$ .

- Méthode des moindres carrés :

L'équation de la droite de régression est :  $\hat{y} = a x + b$

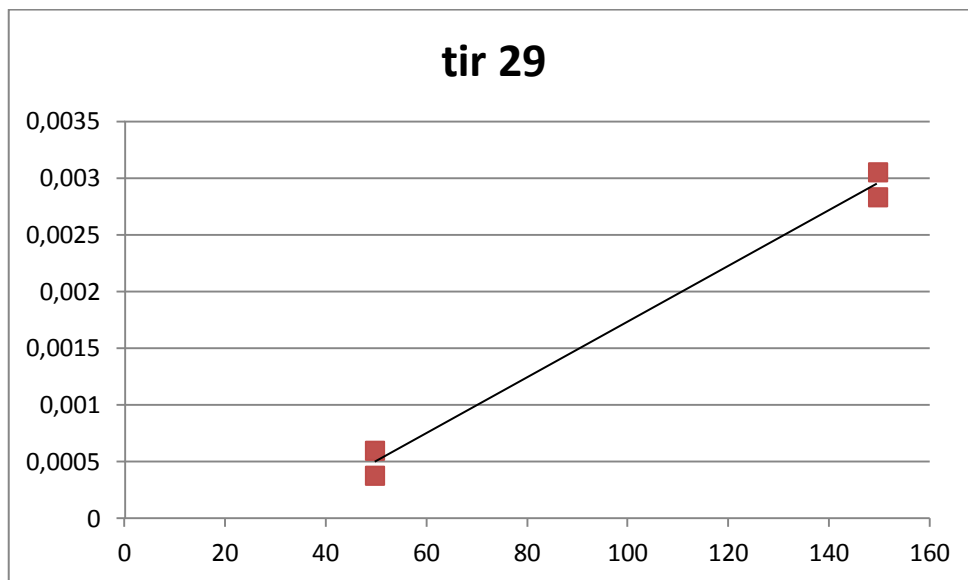
On considère l'onde directe qui passe par l'origine donc  $b = 0$ , et  $a = \frac{1}{V_0}$

Les valeurs pointées obtenues sont  $(x_i, y_i)$ , et pour trouver la bonne valeur de la vitesse il faut que  $\sum_{i=1}^N (y^{\wedge} - y_i)^2$  soit minimale c'est-à-dire la dérivée nulle (figure6). Donc :  $\frac{\partial}{\partial a} (\sum_{i=1}^N (y^{\wedge} - y_i)^2) = \frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=1}^N (a x_i - y_i)^2$

$$\frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=1}^N (a x_i - y_i)^2 = \sum_{i=1}^N 2 x_i * (a x_i - y_i) = 2 \sum_{i=1}^N (a x_i^2 - x_i y_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^N a x_i^2 = \sum_{i=1}^N x_i y_i \quad \text{donc:} \quad a = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2}$$

D'où :  $V_0 = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{\sum_{i=1}^N x_i t_i}$



**Figure 6. Représentation des temps de la directe en fonction de la valeur absolue de l'offset pour le tir 59**

Les vitesses ainsi obtenues sont représentées dans le tableau suivant :

Zone	$V_0$	Zone	$V_0$	$V_0$ moyen
1	667,556742	4	735,914683	656,086376
2	848,445596	5	438,54946	
3	752,273384	6	493,778392	

#### 4.4.3. Pour $2.5 \leq x \leq 11.5 \text{ m}$ :

On va pointer les ondes réfractées pour calculer  $V_1$  (figure 7 et 8). Pour la même position du géophone, on mesure  $t_{S1R}$  et  $t_{S2R}$  avec :

$$t_{S1R} = \tau_{S1} + \tau_R + \frac{S_1 R}{V_1} \quad \text{et} \quad t_{S2R} = \tau_{S2} + \tau_R + \frac{S_2 R}{V_1}$$

En utilisant la méthode des plus on peut calculer le délai du récepteur :

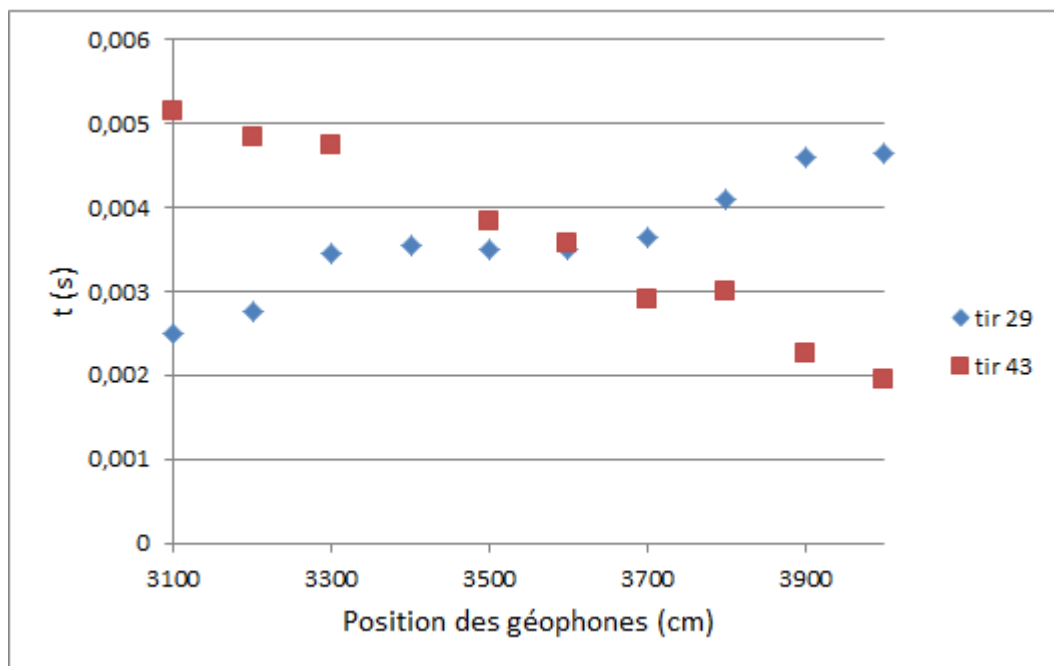
$$t_{S1R} + t_{S2R} = \tau_{S1} + \tau_{S2} + 2\tau_R + \frac{S_1 R + S_2 R}{V_1} = t_{S1S2} + 2\tau_R$$

$$\text{Donc : } \tau_R = \frac{t_{S1R} + t_{S2R} - t_{S1S2}}{2}$$

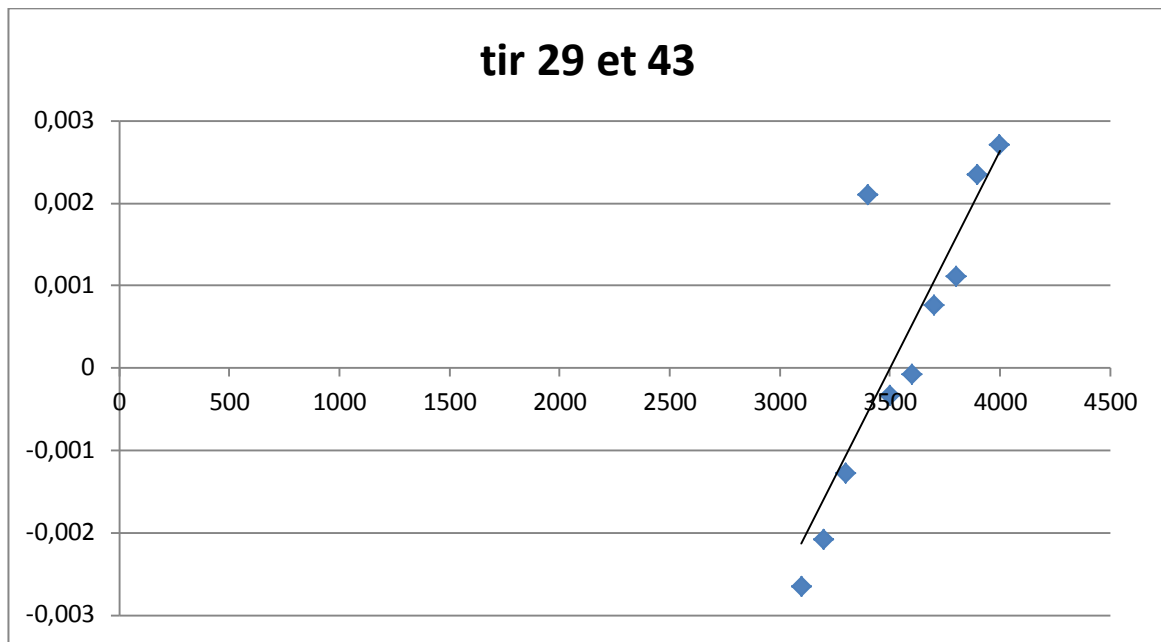
En utilisant la méthode des moins on peut calculer  $V_1$

$$t_{S1R} - t_{S2R} = \tau_{S1} - \tau_{S2} + \frac{S_1 R - S_2 R}{V_1} = \tau_{S1} - \tau_{S2} + \frac{S_1 S_2}{V_1} + \frac{2 S_1 R}{V_1}$$

Après avoir fait tout ce travail pour toutes les zones, on a obtenu une valeur moyenne de  $V_1$  de l'ordre de 2300 m/s (les vitesses étant variable de 1000m/s jusqu'à 4300 m/s), et une valeur moyenne de l'épaisseur de la zone altérée de l'ordre de 1.38 m. Les statiques variaient entre 0.03 ms jusqu'à 2 ms (voir annexe : figure C).

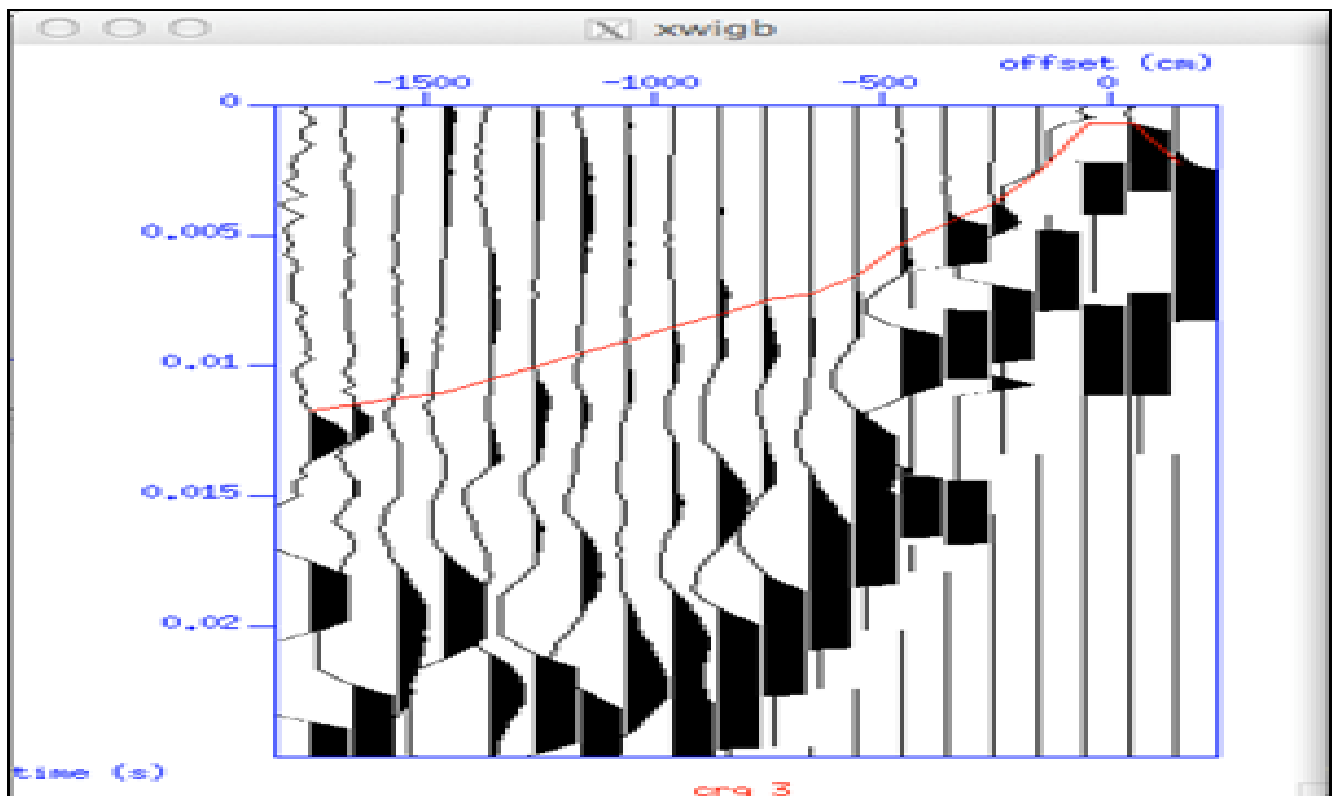


**Figure 7. Représentation des positions des géophones en fonction du temps  $t_{S1R}$  et  $t_{S2R}$**



**Figure 8. Représentation des positions des géophones en fonction de  $t_{S1R} - t_{S2R}$**

En ce qui concerne la statique source, on a pointé deux collections Common Receiver Gather (CRG), il s'agit du CRG 3 et CRG 57



**Figure 9. Pointé CRG 3 avec suxpicker**

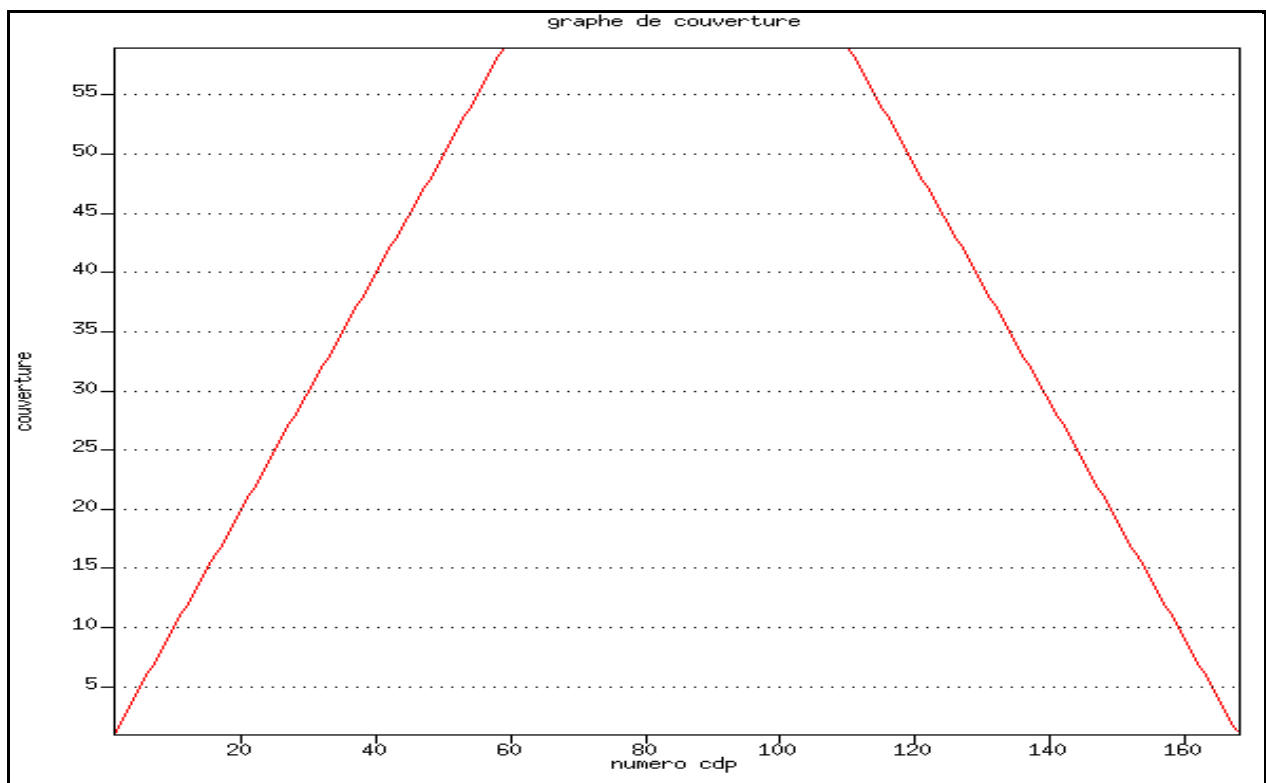


Une des applications du CRG en sismique réfraction est la reconstitution du tir inverse.

La phase essentielle sera ensuite la déconvolution qui a pour objectif de ramener l'ondelette à une pseudo-impulsion.

#### **4.5. Analyse de vitesses et stack**

La couverture nominale est égale à 60 traces entre cdp 50 et 110 (figure 10).



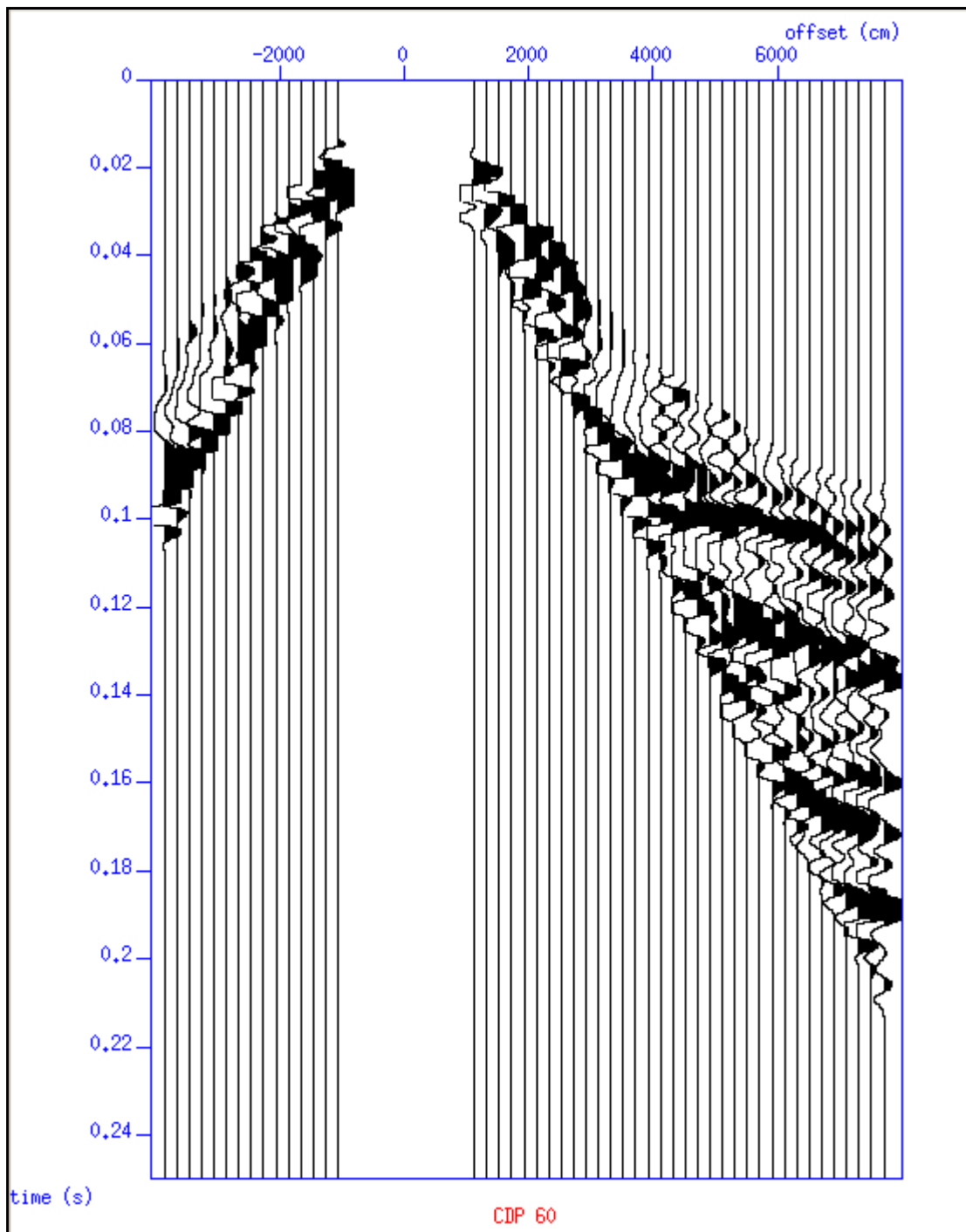
**Figure 10. Graphe de couverture**

Pour faire une analyse de vitesses, on a pris des cdp qui appartiennent à l'intervalle où la couverture est maximale et on a varié la vitesse de 300 m/s jusqu'à 1800 m/s avec un pas de 10 m/s. Pour le cdp 60 par exemple, avec le résultat du deuxième scénario on voit mieux apparaître les événements superficiels pour des offsets entre 10 et 40 m par rapport aux événements plus profonds qu'on arrive à distinguer le bout des hyperboles (figure 11).

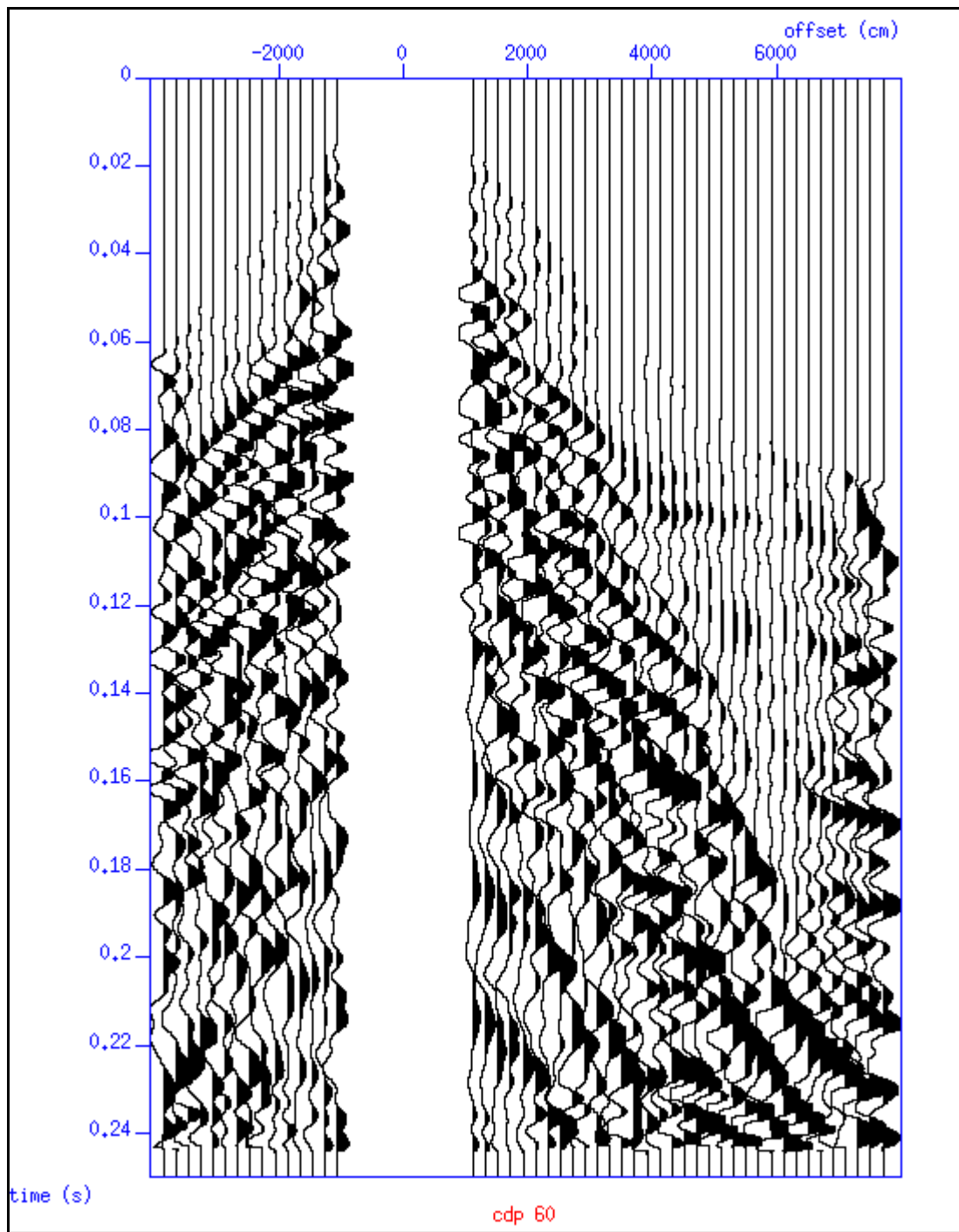
Contrairement au premier scénario, on voit apparaître les hyperboles des évènements profonds à partir de l'offset 40 m (figure 12). Donc on va utiliser les deux scénarios pour produire l'image finale, en combinant les données du deuxième scénario pour les offsets entre 10 et 40 m, et les données du premier scénario pour les offsets entre 40 et 80 m.

On a effectué une opération de NMO (Normal Move Out), qui consiste à ramener à l'horizontal des évènements hyperboliques pour corriger le délai introduit par l'offset sur le temps de trajet de l'onde réfléchie afin d'estimer le profil vertical de vitesse dans le milieu. Ainsi, pour établir la section finale, on a utilisé une vitesse NMO égale à 500 m/s pour le deuxième scénario, et 1100 m/s pour le premier scénario.

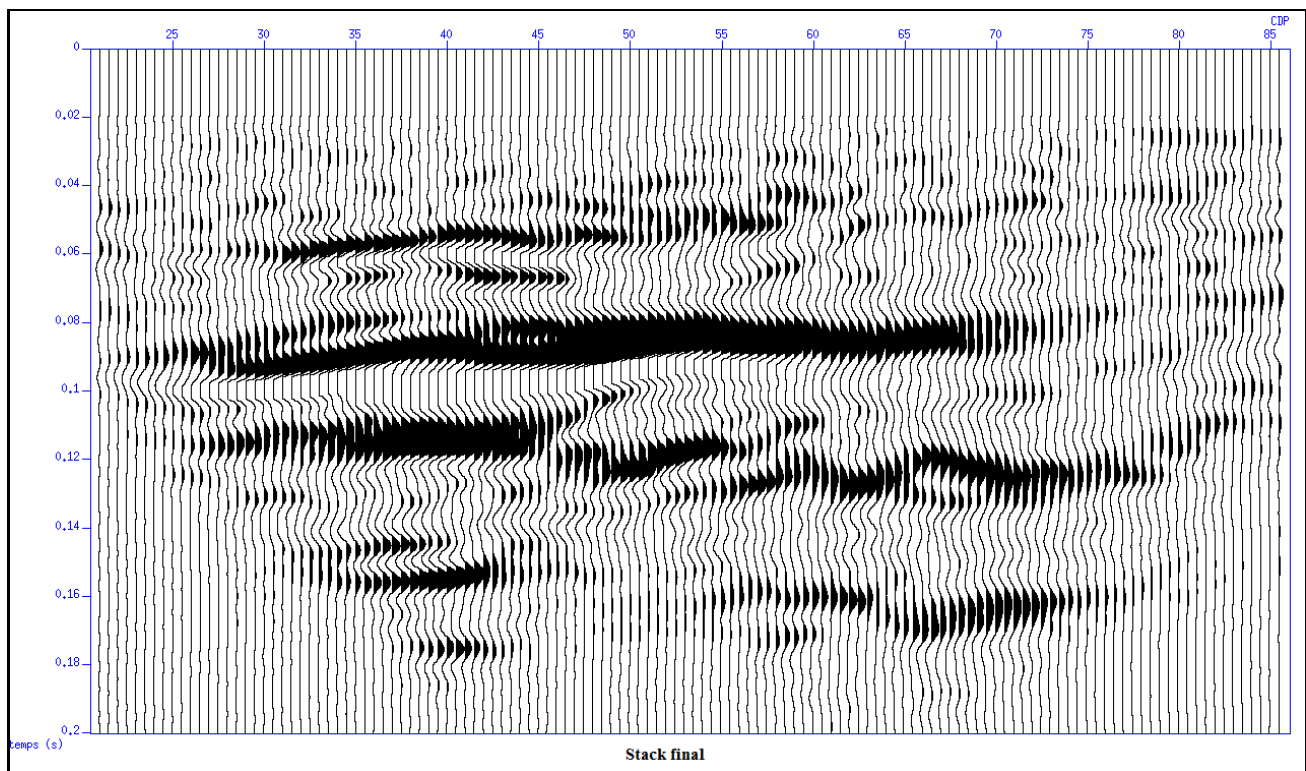
Enfin, la section finale est obtenue par une combinaison de stack issu des données du deuxième scénario pour les offsets de 10 à 40 m (voir annexe figure D) et le stack résultant des données du premier scénario pour les offsets allant de 40 à 80 m (voir annexe figure E). Le résultat est présenté dans la figure 13 en xwigb et la figure 14 en ximage.



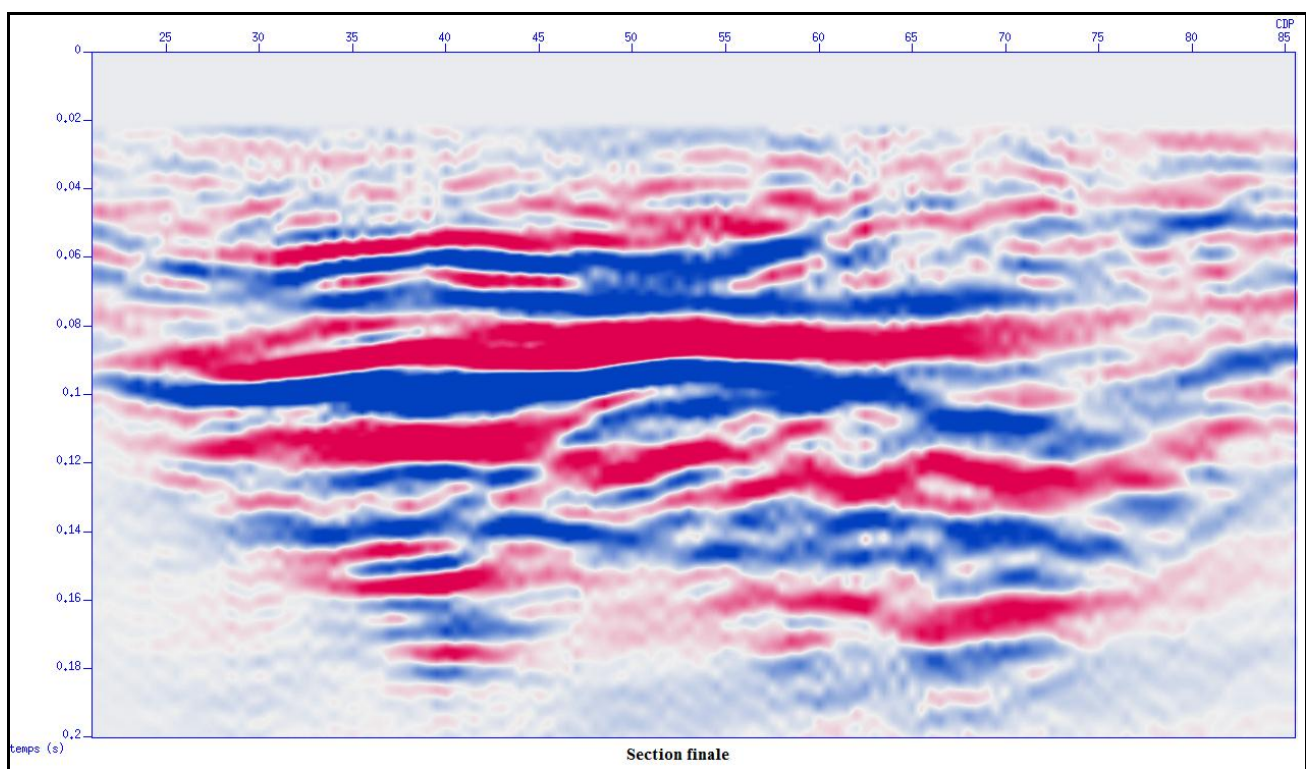
**Figure 11. CDP 60 avec scénario 1**



**Figure 12. CDP 60 avec scénario 2**



**Figure 13. Section finale affichée en xwig**



**Figure 14. Section finale affichée en ximage**

## 5. Conclusion

Dans ce travail on a traité les données de la première ligne sismique qui est dans la direction N-S. On a procédé dans la phase du prétraitement par deux scénarios, le premier qui consistait en l'application d'un top et bottom mute ce qui induit à une perte d'information et donc à une inexactitude et perte de résolution dans l'image finale. En second scénario, on a réalisé que le top mute et on n'a pas mis à zéro les réflexions venant des couches plus profondes. Le bottom mute est substitué par un filtrage f-k pour nettoyer le signal des ondes de surfaces et récupérer le maximum d'informations (les hyperboles de réflexion).

Ensuite on est passé aux corrections statiques des sources et des géophones ainsi que les statiques d'élévation. Les valeurs des statiques chargées dans les headers des traces sont négatives, donc il y'a une diminution de temps qui va induire un décalage vers le haut de toutes les traces. L'application des statiques était réalisée à la fin du traitement juste avant le stack.

Enfin, pour faire le stack final, on a combiné deux stack. Pour les offsets entre 10 et 40 m on a utilisé les résultats du deuxième scénario, et pour les offsets entre 40 et 80 m on a utilisé ceux du premier scénario.

Sur la section finale on voit un réflecteur caractérisé par de fortes amplitudes, situé vers 50 m de profondeur, ce qui coïncide avec les données de diagraphies enregistrées dans la zone.

La méthode de sismique haute résolution est une méthode appropriée pour l'étude des glissements de terrain sur des couches ductiles. Celle-ci nous a permis d'imager l'interface évaporites-substratum sur tous le profil. Pour pouvoir faire une interprétation complète il est recommandé faire le traitement des données du deuxième profil sismique acquis dans la direction de la pente et combiner les deux résultats.

## Références

- [1] Hervé PERROUD, *Géophysique Pétrolière*, Université de Pau et des Pays de l'Adour, **2013**
- [2] Georges HENRY, *Géophysique des bassins sédimentaires*, éditions Technip, **1994**
- [3] Florence RENALIER, *Caractérisation sismique de sites hétérogènes à partir de méthodes actives et passives : variations latérales et temporelles*, Observatoire de Grenoble laboratoire de Géophysique interne et tectonophysique, **Mars 2010**
- [4] O.SANCHEZ, JC.GOURRY, A.BITRI, G.GRANDJEAN, *Imagerie géophysique d'un glissement de terrain alpin*, 6<sup>ème</sup> colloque GEOFCAN, Bondy, France, le **25-26/09/2007**
- [5] Clément HIBERT, *Imagerie géophysique combinée pour la caractérisation des glissements de terrain : Application aux « terres noires » des Alpes de Haute Provence*, **2008**
- [6] Lucile TATARD, *Caractérisation et suivi du glissement de terrain de Saint Guillaume (Isère) par méthodes géophysiques*, **2006**
- [7] Florent BRENGUIER, *Imagerie sismique de haute résolution pour la prévention des risques volcanique et sismique*, Observatoire de Grenoble laboratoire de géophysique interne et tectonophysique, **2006**
- [8] Alice TONNELIER, *Ecoute sismique des glissements de terrain dans les roches argilo-marneuses : détection et identification des sources intervenant dans la progression des glissements*, Université de Strasbourg et le cnrs, **2012**
- [9] Etienne ROBEIN, *Vitesses et techniques d'imagerie en sismique réflexion: principes et méthodes*, éditions TEC & DOC, **1999**

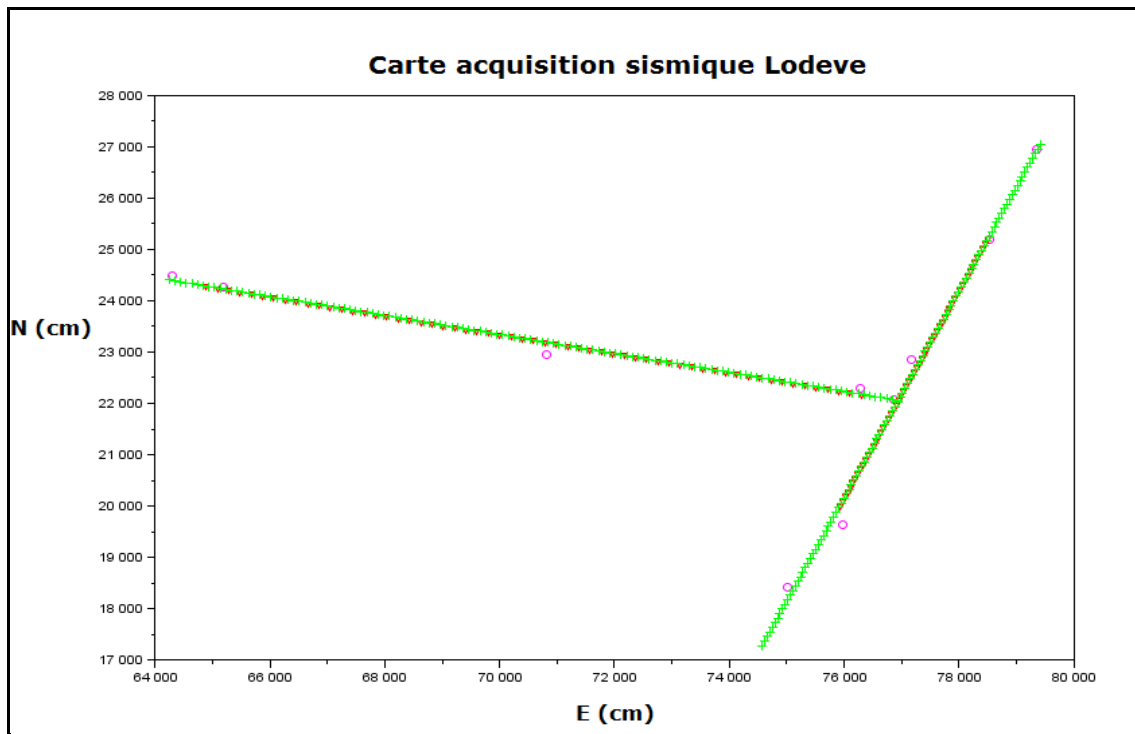
[10] Richard D.MILLER and Jianghai XIA, *High resolution seismic reflection investigation of a subsidence feature on u.s. highway 50 near hutchinson, Kansas*, Kansas Geological Survey

[11] J.BULAT and D.LONG, *Use of 3D Seismic data as a substitute for high-resolution seismic survey for site investigation*, British Geological Survey for Health and Safety Executive, **2006**

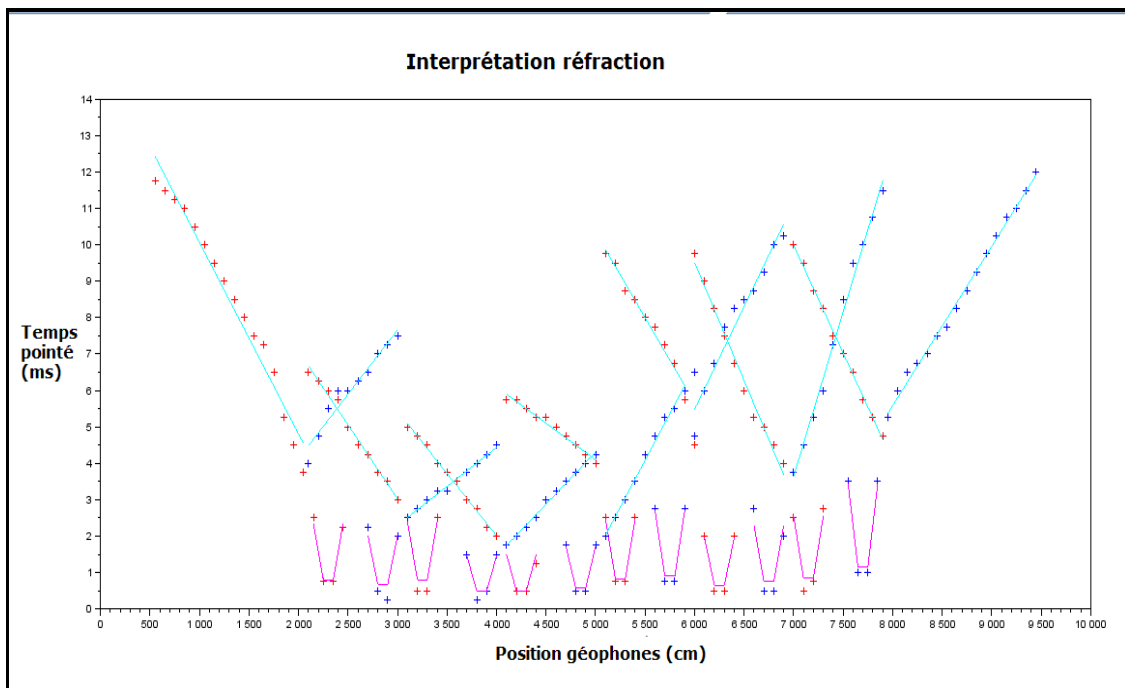
[12] G.AKIS TSELENTIS and Paraskevas PARASKEVOPOULOS, *Application of a high-resolution seismic investigation in a Greek coal mine*, **2002**



## Annexe



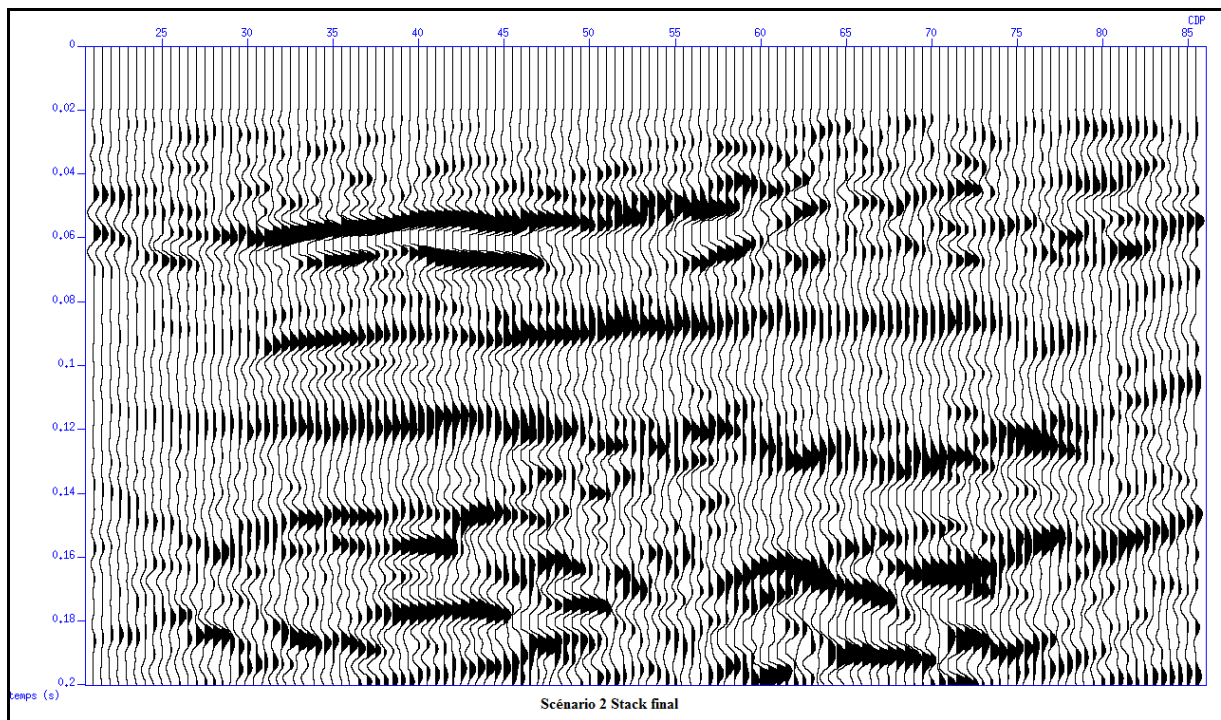
**Figure A. Carte d'acquisition des deux profils sismiques : vert les sources et rouge les géophones**



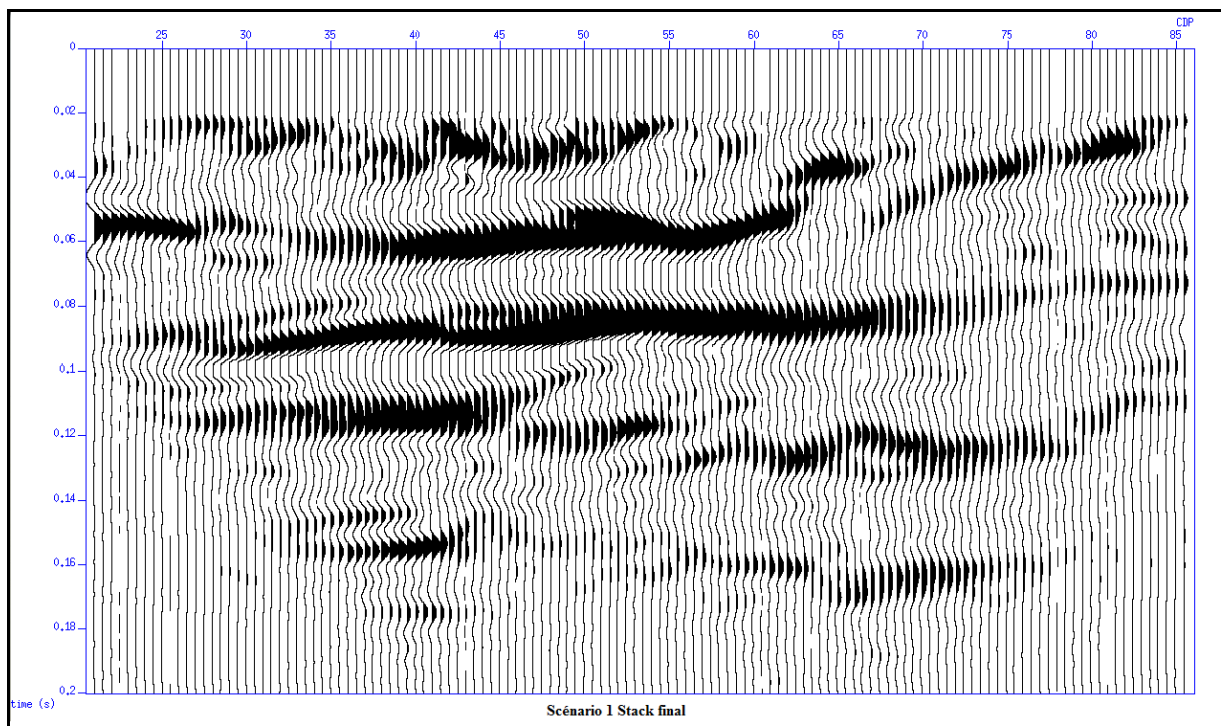
**Figure B. Pointé des ondes directes en violet et les réfractées en bleu**



**Figure C. Statique et modèle de la WZ**



**Figure D. Stack final du deuxième scénario**



**Figure E. Stack final du premier scénario**

## **Remerciements**

Je tiens à témoigner ma profonde gratitude et présenter mes sincères remerciements à mon professeur M. Hervé PERROUD pour son encadrement et sa disponibilité et pour toutes les remarques apportées à ce travail et qui ont toujours été judicieuses et constructives.

Mes remerciements les plus vifs vont en faveur de M. Daniel BRITO pour sa bienveillance et ses conseils.

Enfin, que tous ceux qui m'ont aidé, encouragé et soutenu, trouvent ici le témoignage d'une reconnaissance inouïe.