

Calage de la sismique de surface

J.-L. Mari, P. Meynier

4.1 Introduction

Classiquement, la sismique de surface fournit des images en temps du sous-sol en 2 dimensions (2D) et en 3 dimensions (3D). Les mesures de puits de type diagraphies sont des données qui sont obtenues en fonction de la profondeur. La sismique de puits de type PSV fournit à la fois des images en temps (sections PSV) comparables à celles obtenues par la sismique de surface et des logs (vitesse par exemple) en profondeur comparables à ceux obtenus par les mesures diagraphiques (diagraphie acoustique par exemple). La comparaison des mesures de puits (diagraphies acoustiques) en profondeur et des mesures sismiques en temps nécessite la conversion en temps ou en profondeur de l'un des deux jeux de données.

Ce chapitre de l'ouvrage *Sismique en forage et diagraphies acoustiques* est publié en Open Access sous licence creative commons CC-BY-NC-ND permettant l'utilisation non commerciale, la distribution, la reproduction du texte, sur n'importe quel support, à condition de citer la source.

© EDP Sciences, 2018

DOI: 10.1051/978-2-7598-2262-1.c006

L'acoustique est le lien le plus naturel entre la discipline géophysique et la discipline diagraphique. Bien que travaillant dans des bandes de fréquences très différentes (quelques dizaines de kHz pour la diagraphie acoustique, quelques dizaines à quelques centaines de Hz pour la sismique très haute résolution (THR)), la diagraphie acoustique et la sismique sont régies par les mêmes lois de propagation des ondes.

Ce chapitre montre :

- le principe de conversion profondeur de la sismique de surface à l'aide des données PSV (Profil sismique vertical, chapitre 2) ;
- l'influence de la cimentation sur les mesures acoustiques ;
- le principe de calibration des mesures de vitesse des formations fournies par la diagraphie acoustique avec celles fournies par le PSV ;
- le principe de conversion temps des données acoustiques (diagraphie acoustique, chapitre 3) et le calcul des sismogrammes synthétiques.

Les données utilisées dans ce chapitre sont des données de proche surface, comprenant une sismique 3D THR, un profil sismique vertical et une diagraphie acoustique en champ total.

4.2 Sismique 3D THR et PSV

Le dispositif d'acquisition est composé d'un dispositif de réception et d'un dispositif d'émission. Le dispositif de réception, fixe durant l'acquisition, est composé de lignes parallèles de 24 géophones distants de 2 m. La distance entre les 2 lignes de géophones est de 4 m. Le dispositif est composé de 11 lignes de tirs, orientées perpendiculairement aux lignes de géophones (direction dite in-line) avec 11 positions de tir par ligne. La distance entre 2 tirs sur une ligne est de 2 m. La distance entre 2 lignes de tirs est de 4 m. La direction des lignes de tirs est dite cross-line. Il n'y a pas superposition entre les dispositifs d'émission et de réception. La distance entre les deux dispositifs est de 4 m. La source utilisée est une chute de poids (chapitre 2, figure 2.5).

Le traitement des données sismiques a conduit à l'obtention d'un bloc 3D de 13 sections in-line distantes de 1 m (Mari et Herold, 2015). Chaque section est composée de 44 points miroir distants de 1 m. La durée d'écoute a été limitée à 250 ms, le pas d'échantillonnage en temps est de 0,5 ms. La figure 4.1 montre le dispositif d'acquisition sismique (à gauche) et un exemple de sections sismiques in-line et cross-line issues du bloc 3D (à droite). Les deux sections présentées (section n° 6 dans la direction in-line, et section n° 23 dans la direction cross-line) se croisent au milieu du bloc 3D. Elles ont été filtrées dans la bande passante 15-150 Hz, qui fournit un excellent rapport signal sur bruit. Le point miroir localisé à l'intersection des sections sismiques in-line n° 3 et cross-line n° 6 est situé à une vingtaine de mètres d'un forage, dans lequel un PSV a été enregistré.

Les données PSV sont utilisées pour caler la sismique de surface. Le PSV est un PSV de proche surface enregistré dans un puits vertical, tubé acier.

L'acquisition et la séquence de traitement ont été décrites au chapitre 2 et les résultats de traitement présentés en figures 2.11 et 2.12. Nous rappelons que la profondeur du capteur varie entre 25 et 85 m, la source de surface étant faiblement déportée (5 m) par rapport à la tête de puits. La distance entre deux positions successives du géophone dans le puits est de 5 m.

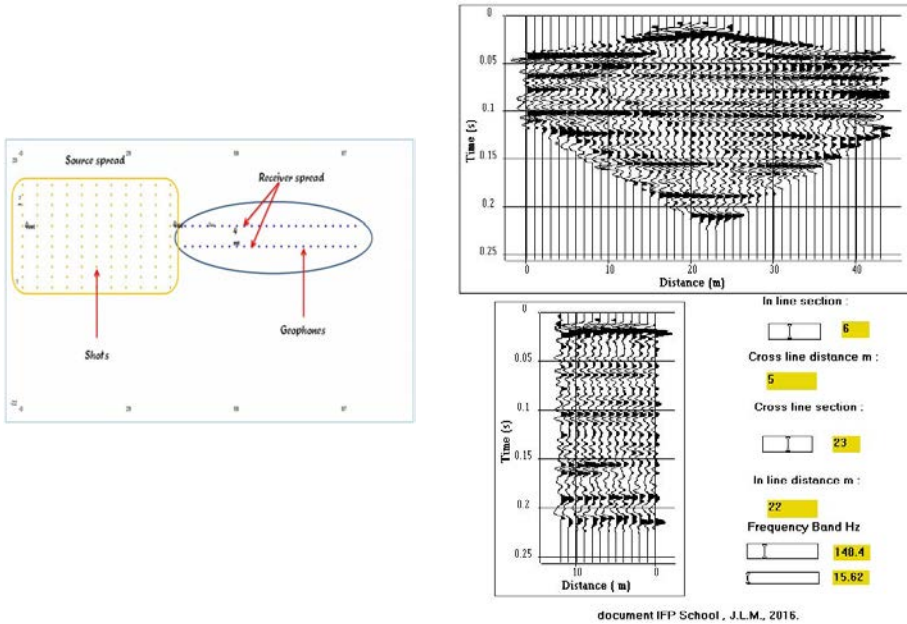


Figure 4.1 Sismique 3D. À gauche : dispositif d'acquisition. À droite : sections en temps.

La figure 4.2 montre successivement :

- en haut à gauche : l'enregistrement de PSV non traité ;
- en haut à droite : la relation temps vertical - profondeur et la loi vitesse d'intervalle au pas d'échantillonnage sismique en profondeur, soit 5 m ;
- en bas à gauche : le couloir de sommation de la section PSV et la trace somme PSV ;
- en bas à droite : le calage de la section sismique sur la trace somme PSV à l'intersection des sections sismiques in-line n° 3 et cross-line n° 6.

La trace somme PSV, dupliquée cinq fois, est insérée dans la section in-line n° 3 à la position miroir associée à la section cross-line n° 6. Le coefficient de corrélation entre trace sismique et trace somme PSV au point d'intersection est supérieur à 0,72, montrant ainsi un bon calage des horizons sismiques en temps. Cependant on peut noter des faibles différences entre les amplitudes observées sur la sismique de surface et sur la trace somme PSV. Cette différence est imputable au choix des lois de compensation d'amplitude utilisées pour les deux jeux de données. Pour la sismique de surface, une loi de gain de type AGC sur une fenêtre courte (30 ms)

a été utilisée pour bien mettre en évidence les réflecteurs proches de la surface, ce traitement ayant pour effet d'augmenter l'amplitude des réflecteurs.

On peut noter que le PSV permet un calage de la sismique de surface dans l'intervalle des profondeurs (25-85 m) où les mesures ont été faites, mais également sous le puits. La trace somme PSV met bien en évidence des réflecteurs qui apparaissent à des temps (doubles) supérieurs à 80 ms et qui sont sous le puits. On peut voir des réflecteurs sismiques au-delà de 100 ms.

Cet exemple illustre le rôle prédictif du PSV : prédiction sous le puits.

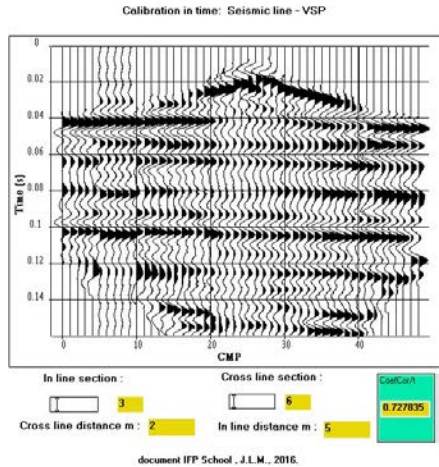
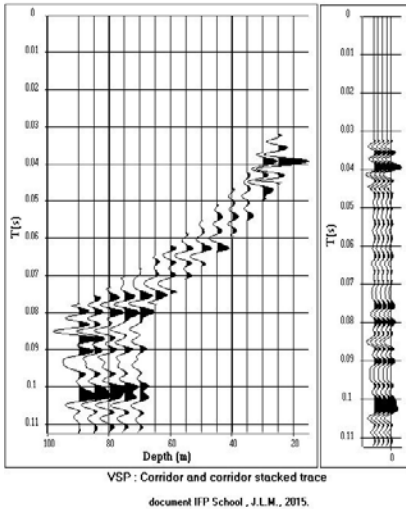
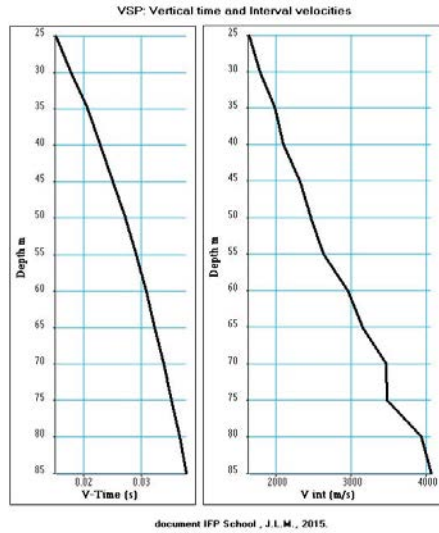
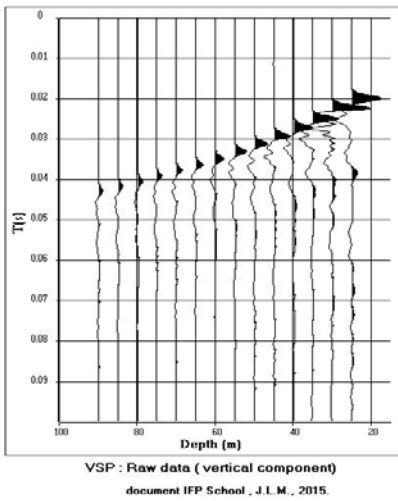


Figure 4.2 Calage d'une section sismique à l'aide d'un PSV.

La loi temps - profondeur $T = f(Z)$ peut être utilisée pour convertir les sections sismiques temps en sections sismiques profondeur. La procédure peut être résumée ainsi :

- les temps T mesurés sur le PSV doivent être transformés en temps verticaux doubles Twt en fonction de la profondeur Z : $Twt = f(Z)$;
- la loi $Twt = f(Z)$ doit être inversée $Z = f^{-1}(Twt)$;
- la loi $Z = f^{-1}(Twt)$ doit être mise à pas régulier en profondeur Δz : $Z = f^{-1}(Twt, \Delta z)$. Le pas Δz doit être choisi pour éviter tout phénomène d'aliasing entre le passage temps et le passage profondeur ;
- la conversion se fera par translation verticale entre une position temps Twt et une position profondeur Z . Les horizons ne seront pas déplacés latéralement sur les sections. En conséquence, s'il y a des pendages, les sections temps doivent être migrées temps avant conversion profondeur.

La figure 4.3 montre la conversion profondeur des sections temps des figures 4.1 et 4.2.

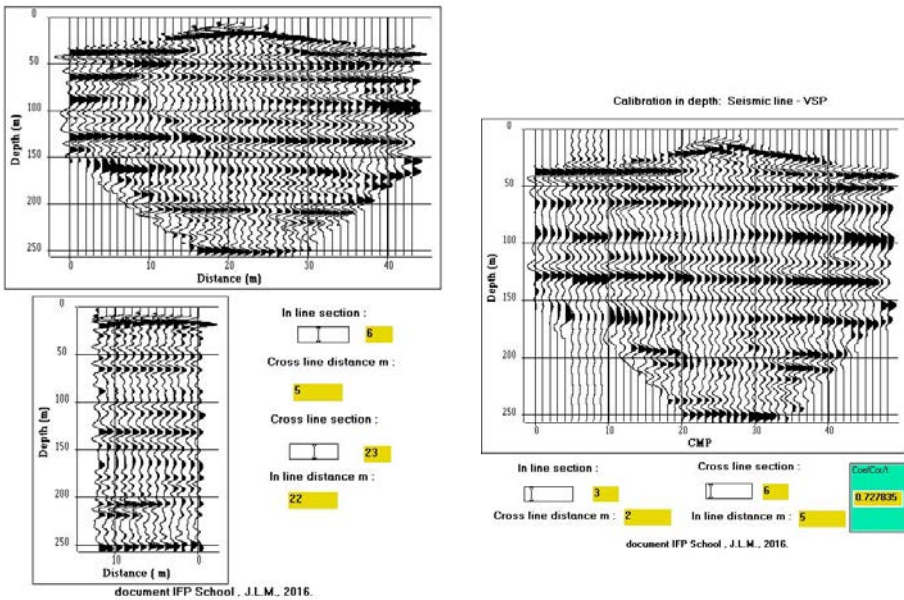


Figure 4.3 Sismique 3D en profondeur.

On peut voir des réflecteurs jusqu'à 250 m de profondeur. La figure 4.3 droite montre le calage en profondeur par la trace somme PSV de la section sismique in-line n° 3 à l'intersection de la section sismique cross-line n° 6.

4.3 Diagrapie acoustique

Une diagrapie acoustique en champ total (chapitre 3) a été enregistrée dans le forage. Le forage est tubé acier et mal cimenté. L'outil acoustique (voir chapitre 3, figure 3.1 gauche) est un outil souple, de petit diamètre (50 mm), de type monopôle, utilisé dans sa version grand espacement, distance émetteur-récepteur lointain (3 m-3,25 m). Le pas d'échantillonnage en profondeur est de 2 cm. Le pas d'échantillonnage en temps est de 5 μ s et la durée d'écoute de 5 ms. La figure 4.4 montre les deux sections acoustiques.

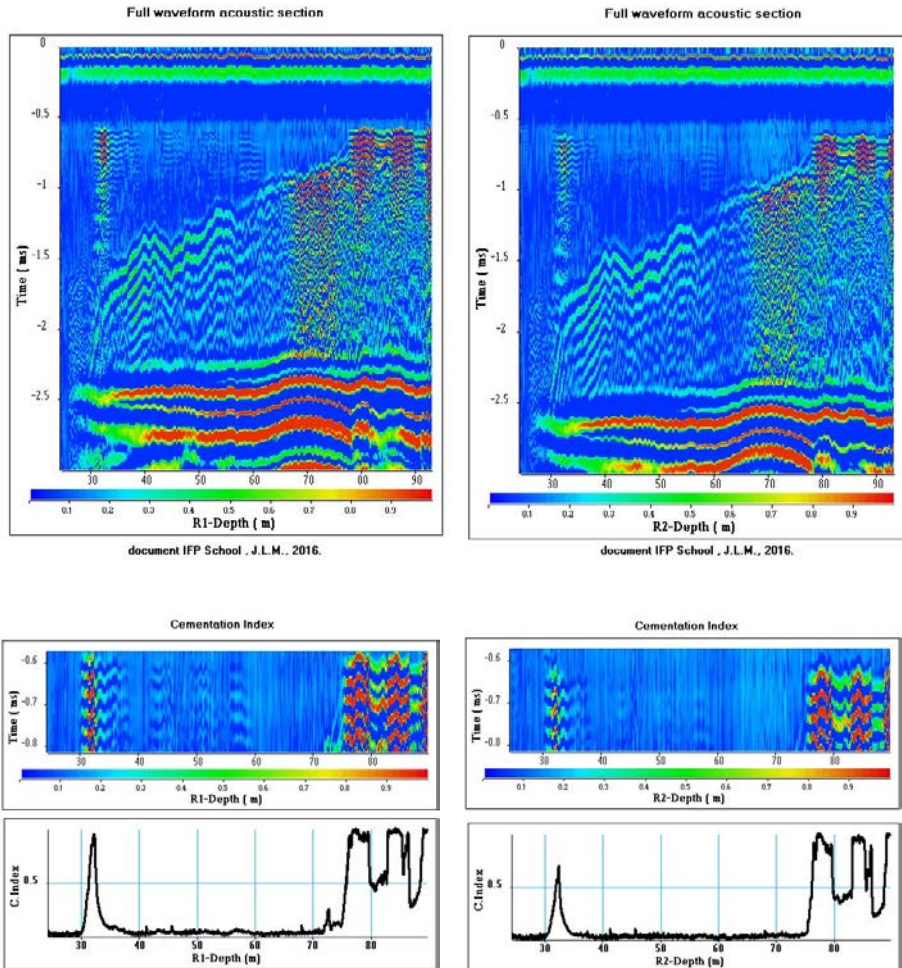


Figure 4.4 Sections acoustiques et logs de cimentation.

Les sections acoustiques montrent :

- Les signaux de synchronisation dans l'intervalle temps 0-0,5 ms. Ces signaux de nature électronique n'ont aucun sens géologique.
- Localement en profondeur des résonances dans l'intervalle temps 0,6-0,8 ms, ces phénomènes de résonance sont liés à une mauvaise cimentation du tubage (casing) à la formation. Dans l'intervalle de profondeurs 75-90 m, les résonances interfèrent avec les signaux acoustiques qui se propagent dans la formation.
- Les ondes réfractées de formation. Les temps de première arrivée de ces ondes varient de 1,8 ms à 0,7 ms dans l'intervalle de profondeurs 30 m à 80 m. Cette variation de temps d'arrivée indique une augmentation progressive de la vitesse avec la profondeur. On constate également un changement du caractère du signal acoustique : basse fréquence dans l'intervalle 30-65 m, haute fréquence et bruité pour les profondeurs supérieures à 65 m.
- Les ondes de Stoneley. Ces ondes de paroi de forte amplitude apparaissent après 2,4 ms. Elles sont influencées par le casing.

La partie basse de la figure 4.4 montre les sections acoustiques dans l'intervalle temps 0,6-0,8 ms où on observe principalement les résonances. Le niveau de résonance peut être estimé en calculant, sur l'intervalle temps, l'énergie du signal acoustique. L'énergie normalisée du signal acoustique en fonction de la profondeur est un log acoustique qui est utilisé pour fournir un log indicateur de la qualité de cimentation, appelé ici C. index (indice de cimentation). L'indice de cimentation indique les zones de mauvaise cimentation, notamment dans l'intervalle 30-35 m et aux profondeurs supérieures à 75 m.

4.4 Les logs acoustiques

La diagraphie acoustique est principalement utilisée pour fournir les vitesses de formation, en mesurant la différence de temps d'arrivée des différents trains d'onde aux différents récepteurs de l'outil, ici R1 et R2 respectivement à 3 m et 3,25 m de la source acoustique. La figure 4.5 montre pour les ondes réfractées P les logs suivants :

- le log de vitesse P (V_p) déduit de la différence de temps Δt entre les signaux acoustiques observés sur les récepteurs R1 et R2 ;
- le log de corrélation entre les signaux acoustiques observés sur les récepteurs R1 et R2, après compensation de l'écart Δt . Une forte valeur du coefficient de corrélation indique une forte semblance entre les deux signaux et une bonne mesure de la vitesse. Dans cet exemple, le coefficient de corrélation est supérieur à 0,75 pour plus de 70 % des cotes de mesure. Il est utilisé pour éditer le log ;
- le log de vitesse P après édition ;
- le log de fréquence instantanée qui montre très nettement le changement du contenu fréquentiel du signal acoustique vers 65 m.

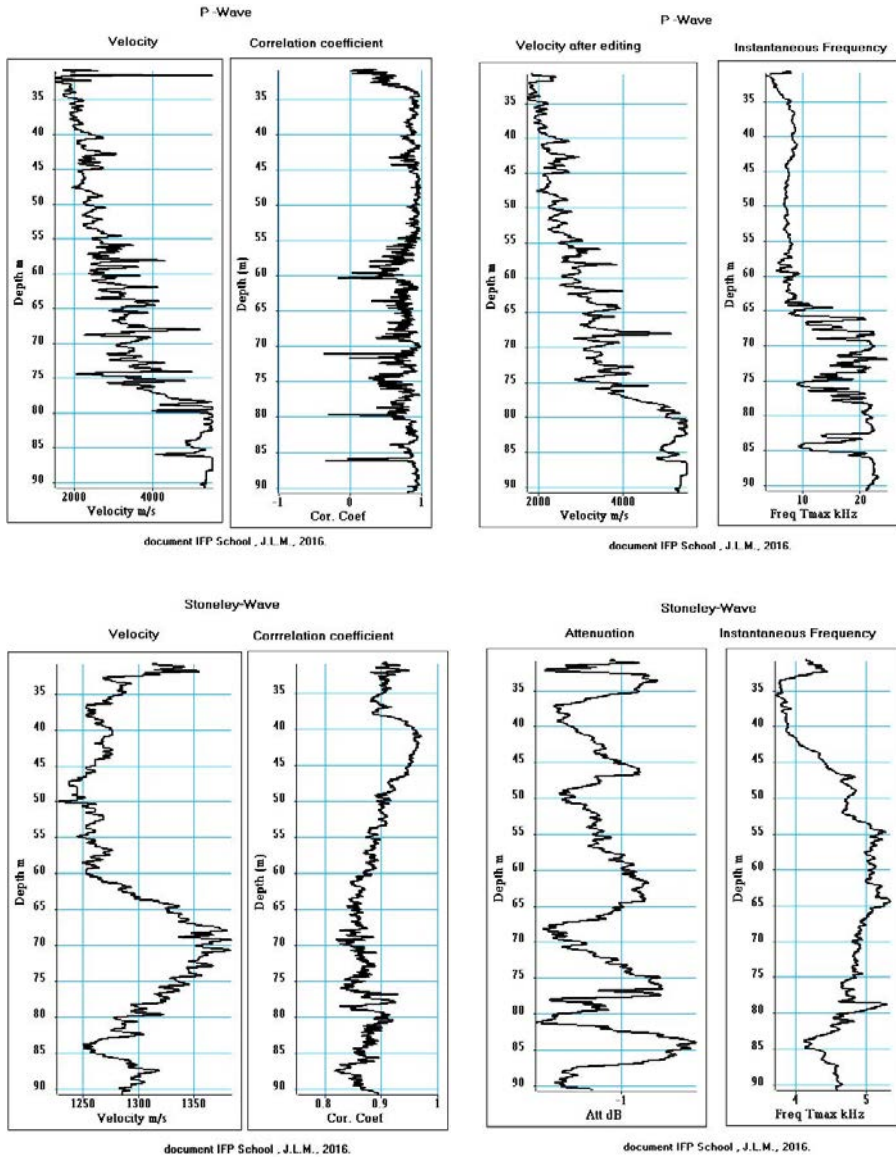


Figure 4.5 Logs acoustiques : ondes P et ondes de Stoneley.

La figure 4.5 montre en partie basse les logs acoustiques associés aux ondes de Stoneley :

- le log de vitesse et son log de coefficient de corrélation associé. Les très fortes valeurs du coefficient de corrélation ($> 0,8$) indiquent que les valeurs de vitesse mesurées sont précises ;

- le log d'atténuation qui montre que ces ondes sont peu atténuées. Ces ondes sont sensibles aux conditions de paroi et donc à la présence du casing. Il est intéressant d'utiliser les informations fournies par les ondes de Stoneley en trou ouvert pour caractériser la formation géologique et notamment détecter la présence de fractures ;
- le log de fréquence. Ces ondes sont dispersives et basse fréquence (entre 4 et 5 kHz).

4.5 Conversion en temps des logs acoustiques et calcul du séismogramme synthétique

Le log de vitesse est une mesure faite en fonction de la profondeur, échantillonnée à pas régulier (ici 2 cm). Il peut être utilisé pour obtenir une loi temps profondeur par intégration du temps de parcours acoustique en fonction de la profondeur. À une profondeur donnée, le temps de parcours acoustique est égal au pas d'échantillonnage en profondeur divisé par la vitesse de la formation. L'intégration des temps de parcours acoustiques fournit le temps intégré classiquement appelé temps sonique intégré (ITT(Z) : *Integrated Transit Time*). Si le forage est vertical, le temps sonique intégré peut être comparé au temps vertical fourni par le PSV.

Le temps intégré $ITT(Z) = f(Z)$ peut être utilisé pour convertir les logs diagraphiques profondeur en logs diagraphiques temps et introduire ces logs sur les sections sismiques en temps. Pour cela, ITT(Z) doit être mis en temps double. La conversion profondeur-temps du log se fera par translation verticale entre une position profondeur Z et une position temps ITT(Z) avec un pas régulier en temps Δt : $ITT(Z) = f(Z, \Delta t)$. Le pas Δt doit être choisi pour éviter tout phénomène d'aliasing entre le passage profondeur et le passage temps. Δt doit être choisi comme un sous multiple du pas d'échantillonnage sismique, pour faire le changement d'échelle entre les mesures diagraphiques et les mesures sismiques.

La figure 4.6 (a et b) montre la conversion en temps des logs de vitesse et de cimentation mesurés en profondeur. Le log de vitesse a été utilisé pour calculer un log de réflectivité (figure 4.6c) qui a été filtré en fréquence et mis au pas sismique (0,5 ms).

Sur le log de réflectivité filtré, on peut constater la présence d'un réflecteur de forte amplitude vers 70 ms.

Le log de réflectivité filtré est appelé film synthétique. Il est utilisé comme la trace somme PSV pour caler les horizons sismiques observés sur les sections sismiques en temps. Le film synthétique, dupliqué cinq fois, est inséré dans la section in-line n° 3 à la position miroir associée à la section cross-line n° 6 (figure 4.6d). On constate que l'horizon à 70 ms n'est pas présent sur la section sismique et qu'il n'existe pas sur la trace somme PSV (voir figure 4.2). À 70 ms, le log de vitesse augmente brutalement. Ce phénomène se produit à l'endroit où une mauvaise cimentation est détectée (figure 4.6b). L'apparition de l'horizon à 70 ms est un artefact lié à une anomalie de vitesse due à la mauvaise cimentation du casing à la formation.

La vitesse acoustique mesurée ne représente la vitesse de la formation pour des temps supérieurs à 70 ms. Cependant, le coefficient de corrélation entre trace sismique et film au point d'intersection est supérieur à 0,7, montrant ainsi un bon calage des horizons sismiques en temps, dans l'intervalle temps 38-60 ms. Il chute à 0,5 si on considère l'intervalle 38-80 ms.

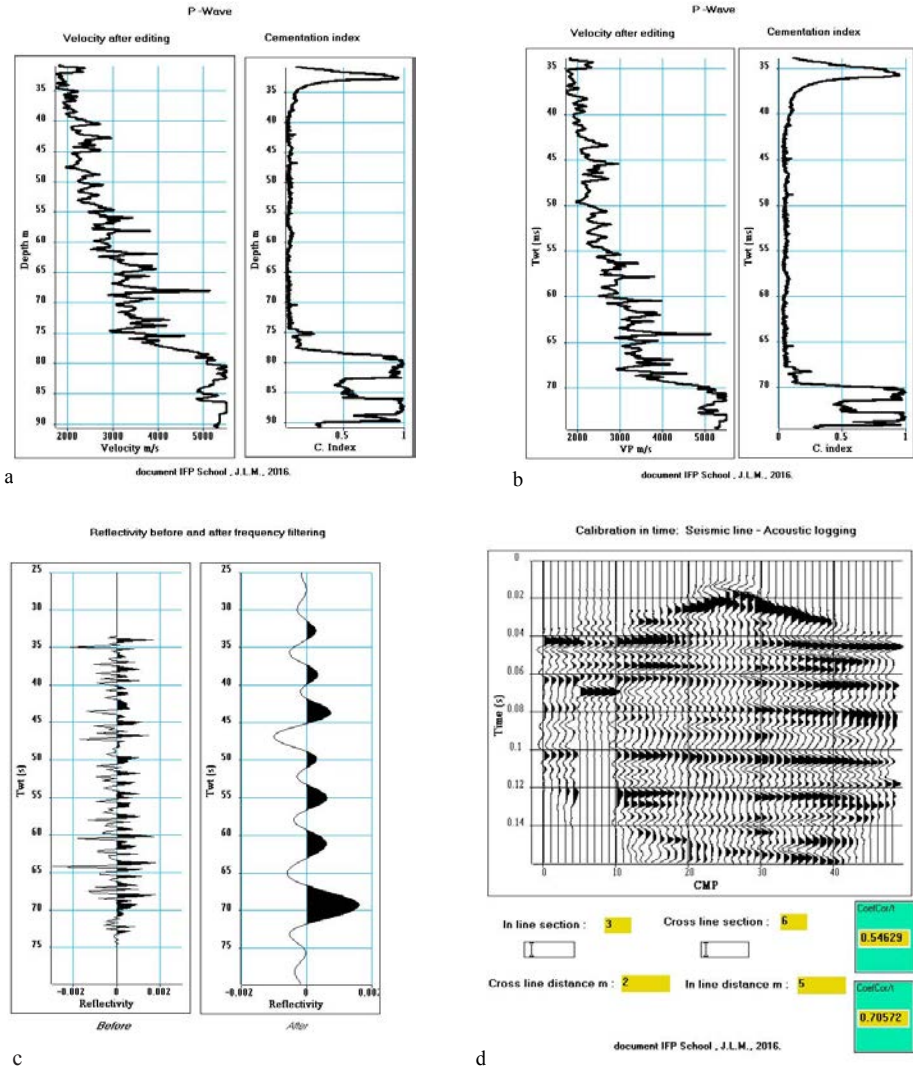


Figure 4.6 Section sismique et film synthétique avant « block shift ». a : log de vitesse et log de cimentation en profondeur. b : log de vitesse et log de cimentation en temps. c : réflectivité avant et après filtrage en fréquence. d : calage brut en temps de la section sismique avec la réflectivité filtrée en fréquence.

4.6 Temps sonore intégré et temps vertical PSV

La figure 4.7 montre une comparaison entre le temps sonore intégré et le temps vertical PSV. Les temps sont mis à 0, à la cote 30 m, profondeur à partir de laquelle la mesure acoustique a pu être réalisée. Dans cette acquisition, le niveau d'eau a été détecté à 30 m. On constate que les deux courbes de temps sont superposables dans l'intervalle 30-77 m. À partir de 77 m, les temps soniques sont plus courts que les temps PSV. La courbe de dérive, différence entre les temps soniques et les temps PSV, montre clairement ce phénomène. Pour réconcilier temps soniques et temps PSV, il faut modifier les vitesses acoustiques de façon à ce que les temps soniques intégrés recalculés soient au plus proche des temps verticaux PSV mesurés.

Cette procédure ne peut pas garantir que les vitesses acoustiques ainsi corrigées soient les vitesses exactes des formations.

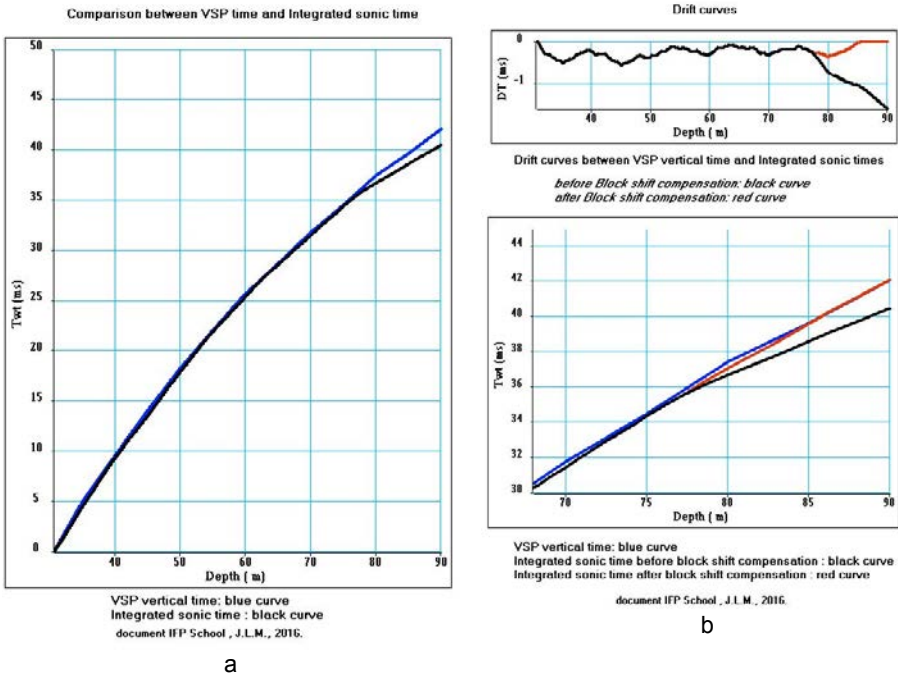


Figure 4.7 Temps PSV et Temps sonore intégré - méthode « block shift ». a : comparaison des temps PSV et des temps soniques intégrés. b en haut : Courbes de dérive avant et après compensation des vitesses par la méthode « block shift ». b en bas : comparaison des temps PSV et des temps soniques intégrés avant et après compensation des vitesses par la méthode « block shift ».

Les anomalies de vitesse acoustiques ont plusieurs origines :

- anomalies liées à la mesure : bruits et sauts de cycle pour les pointés par seuil, étirement (difficile à détecter) ;
- anomalies liées aux formations : mauvaise cohésion entre les grains (vitesse mesurée trop faible), vacuoles (vitesse mesurée trop forte) ;
- anomalies liées au trajet de l'onde : invasion, caves, trajets dans la boue (cas des trous de gros diamètre), altération de la paroi du trou ;
- anomalies liées à la mauvaise cimentation (cas de l'exemple présenté).

L'onde acoustique réfractée peut se propager dans la zone lavée ou envahie de la formation à cause du phénomène d'invasion et non dans la zone vierge. L'onde sismique (PSV) émise en surface se propage principalement dans la formation vierge. Pour obtenir des vitesses acoustiques en zone vierge, il est nécessaire d'effectuer une correction ou calage de la diagraphie vitesse acoustique sur des mesures de temps de propagation en zone vierge fournies par les temps pointés PSV. Pour ce faire, on utilise la courbe de dérive pour déterminer les valeurs de corrections de vitesse à apporter aux vitesses acoustiques mesurées de façon à ce que les nouveaux temps intégrés soient au plus proche des temps verticaux du PSV. La courbe de dérive peut être approchée par des segments de droite. Une valeur de correction de vitesse sera calculée pour chaque segment de droite. Dans le cas présent, on peut approcher la courbe de dérive par deux segments de droite, le premier dans l'intervalle de profondeurs 30-77 m, le second dans l'intervalle de profondeurs 77-90 m. Dans le premier intervalle, on constate que l'écart de temps est en moyenne constant (0,5 ms). Cette valeur correspond à la précision des pointés. En conséquence, la courbe de vitesse sonique ne sera pas modifiée dans cet intervalle. Dans l'intervalle 77-90 m, la courbe de dérive présente un gradient significatif qui peut être compensé par une correction de vitesse de valeur constante. La méthode de correction est appelée *block shift* (Boyer et Mari, 1997). La figure 4.7b montre, en haut, la courbe de dérive avant et après compensation de vitesses par la méthode *block shift*, et, en bas, la comparaison des temps PSV et des temps soniques intégrés avant et après compensation des vitesses par la méthode *block shift*. La figure 4.8 (a et b) montre, en profondeur et en temps, les logs de vitesse après correction par la méthode *block shift* et les logs de cimentation. Le log de vitesse corrigé a été utilisé pour calculer un log de réflectivité (figure 4.8c) qui a été filtré en fréquence et mis au pas sismique (0,5 ms).

Sur le log de réflectivité filtré, on peut constater que le réflecteur de forte amplitude vers 70 ms a disparu. Le log de réflectivité a été inséré dans la section sismique et le coefficient de corrélation entre log de réflectivité et trace sismique au puits a été mesuré à 0,77 confirmant ainsi un bon calage des horizons sismiques en temps.

Cet exemple montre l'utilisation du film synthétique pour caler les sections sismiques, après que les logs de vitesses acoustiques aient été validés sur les mesures de temps verticaux fournis par les temps PSV.

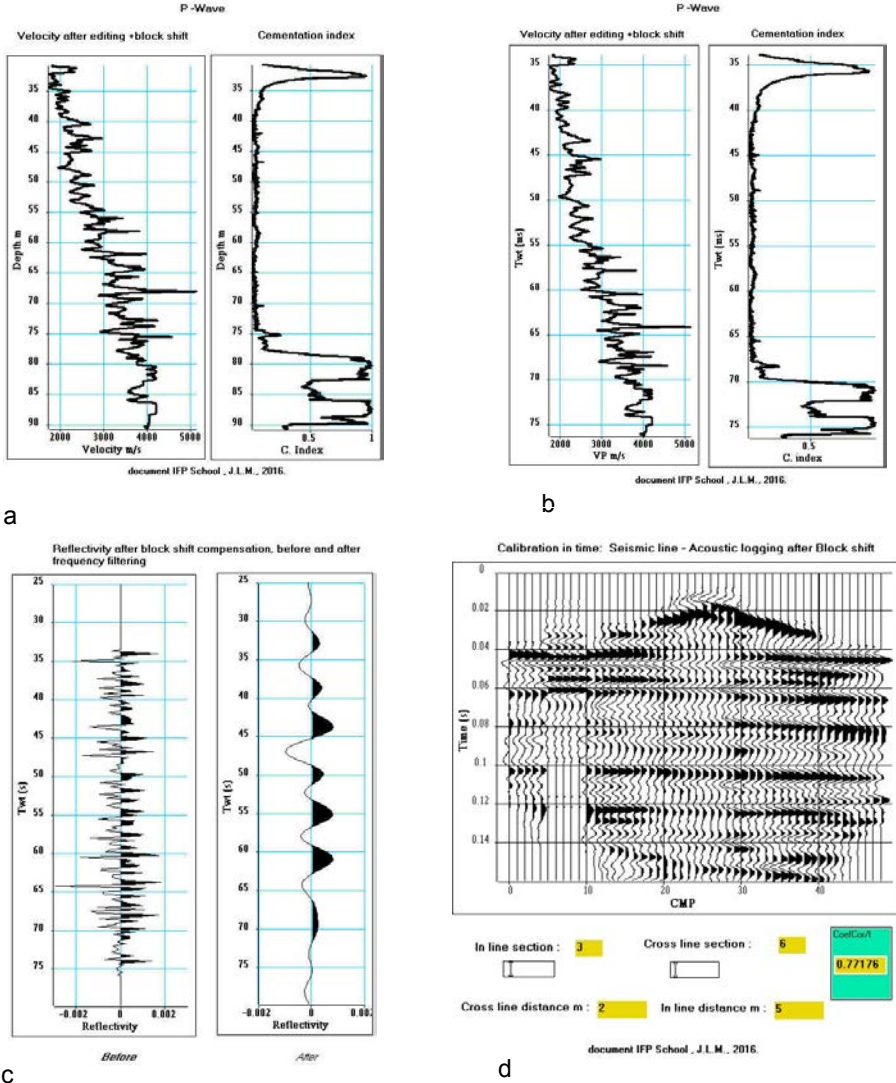


Figure 4.8 Section sismique et film synthétique après block shift. a : log de vitesse et log de cimentation en profondeur. b : log de vitesse et log de cimentation en temps. c : réflectivité avant et après filtrage en fréquence. d : calage brut en temps de la section sismique avec la réflectivité filtrée en fréquence.

4.7 Conclusion

Cet exemple montre l'utilisation du PSV et de la diagraphie acoustique pour caler les sections sismiques de surface. La figure 4.9 montre la comparaison du calage de la section à l'aide de la diagraphie acoustique (film synthétique) et de la trace somme PSV. Les traces du film synthétique et de la trace somme PSV sont insérées dans la section sismique section in-line n° 3, à l'intersection de la section sismique cross-line n° 6. Le film synthétique permet le calage des réflecteurs dans l'intervalle de profondeurs où les diagraphies ont été enregistrées. La trace somme PSV permet le calage dans le même intervalle de profondeurs, mais il permet également de prédire la présence de réflecteurs sous le puits, notamment dans l'intervalle 90-140 m.

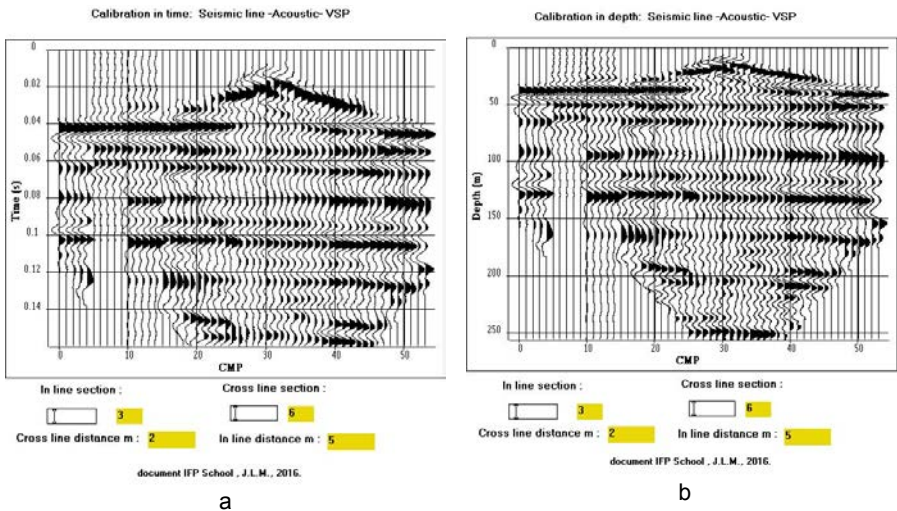


Figure 4.9 Calage d'une section sismique à l'aide d'un PSV et d'une diagraphie acoustique. a : en temps, b : en profondeur.

Références

- Boyer S., Mari J.L., 1997, *Seismic surveying and well logging*. Éditions Technip, Paris.
- Mari J.L., Herold D., 2015, *Seismic Processing Tutorial: using the SPW Software*, EAGE Publications bv.
- http://bookshop.eage.org/webshop/product_details.aspx?prod_code=AA0260