

Atténuation du ground roll par le filtre surface wave atténuation : application pour le cas des données sismiques

Ground roll attenuation by surface wave attenuation filter: application for the case of seismic data

Atenuación del balanceo del suelo por filtro de atenuación de ondas superficiales: aplicación para el caso de datos sísmicos

Ghanem BRAHMI  et Mohammed BOUGARA 

* Ghanem.brahmi@gmail.com, m.bougara@univ-dbkm.dz

Département des sciences de la terre et de l'univers, Université Djilali Bounaama- Khemis Miliana, Algeria 

Reçu du manuscrit : 11 octobre 2022 ;

Reçu dans un format révisé : 16 janvier 2023 ;

accepté : 23 janvier 2023.

Résumé

L'étape de l'interprétation sismique reste tributaire de la qualité des enregistrements des données, souvent affectés par des bruits cohérents et incohérents. Le but principal de ce travail consiste à l'utilisation du filtre "Surface Wave Noise Atténuation" basé sur la transformée de Fourier afin d'atténuer le bruit de surface présent sur une section sismique sommée en couverture multiple. Le filtre proposé a été appliqué dans le premier stade de notre test, sur des données sismiques synthétiques sur lesquelles un bruit organisé a été ajouté, tandis qu'en second, le filtre a été appliqué sur des données réelles, pour éliminer dans la mesure du possible le ground roll affectant l'image sismique avant et après sommation. L'optimisation des paramètres du filtre a permis d'obtenir une qualité sismique acceptable. Le recours à d'autres filtres, le filtre médian et le filtre gaussien en l'occurrence, ont permis d'atténuer le bruit résiduel et les réflecteurs apparaissent d'une façon encore meilleure.

Mots clés : bruit; filtre; transformée de Fourier; section sismique; RMS, spectre.

Abstract

The seismic interpretation step remains dependent on the quality of the data recordings, which are often affected by coherent and inconsistent noises. The main objective of this work is to use the filter "Surface Wave Noise Attenuation", which is based on the Fourier transformation to minimise the surface noise, present on a seismic cross-section summarised in multiple coverage. The proposed filter was applied, in the first stage of our test, to synthetic seismic data on which organised noise was added, while in the second stage the filter was applied to real data, to eliminate as far as possible the ground roll affecting the seismic image before and after stacking. Optimization of the filter parameters allowed an acceptable seismic quality. The use of other filters, the median filter and the Gaussian filter in this case, has reduced the residual noise and the reflectors appear even better.

Key words: noise; filter; Fourier transformed; seismic section; RMS, spectrum.

How to cite this article:

Brahmi, G. et Bougara M., (2022). Atténuation du ground roll par le filtre surface wave atténuation : application pour le cas des données sismiques.. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA, 52, pp. 29 - 36. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.105227>.

Resumen

La etapa de interpretación sísmica sigue dependiendo de la calidad del registro de los datos, que a menudo se ven afectadas por ruidos coherentes e inconsistentes. El objetivo principal de este trabajo es utilizar el filtro "Surface Wave Noise Attenuation", que se basa en la transformación de Fourier para minimizar el ruido superficial, presente en una sección sísmica resumida en cobertura múltiple. El filtro propuesto se aplicó, en la primera etapa de nuestra prueba, a datos sísmicos sintéticos sobre los que se agregó ruido organizado, mientras que en la segunda etapa el filtro se aplicó a datos reales, para eliminar en la medida de lo posible el balanceo de tierra que afecta a la imagen sísmica antes y después del apilamiento. La optimización de los parámetros del filtro permitió una calidad sísmica aceptable. El uso de otros filtros, el filtro mediano y el filtro gaussiano en este caso, ha reducido el ruido residual y los reflectores aparecen aún mejor.

Palabras clave: Ruido, Filtro, transformado de Fourier, sección sísmica, RMS, espectro.

1. Introduction

L'exploration sismique est une méthode géophysique dont le but est d'imager la subsurface en utilisant un champ d'onde artificiel. L'énergie sismique remontée en surface est enregistrée par des géophones. Un film sismique est composé de plusieurs traces, il contient des hyperboles de réflexions refléchies sur les interfaces des couches géologiques et d'autres signaux indésirables constituant le bruit ([Al-Anezi et al., 2013](#)). Durant l'étape de traitement et notamment lors de la sommation, de la déconvolution et de la migration, de nombreux événements indésirables sont atténués ([Loge & Mary, 2021](#)).

Typiquement, il existe deux sortes de bruit, l'un est dénommé bruit cohérent et l'autre incohérent, ou encore aléatoire. Le principe du filtrage consiste à dissocier le bruit du signal utile ou d'isoler certains détails du traitement de l'image ([Bergounioux, 2015](#)).

La couverture multiple constitue un outil efficace pour se débarrasser du bruit aléatoire. Les filtrages F-X et F-K, sont les plus utilisés en traitement sismique afin d'éliminer des bruits et des multiples.

De nombreux auteurs ont effectué des recherches sur les techniques et les méthodes relatives au filtrage des ondes de surfaces entre autres: le Ground-roll attenuation based on Wiener filtering and benefits of time-frequency imaging ([Karsli & Bayrak, 2008](#)) et le Ground Roll Attenuation via SVD and Adaptive Subtraction ([Cary & Zhang, 2009](#)). Dans leur travail, ces auteurs ont utilisé la décomposition en valeur singulière avec une fenêtre de localisation dans le domaine espace-temps afin d'estimer le ground roll, l'adaptive seismic ground roll attenuation using the double density dual tree discrete wavelet transform (DWT) method ([Goudarzi & Ali Riahi, 2012](#)); Ground roll attenuation using shaping filters and band limited sweep signals ([Dos Santos & Porsani, 2012](#)). Cette technique de filtrage a été appliquée pour l'atténuation des bruits affectant les enregistrements sismiques en exploration pétrolière, Medium-scale resonant wave barrier for seismic ([Zeighami et al., 2021](#)); Seismic ground-roll noise attenuation using deep learning ([Kaur et al., 2020](#)); Physics-constrained deep learning for ground roll attenuation ([Pham & Li, 2022](#)) et plus récemment, nous pouvons citer l'article de [Xiao et al \(2022\)](#) dont l'étude a portée sur le Ground Roll Attenuation of Multicomponent

Seismic Data with the Noise-Assisted Multivariate Empirical Mode Decomposition (NA-MEMD).

L'objectif principal de ce travail consiste en premier lieu à proposer l'application du filtre Surface Wave Noise attenuation (SWNA) dans le but d'atténuer le ground roll et améliorer la qualité de l'imagerie sismique sur des données sismiques synthétiques et réelles, obtenues avant et après sommation. Nous avons aussi utilisé des filtres à base d'image, à savoir le filtre médian et le filtre gaussien, de manière à réduire le bruit résiduel, ce qui a permis de mettre en évidence la structure géologique de la subsurface avec une qualité sismique acceptable.

Le contexte géographique de la zone d'étude correspond au bassin d'Illizi, localisé dans la plateforme saharienne de l'Algérie, à 1600 km au sud-est d'Alger, une latitude Nord allant de 25° à 29° et une longitude Est variant de 6° à 10°, couvrant une superficie d'environ 108424 km². Le bassin sédimentaire d'Illizi est délimité au Nord par le bassin de Berkane, au Sud par une portion du massif du Hoggar et à l'Est par le môle d'Amguid suivi aux confins Est par la ride de Tihemboka.

Le contexte géologique porte sur des sections sismiques relatives au bassin sédimentaire d'Illizi, dans l'extrême Sud Est de l'Algérie. Il s'agit d'un vaste domaine sédimentaire stable, en situation intra cratonique ([Fabre, 1976](#)). Le remplissage du bassin correspond à des faciès allant du Paléozoïque au Mésozoïque avec des sédiments essentiellement silico-clastiques, carbonatées ou localement évaporitiques. Les rejeux d'accidents panafricains ont conduit à conférer à la région une structure à grande rayon de courbure.

Les ondes de surface. Les ondes de surface, appelées aussi ground roll bien qu'elles soient utiles en géotechnique et autres domaines ([Moya-Gutiérrez et al., 2020](#)), elles constituent des parasites en prospection sismique. Leur génération est attribuée à l'hétérogénéité des terrains. Lors de leur passage au voisinage de la surface, les particules sont soumises à une combinaison de mouvements longitudinaux et transversaux causés par l'interférence des ondes P et S dont l'amplitude diminue en fonction de la profondeur ([Telford et al., 1990](#) ; [Yilmaz, 2001](#)). Ces ondes de surface sont connues sous le nom d'onde de Rayleigh et ondes de Love, elles constituent une source de bruits indésirables dans l'enregistrement sismique et qu'on tente généralement

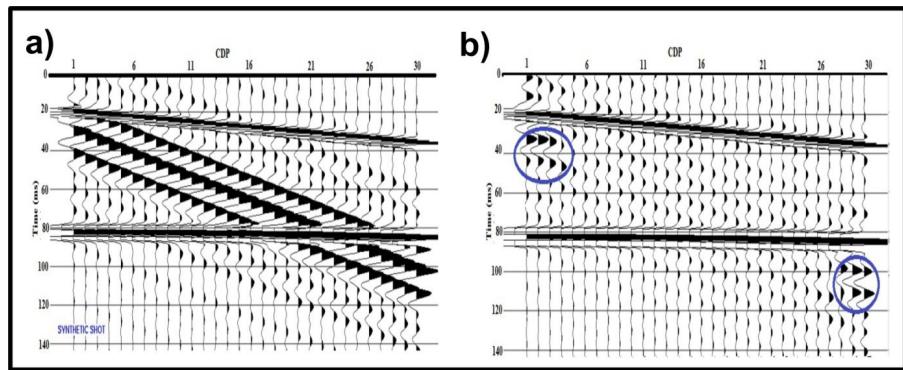


Figure 1. Modèle synthétique, a) avant filtrage, b) après filtrage du ground roll.
La source : auteurs

d'atténuer pour une meilleure exploitation des données sismiques. Le ground-roll se propage à vitesse relativement faible (150 à 1500 m/s) dépendant de la longueur d'onde et de l'épaisseur du milieu traversé par le champ d'onde, avec un caractère de basse fréquence ([Dubois & Diamant, 2001](#)).

Le filtre surface wave atténuation. Le Filtre Surface Wave Attenuation, SWNA, atténue les ondes de surface par la formation des grilles de traces sismiques à basses fréquences (Low-frequency Arrays). Les logiciels commerciaux offrent une exploitation interactive de ce filtre.

Connaissant la vitesse de l'onde de surface ainsi que sa fréquence de coupure, le programme SWNA transforme les données sismiques du domaine espace-temps au domaine fréquence-espace, où il effectue un assemblage dépendant de la fréquence des traces adjacentes. Pour chaque fréquence, le nombre de traces à mélanger (mix) est déterminé par la relation suivante :

$$\text{mix} = V / (F * \Delta X)$$

V : la vitesse de l'onde, F : la fréquence et ΔX : l'intertrace.

Une section sismique est fonction des variables du temps et de la distance. La transformée de Fourier en 2D d'une fonction $S(t,x)$ est ([Bo et al., 2019](#)) :

$$G(f, k) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(t, x) e^{-2\pi i (ft + kx)} dt dx$$

Après l'opération du filtrage, le retour au domaine temporel est réalisé par la transformée de Fourier inverse exprimée par :

$$S(t, k) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(f, k) e^{+2\pi i (ft + kx)} df dk$$

Les composantes ayant des fréquences supérieures à la fréquence de coupure restent inchangées. Finalement, les données filtrées sont transformées inversement au domaine temps-fréquence.

Le programme SWNA opère en panneaux, qui se superposent et se fusionnent.

Chaque panneau peut contenir des traces qui ont les dimensions de ce panneau (Panel seize traces). Les premières et dernières traces de bord de panneau chevauchent les panneaux adjacents. Dans les bords du panneau, les traces de mélange de panneaux provenant de panneaux adjacents sont mélangées et sorties alors que les traces restantes aux bords sont annulées.

1. Méthodologie

1.1 Applications sur des données synthétiques

La trace synthétique joue un rôle important dans la création d'un modèle sismique pour tester l'effet d'un filtre. Dans ce travail, nous avons testé l'algorithme du filtre IACDD sur un film synthétique. Pour cela, nous avons supposé un modèle composé d'un ensemble de couches inclinées à partir duquel une mini section sismique était générée, elle est composée de 32 traces distantes de 25 m, l'une de l'autre.

Le sismogramme est obtenu après convolution de la série des coefficients de réflexion avec l'ondelette de Klauder. Dans notre cas, la longueur du sweep est de 5000 ms, l'intervalle fréquentiel du balayage du sweep est de 12-72 HZ. En ajoutant le bruit organisé à la section sismique, on obtient une image composée à la fois du signal et du bruit valable pour le test du filtre proposé ([Fig. 1.a](#)).

En dépit de la connaissance préalable des paramètres du bruit (vitesses et fréquences), une partie du bruit, en cercle bleue, n'a pas été atténuée.

Comme nous l'avons souligné auparavant, une importante partie du ground roll affectant la section sismique synthétique est atténuée par le filtre SWNA ([Fig. 1.b](#)). Cependant, la connaissance préalable des paramètres du bruit (vitesses et fréquences), une partie du bruit résiduel, en cercle bleue, n'a pas été atténuée mais la qualité du document final reste acceptable.

1.2 Application sur des données sismiques réelles

Pour un choix optimal des paramètres du filtre SWNA, nous avons identifié le ground roll sur un tir sismique brut

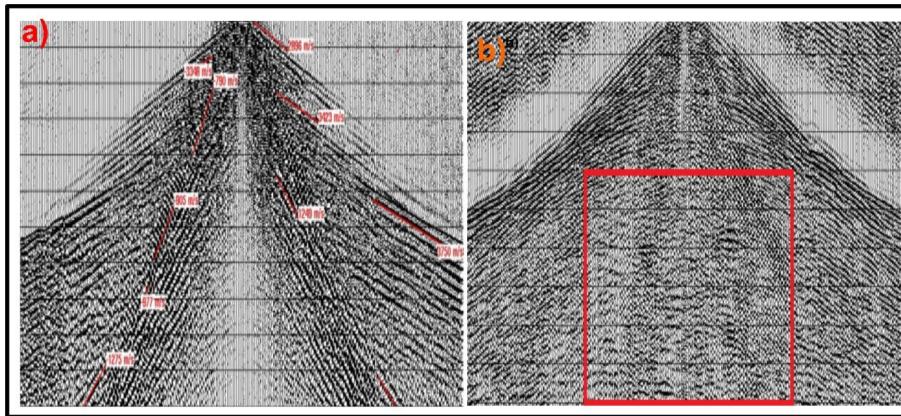


Figure 2. Tir sismique, a) avant filtrage ; b) après filtrage du ground roll

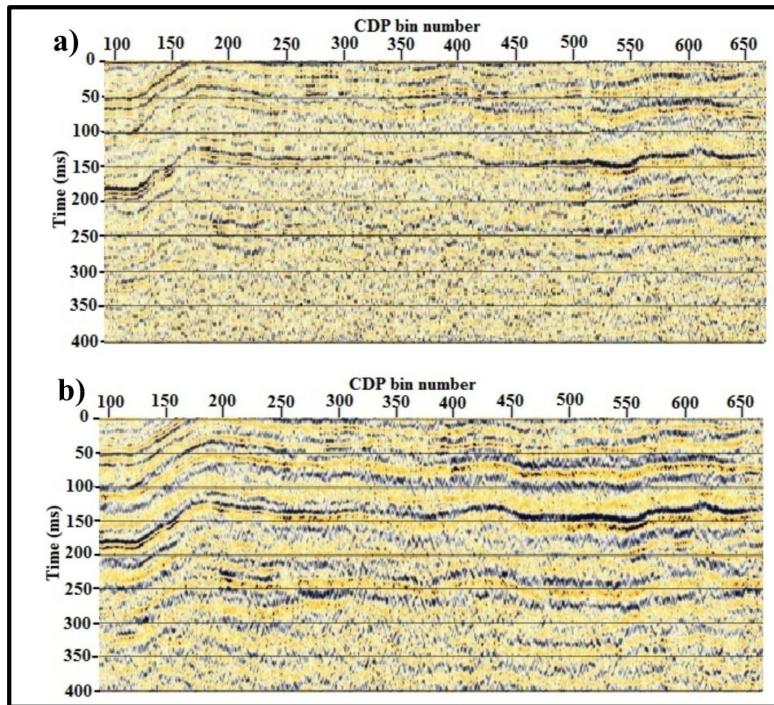


Figure 3. Section sismique sommée, a) avant filtrage du Ground roll, b) après filtrage du ground roll.

(Fig. 2.a) en mesurant les différentes vitesses correspondantes. La gamme fréquentielle du ground roll est obtenue dans le domaine spectral par la transformée de Fourier bidimensionnelle après la mise à zéro (mute) des autres évènements sismiques dans le domaine temporel. La Fig. 2.b illustre le tir précédent, filtré par le filtre SWNA où nous constatons qu'une bonne partie du ground roll est filtrée (rectangle en rouge) laissant apparaître les hyperboles de réflexions d'une façon meilleure.

En outre, le filtre SWNA a été appliqué sur une portion de section sismique sommée en couverture multiple, enregistrée dans le Sahara du Nord de l'Afrique. La distance entre géophones est de 25 m, l'inter-tir (shot interval) est de 25 m, la section brute finale est constituée

approximativement de 300 traces avec une distance entre CDP (Common Deep Point) de 12.5 m, le temps d'écoute total est de 400 ms. Les données sont rééchantillonnées à 4 ms après traitement afin d'alléger la taille des données et économiser l'espace mémoire. La longueur du sweep vibro sismique, utilisée durant l'étape d'acquisition est de 8-72 HZ avec un temps de balayage de 12000 ms, paramètres utilisés généralement pour l'imagerie des structures peu profondes. L'ordre de la couverture est de 120 % où chaque trace sommée est obtenue après une correction statique réfraction et correction dynamique et après avoir effectué une analyse des vitesses. La section sismique brute est représentée par la Fig.3.a.

Bien que la procédure de sommation en couverture soit multiple, un fort bruit aléatoire subsiste toujours sur la section sismique, associé à une faible continuité latérale.

1. Résultats et discusion

De nombreux travaux ont fait l'objet de l'interprétation des sections sismiques après filtrage ([Ferahtia et al., 2013](#)). Pour montrer l'efficacité du filtre utilisé, de nombreuses gammes de vitesses et fréquences ont été testées sur la section sismique proposée.

Quelques réflecteurs sismiques sont renforcés et apparaissent d'une façon meilleure après application du filtre SWNA ([Fig. 3.b](#)). Dans le cas d'un modèle géologique simple, on distingue deux types de déformations, le style souple et le style cassant.

La déformation souple, représentée sur la section sismique, reflète des anticlinaux et des synclinaux apparaissant d'une façon meilleure après filtrage. A titre d'exemple, l'anticlinal localisé entre 0 et 400ms et entre 100 à 200 en CDP où sa partie profonde est dissimulée par le bruit, commence à apparaître après l'application du filtre SWNA. On peut citer un autre cas, celui du paquet localisé entre 150 et 400 ms selon l'échelle verticale et entre 200 et 650 en CDP, pour l'échelle horizontale, la qualité sismique après filtrage de celui-ci est acceptable dans son ensemble.

En statistique, l'erreur quadratique moyenne ou RMS (root mean square) est une valeur typique pour un nombre (n) de valeurs de quantités ($x_1, x_2, x_3\dots$), elle est donnée par l'expression suivante ([Bhuiyan & Khan, 2018](#); [Jakhetiya et al., 2018](#)):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

Cette métrique est souvent utilisée en traitement sismique de manière à comparer le niveau de bruit à l'intérieur d'une fenêtre temporelle. Les graphes de la [figure 4.a](#) montrent les niveaux RMS (RMS level) de la section sismique non filtrée (en rouge), insuffisamment filtrée (en noire), alors que le graphe en bleu représente le niveau RMS de la section sismique après l'application du filtre SWNA. Il est évident que le filtrage diminue le niveau RMS à cause de l'atténuation du niveau du bruit sismique présent dans la section. Un agrandissement entre les canaux 100 et 200 ([Fig. 4.b](#)) illustre d'une façon plus claire la différence entre le niveau RMS avant et après filtrage des ondes de surface.

Atténuation des bruits résiduels. En traitement des données sismiques, on utilise une série des filtres non seulement pour atténuer dans la mesure du possible les bruits présents sur une section sismique mais aussi pour améliorer la qualité du signal sismique. Afin d'atténuer le bruit résiduel de la section filtré par le filtre SWNA ([Fig. 3.b](#)), deux filtres ont été appliqués, le filtre médian et le filtre gaussien.

Filtre médian. Le filtre médian a été introduit par [Tukey \(1974\)](#), il est basé sur un critère statistique (valeur médiane) et est considéré comme étant l'un des plus simples parmi les filtres d'ordre. Comme son nom l'indique, le filtre médian

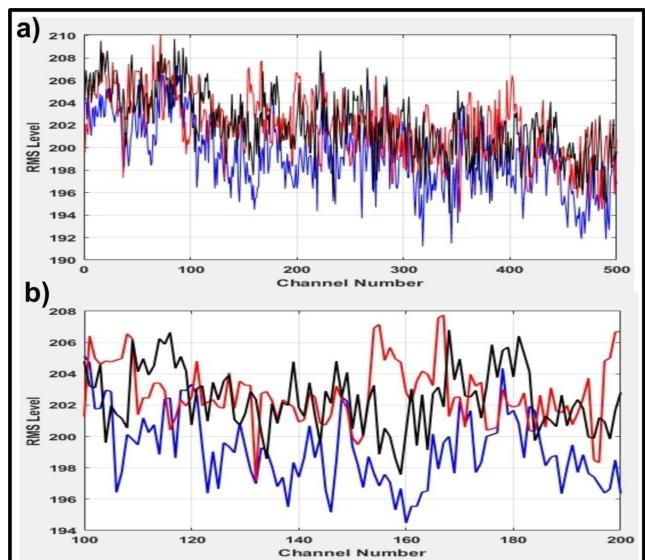


Figure 4. Courbes des niveaux RMS de la section sismique : a) avant et après filtrage, b) agrandissement entre le canal 100 et 200.

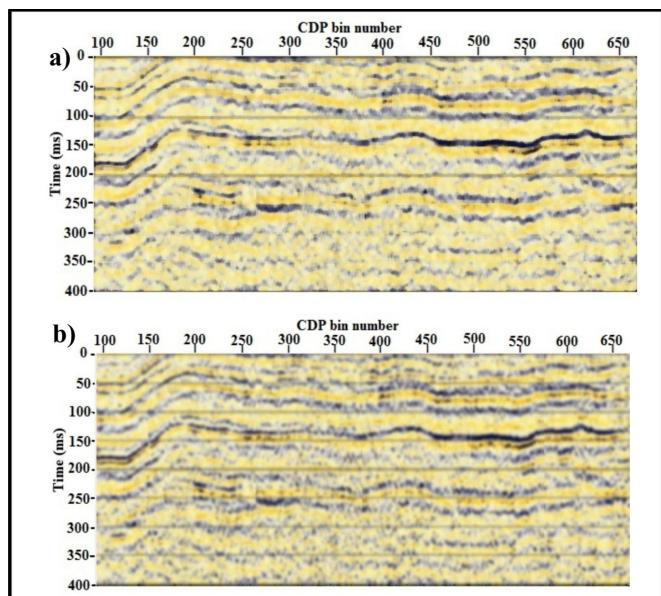


Figure 5. Atténuation du bruit résiduel de la section de la figure 3.b : a) Filtre médian, b) Filtre gaussien.

calcule une médiane à l'intérieur d'une fenêtre de dimension mxn , pour chaque nouveau pixel, sa valeur après filtrage est la médiane des valeurs de son voisinage ([Chandrakala, 2016](#)).

Dans ce cas, nous avons choisi une fenêtre de taille 5×5 pour filtrer le bruit résiduel ([Fig. 5.a](#)). Nous pouvons constater que la qualité de la section est relativement améliorée, le filtre médian permet de lisser l'image, mais il conserve mieux la netteté des réflecteurs.

Filtre gaussien. Comme son nom l'indique, le filtre gaussien possède un noyau de convolution de type gaussien, il fait partie des filtres linéaires ([Solomon & Breckon, 2011](#)).

Cependant les coefficients du filtre gaussien sont calculés par la loi suivante :

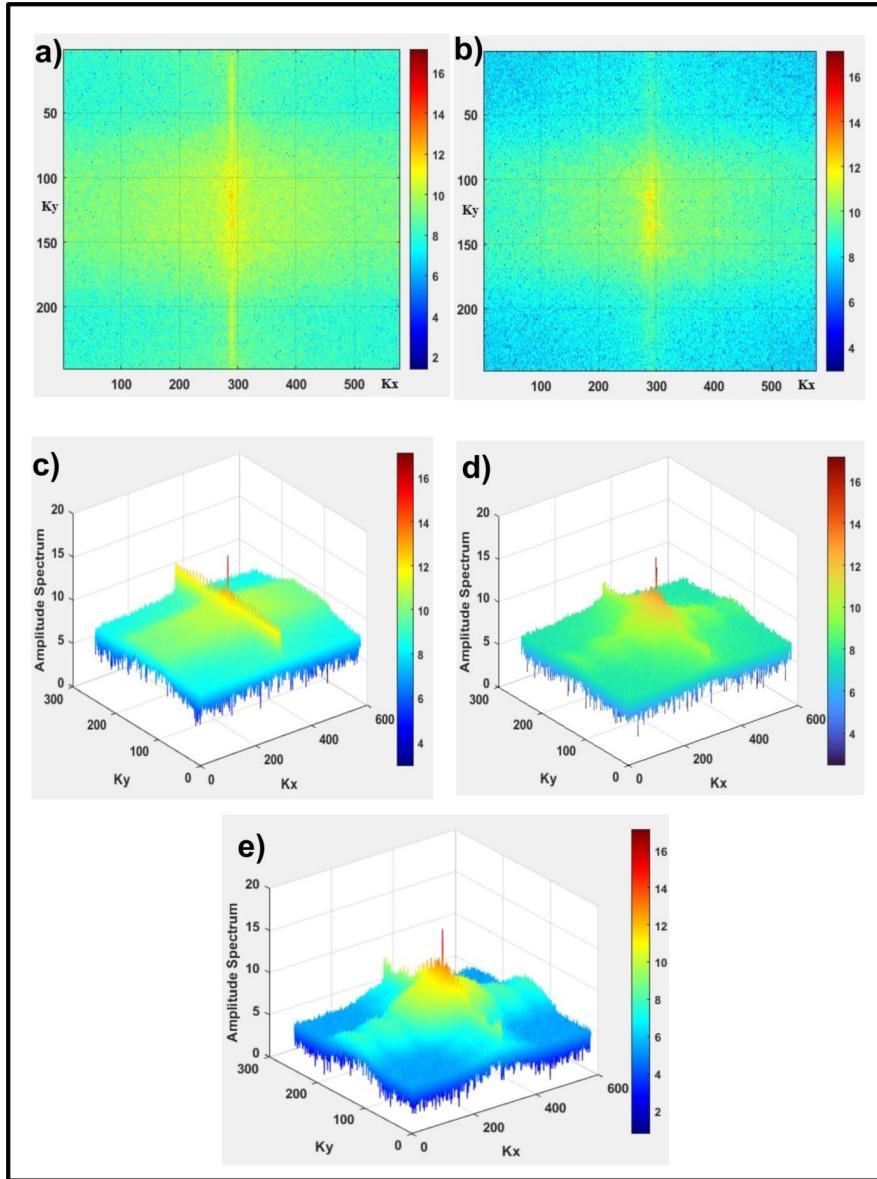


Figure 6. Spectre d'amplitude, 2D et 3D. a) section brute, b) section filtrée par le filtre SWNA, c) section filtrée par le filtre SWNA (3D), d) section filtrée par le filtre médian, e) section filtrée par le filtre gaussien.

$$g(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right)$$

$g(x, y)$ est le pixel de coordonnées x, y ; σ est l'écart-type.

Le choix de la taille du filtre gaussien est gouverné par le paramètre σ . En général, un filtre gaussien dont $\sigma < 1$, est utilisé pour atténuer le bruit. Plus l'écart-type croît, plus l'image devient floue.

Le filtre gaussien a été appliqué pour la réduction du bruit résiduel de la section présentée par la [Fig. 3.b](#) et le résultat du filtrage est illustré par la [Fig. 5.b](#), sur laquelle nous pouvons observer aisément la bonne continuité des horizons sismiques.

Comparaison des spectres. L'analyse spectrale de Fourier d'une image quelconque simplifie les calculs en convertissant des opérations complexes de convolution dans le domaine spatial en une multiplication simple dans le domaine de fréquentiel.

L'image en deux dimensions est généralement non périodique, mais elle est supposée périodique quand on veut calculer sa transformée de Fourier discrète ([Mahmood et al., 2015](#)). La [Fig. 6](#) montre la distribution spatiale de la magnitude du spectre des différents images de la section brute et des sections filtrées, nous pouvons aisément remarquer que l'amplitude du spectre varie d'un cas à un autre. La [Fig. 6.a](#) représenté le spectre en deux dimensions de la section sismique brute alors que la [Fig. 6.b](#) illustre son spectre après filtrage par le filtre SWNA. Dans ce cas, on

constate la présence de faibles amplitudes en couleur bleue à cause de l'atténuation de l'énergie du bruit. Les [Figs 6.c, 6.d](#) et [6.e](#) montrent les spectres en trois dimensions de la section brute filtrée, respectivement par les filtre SWNA, médian et gaussien.

1. Conclusion

La présente étude s'est accomplie par des résultats encourageants. Concernant l'atténuation du ground roll, nous avons testé la capacité du filtre Surface Wave Noise Attenuation sur des données sismiques synthétiques et sommées en couverture multiple. Le recours à la métrique RMS a permis de constater l'atténuation du degré du bruit après l'opération du filtrage. Le bruit résiduel a été atténue par l'utilisation des filtres médian et gaussien, ce qui indique que le filtre Surface Wave Noise Attenuation a ses limites concernant sa capacité de filtrage. La comparaison des spectres 2D et 3D des sections sismiques issues des différents filtres, nous a permis de mieux comprendre le phénomène d'atténuation du bruit.

Selon la qualité de l'image, les filtres médian et gaussien donnent un meilleur résultat sur le caractère de préservation des bords et contours (réflexions) conduisant à une bonne qualité de l'image sismique après filtrage.

Références

Al-Anezi, G.T., AlMalki, M. and Alkhaila, T. (2013). Mapping of bedrock using the high-resolution seismic reflection technique at Wadi Al Dawasir Region, Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(1), pp. 235-245. DOI: <https://doi.org/10.1017/ASEG2012ab220>

Bergounioux, M. (2015). *Introduction au traitement mathématique des images-méthodes déterministes*. 76. Springer Berlin, Heidelberg. 241 P. Disponible en: <https://hal.science/hal-01137367/>. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46539-4>

Bhuiyan, M.A.A. and Khan, A.R. (2018). Image quality assessment employing RMS contrast and histogram similarity. *Int. Arab J. Inf. Technol.*, 15(6), pp. 983-989.

Bo, W., Shengdong, L., Biao, J. and Wanyong, Q. (2019). Fine imaging by using advanced detection of reflected waves in underground coal mine. *Earth Sciences Research Journal*, 23(1), pp. 93-99. DOI: <https://doi.org/10.15446/esrj.v23n1.78750>

Cary, P. and Zhang, C. (2009). Ground roll attenuation via SVD and adaptive subtraction. In: *Frontiers+ Innovation-2009 CSPG CSEG CWLS Convention*, Calgary, Canada. pp. 372-375.

Chandrakala, M. (2016). Comparative study and image analysis of local adaptive thresholding techniques. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 4(5), pp. 8432-8439.

Dos Santos, Q.C. and Porsani, M.J. (2012). Ground roll attenuation using shaping filters and band limited sweep signals. *Brazilian Journal of Geophysics*, 30(4), pp. 545-554. DOI: <https://doi.org/10.22564/rbgf.v30i4.241>

Dubois, J. and Diament, M. (2001). *Géophysique cours et exercices*, édition DUNOD.

Fabre, J. (1976) *Introduction à la géologie du Sahara algérien et des régions voisines : La couverture phanérozoïque*. Vol. 1, SNED, Alger, 422 P.

Ferahtia, J., Aïfa, T., Baddari, K., Djafour, N. and El Adj, S. (2013). Image-based processing techniques applied to seismic data filtering. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 104, pp. 17-26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.03.026>

Goudarzi, A.R. and Ali-Riahi, M. (2012). Adaptive seismic ground roll attenuation using the double density dual tree discrete wavelet transform (DWT) method. *Earth Sciences Research Journal*, 16(2), pp. 113-120.

Jakhetiya, V., Lin, W., Jaiswal, S., Gu, K. and Guntuku, S.C. (2018). Just noticeable difference for natural images using RMS contrast and feed-back mechanism. *Neurocomputing*, 275, pp. 366-376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.08.031>

Kaur, H., Fomel, S. and Pham, N. (2020). Seismic ground-roll noise attenuation using deep learning. *Geophysical Prospecting*, 68(7), pp. 2064-2077. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12985>

Karsli, H. and Bayrak, Y. (2008). Ground-roll attenuation based on Wiener filtering and benefits of time-frequency imaging. *The Leading Edge*, 27(2), pp. 206-209. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.2840368>

Mahmood, F., Toots, M., Öfverstedt, L.G. and Skoglund, U. (2015, December). 2D discrete Fourier transform with simultaneous edge artifact removal for real-time applications. In: *2015 International Conference on Field Programmable Technology (FPT)* (pp. 236-239). IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/FPT.2015.7393157>

Moya-Gutiérrez, A.J., Torres-Peña, J.A. y Contreras-Martínez, M. (2020). Caracterización de sitio empleando prospección geofísica y geotécnica. Caso de estudio vía principal Troncal Central del Norte (Ruta Nacional 55) a la altura del Km 68+500 en el Municipio de Pamplona, Norte de Santander, Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (48), pp. 30-45. DOI: <https://doi.org/10.15446/rbct.n48.85411>

Ologe, O. and Mary, T.O. (2021). Seismic Attributes Analysis as a Precursor to Hydrocarbon Indicators: A case study of "Ok" Field, Niger Delta. *Tanzania Journal of Science*, 47(1), pp. 134-144.

Pham, N. and Li, W. (2022). Physics-constrained deep learning for ground roll attenuation. *Geophysics*, 87(1), pp. V15-V27. DOI: <https://doi.org/10.1190/geo2020-0691.1>

Solomon, C. and Breckon, T. (2011). *Fundamentals of digital image processing: a practical approach with examples in Matlab*. John Wiley & Sons. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470689776>

Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139167932>

Tukey, J.W. (1974). Nonlinear (no superposable) methods for smoothing data. *Proc. Cong. Rec. EASCOM'74*, pp. 673-681.

Xiao, L., Zhang, Z. and Gao, J. (2022). Ground roll attenuation of multicomponent seismic data with the Noise-Assisted Multivariate Empirical Mode Decomposition (NA-MEMD) Method. *Applied Sciences*, 12(5), art. 2429. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12052429>

Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data*. Society of exploration

geophysicists. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.9781560801580>
Zeighami, F., Palermo, A., Vratsikidis, A., Cheng, Z., Ptilakis, D. and Marzani, A. (2021). Medium-scale resonant wave barrier for seismic surface waves. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 49(8), pp. 1157-1172. DOI: <https://doi.org/10.1080/15397734.2020.1835487>

G. Brahmi, est docteur en géophysique et enseignant au département des sciences de la terre et de l'univers, université de Khémis Miliana (Algérie).

Ses travaux de recherche sont focalisés sur le filtrage des données sismiques et la modélisation en géophysique.
ORCID : 0000-0001-8323-3974

M. Bougara, est docteur en géologie et Directeur du Laboratoire de recherche PRAVDURN à l'Université Djilali Bouunama (Khemis Miliana, Algérie). Il a obtenu sa thèse de doctorat à l'Université d'Oran en cotutelle avec le Département de Pétrologie sédimentaire de l'Université Sart Tilman (Liège, Belgique). Il est chargé de l'élaboration et du suivi de plusieurs projets dans la plaine du Haut Cheliff (Ain Defla, Algérie).
ORCID : 0000-0002-6975-3276