

Estimation des ondes de vibrations des flûtes sismiques multi-capteurs basée sur un modèle physique atténuatif et dispersif

Viktor SMIRNOV^{1,2} Anthony SOURICE¹ Philippe HERRMANN¹ Jérôme I. MARS²

¹Sercel, 16 Rue du Bel air, 44470 Carquefou, France

²Univ. Grenoble Alpes, CNRS, GRENOBLE INP, GIPSA-Lab, 38000 Grenoble, France

Résumé – Les accéléromètres des flûtes sismiques multi-capteurs sont soumis à de forts bruits de vibrations qui limitent leur utilisation. En effet, le débruitage de ces ondes est particulièrement difficile car elles sont très énergétiques et fortement repliées spectralement. Dans cet article, nous proposons une méthode ad hoc pour atténuer ces vibrations. Elle repose sur l'établissement d'un nouveau modèle de propagation dispersif et atténuatif. Nous montrons sur des données réelles que la méthode permet de réduire fortement le bruit dû aux vibrations sur l'ensemble de la bande de fréquences et sans dégrader le signal sismique utile.

Abstract – The accelerometers of seismic cables are subject to strong vibration noise that limits their use. Indeed, the denoising of these waves is particularly challenging because they are highly energetic and strongly aliased. In this paper, we propose an ad hoc method to mitigate these vibrations. It is based on the establishment of a new dispersive and attenuating propagation model. We demonstrate on real data that the method allows to strongly reduce the noise due to vibrations on the whole frequency band and without leakage of the seismic signal.

1 Introduction

La résolution des images acquises par les flûtes sismiques conventionnelles, constituées d'hydrophones, est limitée par le phénomène de fantômes (« ghosts »). Ils se manifestent dans le spectre par une atténuation périodique, due aux interférences entre l'onde sismique réfléchiée par le fond marin et son écho à la surface de l'eau. Pour résoudre ce problème, les nouvelles flûtes multi-capteurs associent des hydrophones et des accéléromètres (2 composantes). Ces ensembles de capteurs ont des spectres complémentaires ce qui permet de reconstituer un signal sismique large bande [1][4]. Cependant, les accéléromètres sont fortement bruités par les vibrations de la flûte sismique ce qui limite l'utilisation de ces systèmes [3]. L'objectif de ce travail est de proposer une méthode basée sur un modèle physique pour estimer ces vibrations et débruiter le signal sismique utile.

Dans une première partie nous présenterons les caractéristiques de ces bruits. Nous proposerons ensuite un nouveau modèle de propagation permettant de décrire leur vitesse et leur atténuation. À partir de celui-ci, une méthode d'estimation de ces bruits sera développée et finalement évaluée sur des données terrain.

2 Caractéristiques des bruits de vibrations

Les vibrations sont la principale source de bruit des accéléromètres [9]. Elles sont générées par les appareils de positionnement montés le long de la flûte et asservissant sa position. Ainsi, le câble tracté en tension agit comme un guide d'ondes pour ces vibrations transverses.

La figure 1 présente des données enregistrées par les accéléromètres. À gauche, on montre les signaux acquis au cours du temps par 48 capteurs espacés de 12,5 mètres. On observe la

superposition du signal sismique (entouré en magenta) et des vibrations (flèches rouges). Ces dernières sont générées par les appareils de positionnement (traits verts) et contaminent l'ensemble des données. Elles se propagent dans les deux directions du câble à environ 50 m/s soit beaucoup plus lentement que la sismique (≥ 1500 m/s). La partie droite de la figure 1 montre le module du diagramme [F-K] de ces données. Malgré leur différence de vitesse, la sismique et les vibrations se superposent également dans ce domaine. En effet, ces dernières sont très fortement repliées spectralement à partir de 2 Hz à cause de la combinaison du faible échantillonnage spatial et de la faible vitesse des ondes. On note également que les vibrations sont particulièrement énergétiques en dessous de 15 Hz et que l'on ne parvient pas à distinguer le signal sismique.

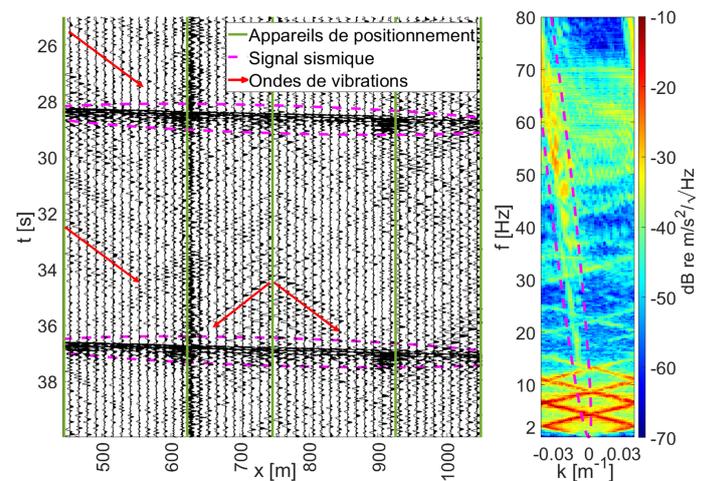


FIGURE 1 : Superposition du signal sismique utile (en magenta) et des ondes de vibrations (flèches rouges) générées par les appareils de positionnement (en vert) dans les domaines [T-X] (gauche) et [F-K] (droite).

Les traitements sismiques conventionnels ne permettent pas d'atténuer efficacement ces vibrations. Ainsi, différentes méthodes ont été développées pour prédire le signal sismique des accéléromètres à partir des capteurs de pression beaucoup moins bruités [6][7]. Cependant, ces techniques ne fonctionnent pas en dessous de 25 Hz à cause du faible rapport signal à bruit dans cette gamme de fréquences. De plus, leurs performances sont limitées pour les fréquences atténuées par les fantômes de l'hydrophone. Pour ces raisons, nous proposons une approche différente afin de retrouver le signal sismique sur toute la bande de fréquences. La méthode proposée se concentre sur les vibrations qui sont estimées à partir d'un nouveau modèle physique puis soustraites aux données.

3 Proposition d'un nouveau modèle de propagation atténuatif et dispersif

Les modèles utilisés classiquement pour décrire la propagation des ondes de vibrations sont simplistes. En effet, ils assimilent la flûte à une poutre immobile sans friction [9][7]. Les vibrations décrites par ces modèles se propagent sans atténuation et à la même vitesse vers la tête et la queue du câble contrairement à ce que l'on observe sur les données réelles enregistrées par les nouvelles flûtes multi-capteurs. Récemment, nous avons réussi à expliquer la différence de vitesse entre ces deux directions en prenant en compte la vitesse de traction de la flûte U_0 [8]. Dans cet article, nous proposons d'améliorer ce modèle afin d'expliquer l'atténuation des vibrations lors de leur propagation le long de la flûte. Aussi, nous introduisons les forces de traînées s'opposant au déplacement transverse du câble.

En utilisant l'expression proposée par Lighthill [5] et en l'injectant dans le modèle déjà proposé [8], nous obtenons la relation de dispersion suivante pour les ondes de vibrations :

$$EI k^4 + (T(x) - \sigma U_0^2) k^2 - (2\sigma U_0 \omega - j \frac{2\sigma U_0^2 C_N}{d}) k - 2\sigma \omega^2 + j \frac{2\sigma U_0 C_N \omega}{d} = 0 \quad (1)$$

avec k le nombre d'onde, ω la pulsation, EI le module de rigidité en flexion, T la tension mécanique variant le long de l'axe x de la flûte, σ la masse par unité de longueur, C_N le coefficient de friction et d le diamètre de la flûte.

Cette équation admet 4 nombres d'ondes complexes solutions. Parmi elles, deux correspondent à des ondes évanescentes qui ne seront pas considérées et deux à des ondes se propageant vers la queue k^+ et vers la tête k^- du câble. La figure 2 présente ces deux solutions en fonction de la fréquence et pour différentes tensions mécaniques que l'on observe typiquement en tête (20 kN en noir), au centre (12.5 kN en bleu) et en queue (5 kN en rouge) de la flûte. On observe que la vitesse $v_p = \omega / \Re(k^\pm)$, présentée en haut de la figure 2, est dispersive et augmente fortement avec la tension. On remarque également que les ondes se propageant vers la queue k^+ (traits pleins) se déplacent légèrement plus vite que les ondes se propageant vers la tête k^- (traits pointillés). En bas de la figure 2, on présente le gain $e^{-12.5j\Im(k^\pm)}$ sur une distance séparant deux capteurs (12.5 mètres) en fonction de la fréquence. Conformément au comportement physique attendu, l'atténuation est plus importante pour les hautes fréquences et, comme pour la vitesse, on fait apparaître des différences de comportement en fonction de la tension et de la direction

des ondes. Ainsi, l'atténuation augmente lorsque la tension diminue. De plus, les ondes se propageant vers la tête du câble sont plus atténuées que celles se propageant en sens inverse. Ces propriétés révèlent des caractéristiques beaucoup plus complexes que celles des modèles existants sans atténuation. Dans le paragraphe suivant, nous verrons comment ce modèle est exploité pour estimer les vibrations.

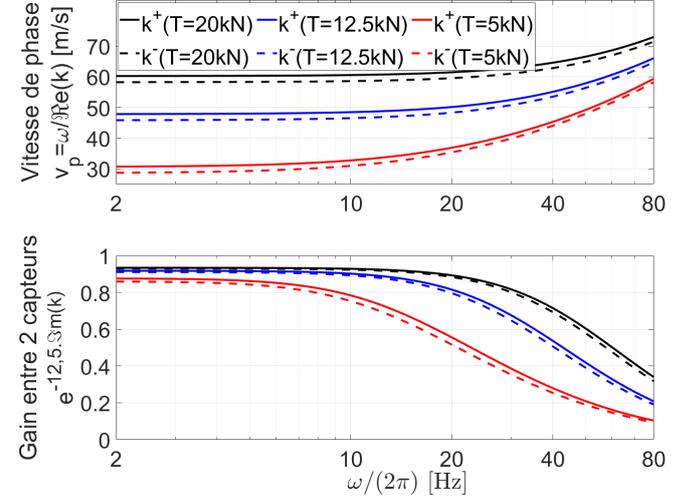


FIGURE 2 : Vitesse (haut) et gain (bas) des ondes de vibrations solutions de l'équation 1 en fonction de la fréquence et pour différentes tensions mécaniques.

4 Estimation des ondes de vibrations dans le domaine $\omega - x$

Les vibrations sont estimées dans le domaine $\omega - x$ dans lequel leur propagation est décrite par le modèle proposé (eq. 1). Les données accéléromètres à la pulsation ω et à la position x , notées $d_{\omega,x}$, résultent de la somme des vibrations $u_{\omega,x}^+$ et $u_{\omega,x}^-$, se propageant respectivement vers les x croissants et décroissants, et des autres contributions (sismique et bruits non-vibratoires) notées $n_{\omega,x}$.

Les ondes de vibrations sont générées par les appareils de positionnement montés le long de la flûte. Nous estimons donc ces bruits sur un ensemble de capteurs situés entre deux appareils (une section). Ainsi, pour la section l regroupant les N_l accéléromètres aux positions $x_l = x_1^l, \dots, x_{N_l}^l$, le vecteur des données à la pulsation ω , noté $\mathbf{d}_\omega = [d_{\omega,x_1^l} \ \dots \ d_{\omega,x_{N_l}^l}]^T$, est égal à :

$$\mathbf{d}_\omega = \mathbf{u}_\omega + \mathbf{n}_\omega \quad (2)$$

avec \mathbf{u}_ω le vecteur des ondes transverses se propageant dans les deux directions et dont la i -ème composante est égale à $u_{\omega,x_i^l}^+ + u_{\omega,x_i^l}^-$.

L'équation 1 décrit les caractéristiques de propagation (vitesse et atténuation) des vibrations en fonction de quelques paramètres. Certains sont connus et constants ; c'est le cas du diamètre d de la flûte et de sa masse linéique σ . D'autres sont constants mais non connus, c'est le cas de EI , U_0 et C_N . Enfin, la tension mécanique est non connue et varie le long de la flûte. Cependant, il a été démontré qu'elle décroît linéairement [2].

Ainsi, on adopte l'expression $T(x) = \Delta_T x + T_0$ avec Δ_T la variation de tension par mètre et T_0 la tension mécanique à la position $x = 0$. Finalement, les caractéristiques de propagation des vibrations ne dépendent que de 5 paramètres physiques inconnus que l'on note $\mathbf{p} = [EI \ U_0 \ C_N \ \Delta_T \ T_0]$. Ces paramètres sont utilisés pour construire la matrice des propagateurs \mathbf{P}_ω qui permet de propager $u_{\omega,0}^+$ et $u_{\omega,0}^-$ les vibrations générées par les appareils de positionnement et se propageant respectivement vers les x croissants et décroissants. Ainsi on a :

$$\mathbf{u}_\omega = \mathbf{P}_\omega \begin{bmatrix} u_{\omega,0}^+ \\ u_{\omega,0}^- \end{bmatrix}; \mathbf{P}_\omega = \begin{pmatrix} P_{\omega,x_1}^+ & P_{\omega,x_1}^- \\ \vdots & \vdots \\ P_{\omega,x_{N_l}}^+ & P_{\omega,x_{N_l}}^- \end{pmatrix} \quad (3)$$

avec $P_{\omega,x_i}^+ = e^{jk^+(\mathbf{p},\omega,x_i)x_i}$ qui permet de propager $u_{\omega,0}^+$ jusqu'à la position x_i ($u_{\omega,x_i}^+ = P_{\omega,x_i}^+ u_{\omega,0}^+$).

Si la matrice des propagateurs \mathbf{P}_ω est connue, l'estimateur au sens des moindres carrés des ondes de vibrations noté $\hat{\mathbf{u}}_\omega$, a pour expression :

$$\hat{\mathbf{u}}_\omega = \mathbf{P}_\omega (\mathbf{P}_\omega^H \mathbf{P}_\omega)^{-1} \mathbf{P}_\omega^H \mathbf{d}_\omega \quad (4)$$

L'équation 4 permet d'estimer, pour chaque pulsation et pour chaque section, les vibrations qui sont ensuite soustraites aux données afin de les débruiter. La vitesse et l'atténuation des ondes estimées correspondent aux racines de l'équation 1 et dépendent des paramètres \mathbf{p} . Ainsi, ils doivent être estimés à partir des données.

5 Estimation des paramètres du modèle

Nous proposons d'estimer les paramètres $\hat{\mathbf{p}}$ sur une gamme de pulsations en minimisant l'erreur entre les données et les vibrations estimées. Ainsi, les paramètres optimaux sont obtenus en résolvant :

$$\hat{\mathbf{p}} = \arg \min_{\mathbf{p}} \sum_{\omega} \|\mathbf{d}_\omega - \hat{\mathbf{u}}_\omega(\mathbf{p})\|_2^2 \quad (5)$$

qui se simplifie en injectant l'estimation des vibrations précédemment obtenue (eq. 4) :

$$\hat{\mathbf{p}} = \arg \min_{\mathbf{p}} \sum_{\omega} \mathbf{d}_\omega^H (\mathbf{I}_d - \mathbf{P}_\omega (\mathbf{P}_\omega^H \mathbf{P}_\omega)^{-1} \mathbf{P}_\omega^H) \mathbf{d}_\omega \quad (6)$$

Ce problème non linéaire est résolu par descentes de gradients calculés numériquement. Nous disposons de bons a priori sur les paramètres physiques $\hat{\mathbf{p}}$ grâce à la connaissance mécanique du streamer et à des capteurs externes. Pour tous les jeux de données testés nous avons constaté une convergence rapide. Des travaux sont en cours pour étudier la sensibilité de la méthode à l'initialisation des paramètres.

6 Résultats

L'estimation des ondes de vibrations a été évaluée sur des données enregistrées en 2015 lors d'une campagne sismique en mer du Nord. Nous avons d'abord testé la méthode sur

des acquisitions sans signal sismique composées uniquement de bruits (vibrations et autres types). Le résultat de l'estimation, pour une section représentative des performances de la méthode, est présenté en figure 3. La colonne de gauche correspond aux données accéléromètres, la colonne du milieu à l'estimation des vibrations et la colonne de droite à leur différence. Le panneau supérieur montre les données sur une période de 20 s et pour toute la bande de fréquences. Les bruits sont très bien estimés puisque l'Erreur Quadratique Moyenne Normalisée (EQMN) n'est que de 4,1 %. Cette excellente estimation est confirmée dans le domaine [F-K] présenté sur les panneaux du bas. En effet, les vibrations sont correctement estimées sur l'ensemble de la bande de fréquences et ce malgré le fort repliement spectral. Ainsi, on observe en dessous de 15 Hz, un gain d'environ 20 dB entre les données et le signal débruité. Au dessus de 25 Hz, à cause de leurs fortes atténuations, les vibrations sont moins énergétiques cependant la méthode proposée parvient à les estimer correctement avec un gain d'environ 3 dB.

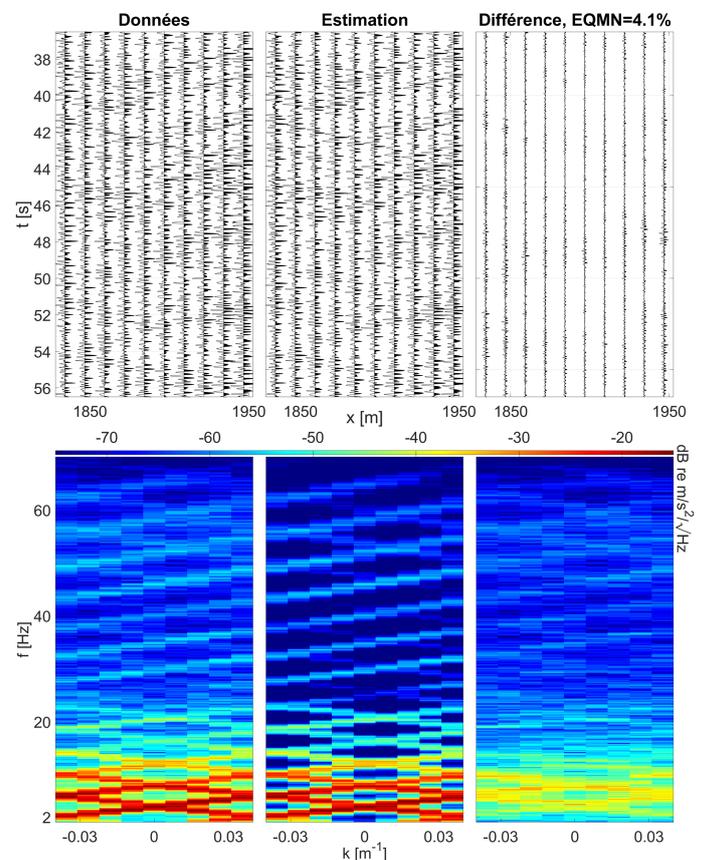


FIGURE 3 : À gauche données réelles sans signal sismique, au milieu l'estimation des vibrations et à droite la différence, dans le domaine [T-X] (haut) et [F-K] (bas).

Nous avons ensuite étudié des données enregistrées lors d'acquisitions avec des tirs sismiques qui constituent le signal utile. Le résultat de l'estimation réalisée sur plusieurs sections, couvrant une longueur de 3 km, est présenté en figure 4. Dans le domaine [T-X], on remarque que la différence fait apparaître les réflexions sismiques, entourées en traits pointillés magenta, de façon beaucoup plus nette que sur les données. De plus, on note que l'estimation des vibrations ne fait pas

apparaître ces motifs. On montre ainsi qu'il n'y a pas de fuites du signal sismique dans l'estimation. Le résultat est également présenté dans le domaine [F-K]. En dessous de 25 Hz, on obtient des performances similaires à celles observées sur des données sans sismique. Ainsi, les vibrations sont atténuées d'environ 20 dB et le signal sismique apparaît clairement entre 15 Hz et 25 Hz. Cela représente une avancée significative puisqu'actuellement, les données accéléromètres ne sont pas utilisées dans cette bande à cause des bruits trop importants. Au-dessus de 30 Hz, on remarque un niveau de bruit important que l'on ne constatait pas sur les données sans sismique. En effet, l'arrivée sismique excite les appareils de positionnement qui génèrent alors des vibrations à ces fréquences. Dans le domaine [F-K], ces vibrations apparaissent moins nettement en hautes fréquences à cause de leur forte atténuation. Cependant, la différence montre qu'elles sont en grande partie supprimées et cela sans endommager le signal sismique.

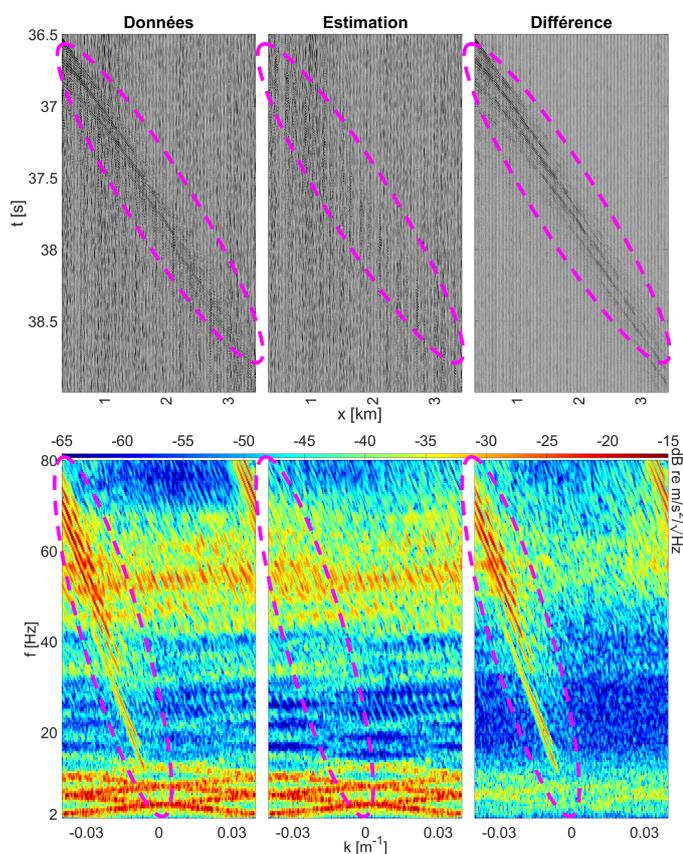


FIGURE 4 : À gauche données réelles avec signal sismique utile (traits pointillés magenta), au milieu l'estimation des vibrations et à droite la différence, dans le domaine [T-X] (haut) et [F-K] (bas).

7 Conclusions

Les vibrations générées par les appareils de positionnement sont la principale source de bruit des accéléromètres des nouvelles flûtes sismiques tractées. Ces ondes se déplacent à faible vitesse et avec une forte atténuation. Dans cet article, nous avons proposé un nouveau modèle pour décrire leur propagation. Contrairement aux modèles existants, il tient compte

des forces de traînées et permet d'expliquer l'atténuation des vibrations le long du câble. Les caractéristiques du nouveau modèle évoluent en fonction de la fréquence et de 5 paramètres physiques qui sont estimés directement à partir des données. Ces paramètres permettent de connaître les caractéristiques de propagation des bruits de vibrations et ainsi de les estimer sur toute la longueur de la flûte et toute la bande de fréquences. Comme nous l'avons montré sur les données terrain, cette méthode de débruitage exhibe de très bonnes performances et cela sans dégrader le signal sismique. Ainsi, en dessous de 25 Hz le gain est de 20 dB alors que les méthodes classiquement utilisées ne permettent pas de traiter cette bande de fréquences.

Enfin, l'estimation des paramètres physiques de la flûte offre de nombreuses perspectives. En effet, les opérateurs des câbles ont besoin d'informations opérationnelles telles que l'estimation en temps réel de la tension mécanique de la flûte ou des informations sur le vieillissement des câbles. Ainsi, ces paramètres seront utilisés pour fournir ces informations à fortes valeurs ajoutées.

Références

- [1] A. DAY, T. KLÜVER, W. SÖLLNER, H. TABTI et D. CARLSON : Wavefield-separation methods for dual-sensor towed-streamer data. *GEOPHYSICS*, 78(2):WA55–WA70, 2013.
- [2] A. P. DOWLING : The dynamics of towed flexible cylinders part 1. neutrally buoyant elements. *Journal of Fluid Mechanics*, 187:507–532, 1988.
- [3] Volodya HLEBNIKOV, Thomas ELBOTH, Vetle VINJE et Leiv-J. GELIUS : Noise types and their attenuation in towed marine seismic : A tutorial. *GEOPHYSICS*, 86(2):W1–W19, 2021.
- [4] L. HUANGFU, H. CHEN, X. SHAN, H. ZHANG, J. LI, Y. JU, T. MA et J. REN : Inversion with acceleration data : Theoretical development and numerical implementation. *OCEANS - Marseille*, pages 1–6, 2019.
- [5] M.J. LIGHTHILL : Note on the swimming of slender fish. *Journal of Fluid Mechanics*, 9(2):305–317, oct 1960.
- [6] G. POOLE et J. COOPER : Multi-sensor receiver deghosting using data domain sparseness weights. *EAGE Expanded Abstracts*, 2018(1):1–5, 2018.
- [7] C. SANCHIS et T. ELBOTH : Multicomponent streamer noise characteristics and denoising. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, pages 4183–4187, 2014.
- [8] V. SMIRNOV, A. SOURICE, J. RIBETTE, J. MARS et P. HERRMANN : Characterization and simulation of transverse noise waves of a multisensor solid streamer. *Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy*, pages 95–99, 2022.
- [9] Ø. TEIGEN, A.K. ÖZDEMIR, B. KJELLESVIG, N. GOJON et J. PABON : Characterization of noise modes in multicomponent (4c) towed streamers. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, pages 1–5, 2012.