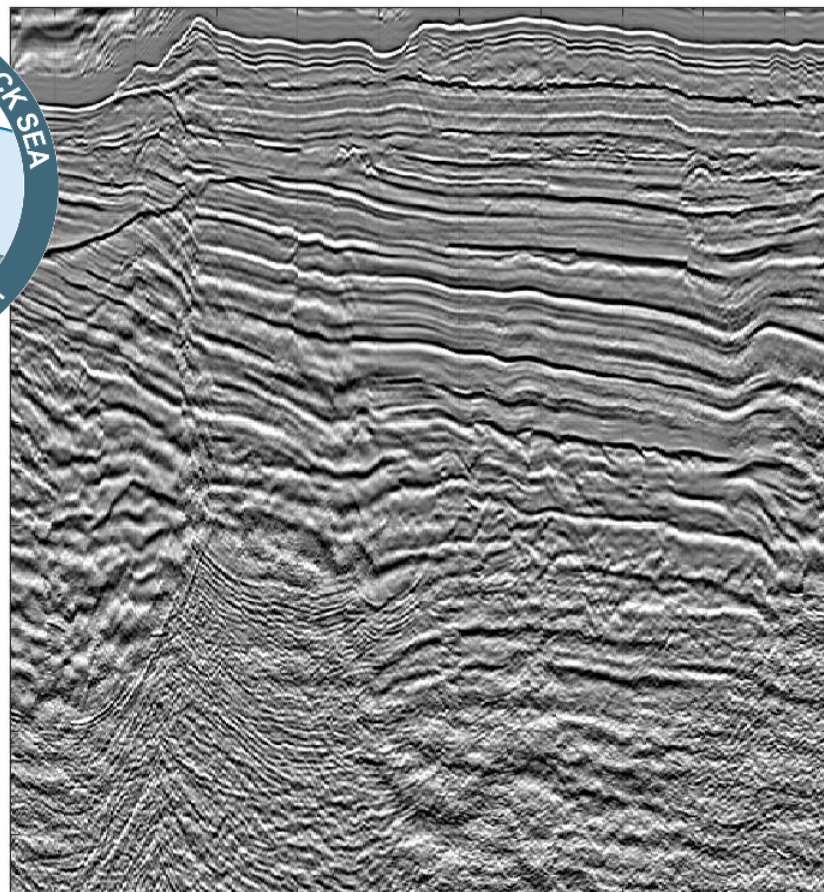
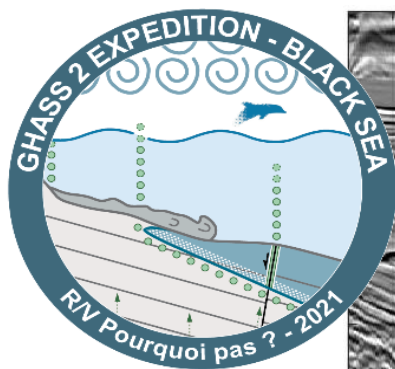


GHASS2 – Traitement des données de sismique multitrace

Analyse de vitesse RMS et imagerie avec migration après sommation



Fiche documentaire

| | |
|--|--|
| Titre du rapport : GHASS2 - Traitement des données de sismique multitrace Analyse de vitesse RMS et imagerie avec migration après sommation | |
| Référence interne : REM/GEOOCEAN/ANTIPOD-21092023-01 Diffusion : <input checked="" type="checkbox"/> libre (internet) <input type="checkbox"/> restreinte (intranet) – date de levée d’embargo : AAA/MM/JJ <input type="checkbox"/> interdite (confidentielle) – date de levée de confidentialité : AAA/MM/JJ | Date de publication : 2023/09/21 Version : 1.0.0 Référence de l’illustration de couverture Section sismique « Basse Fréquence » acquise pendant la campagne GHASS2 et traitée par GEOOCEAN/ANTIPOD (Ifremer©) Langue(s) : Français |
| Résumé/ Abstract : traitement exhaustif de l’ensemble des profils sismiques Haute Résolution (source HR 24 ci, streamer 3000 m) et « Basse Fréquence » (source SIS1 480 ci, streamer 6000 m) acquis pendant la campagne GHASS2 (2021, N/O Pourquoi Pas ?, mer Noire, DOI 10.17600/18001358), incluant une première caractérisation des vitesses de propagation. | |
| Mots-clés/ Key words : sismique réflexion Haute Résolution, sismique réflexion Basse Fréquence, long offset, analyse de vitesse RMS, anti-multiple SRME | |
| Comment citer ce document : Thereau Estelle et Thomas Yannick (2023). GHASS2 - Traitement des données de sismique multitrace - Analyse de vitesse RMS et imagerie avec migration après sommation. REM/GEOOCEAN/ANTIPOD-21092023-01. | |
| Disponibilité des données de la recherche : voir en annexe 4 – livrables et archives | |

Fiche documentaire (suite)

| | |
|---|---|
| Nom / référence du contrat : <input type="checkbox"/> Rapport intermédiaire <input checked="" type="checkbox"/> Rapport définitif (réf. interne du rapport intermédiaire : PDG/REM/GM/LAD-24112021-01) | |
| Projets dans lesquels ce rapport s'inscrit (programme européen, campagne, etc.) : ANR-18-CE01-0007 BLAME | |
| Auteur(s) / adresse mail | Affiliation / Direction / Service, laboratoire |
| Estelle THEREAU, ethereau@ifremer.fr | IFREMER REM-GEOOCEAN-ANTIPOD |
| Yannick THOMAS, thomasy@ifremer.fr | IFREMER REM-GEOOCEAN-ANTIPOD |

Sommaire

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| 1. Introduction - objectifs | 6 |
| 2. Rappel sur les équipements sismiques mis en œuvre | 8 |
| 2.1. Sismique Haute résolution | 8 |
| 2.1.1. Réception - Streamer HR « long » offset | 8 |
| 2.1.2. Source Haute Résolution..... | 9 |
| 2.1.3. Données sismiques HR acquises | 11 |
| 2.2. Sismique SIS1 480 ci..... | 14 |
| 2.2.1. Réception – Streamer SIS1 – 960 traces | 14 |
| 2.2.2. Source SIS1 480 ci | 15 |
| 2.2.3. Données de sismique SIS1 acquises..... | 17 |
| 3. Traitement des données HR | 20 |
| 3.1. Correction du délai source – sismique HR | 20 |
| 3.2. Traitement des capteurs de navigation – sismique HR | 21 |
| 3.3. Traitement du positionnement – sismique HR | 24 |
| 3.4. Reformatage des données sismiques HR..... | 27 |
| 3.5. Imagerie à vitesse constante – sismique HR..... | 28 |
| 3.6. Edition des traces bruitées – sismique HR..... | 28 |
| 3.7. Analyse du signal sismique HR..... | 38 |
| 3.8. Analyse de vitesses RMS et sommation – sismique HR..... | 41 |
| 4. Traitement des données SIS1 480 ci | 47 |
| 4.1. Délai source – sismique SIS1 | 47 |
| 4.2. Traitement des capteurs de navigation – sismique SIS1 | 47 |
| 4.3. Traitement du positionnement – sismique SIS1 | 52 |
| 4.4. Reformatage des données sismiques SIS1..... | 56 |
| 4.5. Imagerie à vitesse constante – sismique SIS1..... | 56 |
| 4.6. Edition des traces bruitées – sismique SIS1..... | 57 |
| 4.7. Analyse du signal sismique SIS1..... | 60 |
| 4.8. Analyse de vitesse RMS et sommation – sismique SIS1 | 65 |
| 4.9. Traitement anti-multiple – sismique SIS1 | 68 |
| 5. Résultats et perspectives | 72 |
| 5.1. Imagerie Haute Résolution | 72 |
| 5.2. Imagerie SIS1 BF..... | 74 |
| 5.3. Illustrations et discussions | 76 |

| | |
|---|------------|
| Annexe 1 – Séquences de traitement..... | 81 |
| Séquence de traitement HR | 81 |
| Séquence de traitement SIS1 BF | 82 |
| Annexe 2 - Adaptations du logiciel d'analyse de vitesse | 83 |
| Annexe 3 – Traitement anti-multiple SRME – Sismique SIS1 BF..... | 87 |
| Annexe 4 – Livrables et archives | 96 |
| Liste des figures | 102 |

1. Introduction - objectifs

Les acquisitions de sismique réflexion réalisées pendant la campagne GHASS2 (2021, N/O Pourquoi Pas ?) avaient pour but de densifier et d'étendre la zone couverte par les précédentes acquisitions de sismique Haute Résolution (HR) lors de la campagne GHASS en mer Noire sur la marge roumaine (2015, N/O Pourquoi Pas ?). La mission GHASS2 a bénéficié de la refonte des équipements sismiques d'Ifremer-Genavir réalisée entre 2014-2019 : allongement des récepteurs et refonte complète de la source Basse Fréquence (BF). La mission a également bénéficié de l'expérience nouvellement acquise en sismique HR avec de grands dépôts source-récepteur dans le cadre d'un partenariat débuté en 2019 avec le SHOM (première campagne d'acquisition sismique HR long offset). La source HR mise en œuvre est strictement identique à celle de la campagne de 2015 (1 canon mini-GI). La refonte de la source HR est intervenue en 2022, après GHASS2.

Avec la mise en œuvre de flûtes de réception de 3000 et 6000 m, les capacités de caractérisation des sédiments et du système gaz / hydrates de gaz de la mer Noire sont largement améliorées. Lors de la première campagne GHASS, la longueur du récepteur était limitée à 600 m.

La campagne GHASS2 a permis l'acquisition de 1000 km de sismique HR et 470 km de sismique BF (contre 340 km de sismique HR en 2015). Le volume de données sismiques représente 15 fois le volume de la première campagne. Les bonnes conditions de mer ont permis d'acquérir des données de très bonne qualité ; les équipements n'ont connu aucune panne.

Le « seul » point négatif de la mission GHASS2 a été l'impossibilité de mettre en œuvre la source BF de volume 2570 ci (42 litres) initialement prévue, du fait de la présence continue de dauphins sur la zone. Une source alternative moins puissante, nommée SIS1 480 ci, a dû être mise en œuvre (480 ci, soit 8 litres) avec un niveau d'émission théorique plus faible de 12 dB (réf. 1 μ Pa at 1 m). Le contenu fréquentiel de cette source alternative reste cependant relativement basse fréquence, fréquence centrale de l'ordre de 55 Hz, comparé à la source HR (de l'ordre de 150 Hz). Les objectifs d'imagerie des éventuels réservoirs de gaz profonds et des chemins de migration ont donc été sérieusement compromis.

L'objet de ce travail est un traitement exhaustif de l'ensemble des profils sismiques multitrace acquis pendant GHASS2, incluant une première caractérisation des vitesses de propagation. Après un traitement complet et définitif des capteurs de navigation, l'ensemble des positions sources et récepteurs est dans un premier temps estimé avec une précision meilleure que la distance inter-trace de 6.25 mètres. La source HR est également corrigée du délai de déclenchement des canons (étape inutile pour la sismique SIS1 480 ci, les données étant enregistrées zéro délai). L'ensemble des traces acquises (67 millions) est analysé en terme de niveau de bruit et d'anomalies pour éditer les traces les plus bruitées. Après le tri et le reformatage des données, des panneaux de semblance sont calculés tous les 250 à 500 mètres et servent au pointé manuel des lois de vitesse RMS le long des profils (2330 lois pointées en sismique HR, 930 lois pointées en sismique BF). Ces pointés de vitesse permettent de produire des sections de vitesses d'intervalle. Les vitesses RMS sont ensuite utilisées pour sommer les traces (NMO+stack) qui sont ensuite migrées en temps pour obtenir les sections sismiques traitées. Pour le cas des données SIS1 480 ci qui visent une pénétration maximale, les arrivées multiples du fond de l'eau doivent être atténuées. Une séquence de traitement de type SRME (Surface-Related Multiple Elimination) a été appliquée à

l'aide du logiciel Promax sur tous ces profils. Le volume important de ces données SIS1 480 ci (960 traces) a nécessité au préalable de les ré-échantillonner en temps et en trace avant de procéder à l'atténuation des multiples.

Deux profils acquis à la fois en sismique HR et sismique SIS1 480 ci pendant la campagne GHASS2 permettent de contrôler la cohérence des résultats et de comparer la résolution et la pénétration des deux sismiques.

Les résultats obtenus en terme de modèles de vitesse sont illustrés ; ils montrent un gain d'information par rapport aux données de la campagne GHASS. Les limites en terme de qualité et résultats obtenus pour ces données traitées de sismique HR et SIS1 480 ci sont également discutées.

2. Rappel sur les équipements sismiques mis en œuvre

Les équipements sont détaillés dans le compte-rendu d'acquisition sismique de la mission GHASS2 (N/O *Pourquoi Pas ?*). La description ci-dessous n'est qu'un rappel des éléments essentiels. Deux types de sismique ont été mis en œuvre :

- la sismique Haute Résolution (HR, source de 24 ci) long offset (streamer de 3000 m) pour la caractérisation du système gaz / hydrates de gaz ;
- la sismique SIS1 (source de 480 ci) avec un streamer de 6000 m de long pour l'imagerie plus basse fréquence des structures profondes ;

2.1. Sismique Haute résolution

Le dispositif sismique HR est comparable à celui mis en œuvre durant la première campagne GHASS de 2015 : la source est composée d'un canon mini-GI unique. Mais lors de la campagne de 2021, la longueur du streamer mis en œuvre était de 3000 m (480 traces sismiques) contre 600 m (96 traces) en 2015. Les nouvelles données HR acquises sont donc comparables à celles de 2015 en terme de résolution, mais l'allongement du streamer augmente fortement les capacités de caractérisation du milieu de propagation.

2.1.1. Réception - Streamer HR « long » offset

Un *streamer* solide SERCEL (SENTINEL® Solid Acquisition Sections RD) de 3000 m a été mis en œuvre. Il comprend 480 traces sismiques à inter-trace de 6.25 m enregistrées par le système d'acquisition sismique SEAL428 (SERCEL).

Les conditions de mer ont permis de maintenir le *streamer* à seulement 2 mètres d'immersion en ajustant la longueur filée de *lead-in* à 50 m depuis le tableau arrière et avec la mise en œuvre de 21 contrôleurs d'immersion (DigiBIRD®, ION ; logiciel DIGICOURSE) disposés tous les 150 mètres (en queue de tronçons actifs). Les contrôleurs fournissent également une mesure de cap compas magnétique utilisée pour le positionnement du streamer.

Point "d'ancrage" du *streamer* par rapport au point de référence du navire (N/O *Pourquoi Pas?*) :

- $dx = 0$ (la poulie soutenant le *lead-in* est centrée sur l'axe du navire) ;
- $dy = -39.8$ m (tableau arrière, référence pour la longueur filée de *lead-in*) ;

La longueur totale du *streamer* tractée derrière le navire depuis le point "d'ancrage" est de l'ordre de 3195 m jusqu'au GPS de la bouée de queue. Le streamer est dans l'axe du navire avec une distance tableau arrière – centre première trace de 95.4 m.

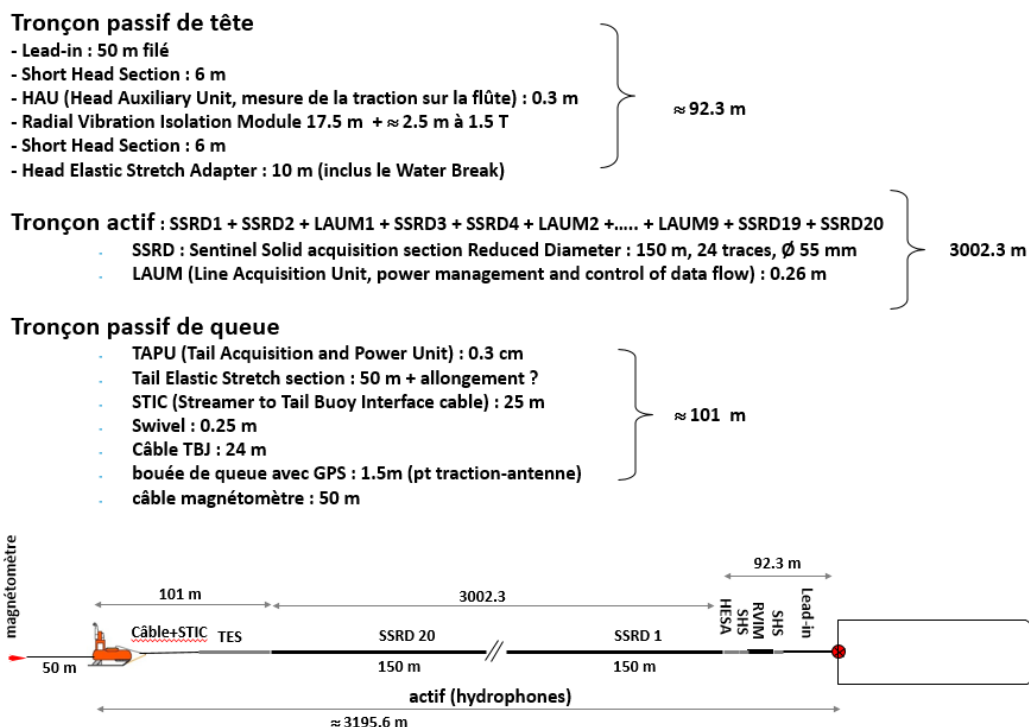


Figure 1. Longueurs des éléments du streamer sismique Haute Résolution de GHASS2 – 3000 m de tronçons actifs.

2.1.2. Source Haute Résolution

La source HR est formée d'une barre de 3 canons mini-GI 24/24 ci tractée sur bâbord. Un seul canon est actif ; les deux autres servent de rechange en cas de panne. L'immersion des canons est de l'ordre de 2 m. La mission n'ayant connu aucune panne, tous les profils ont été acquis avec le canon en tête de barre. Le volume total mis en œuvre est donc de 48 ci avec une cadence de tir variant de 3 à 5 secondes selon la bathymétrie.

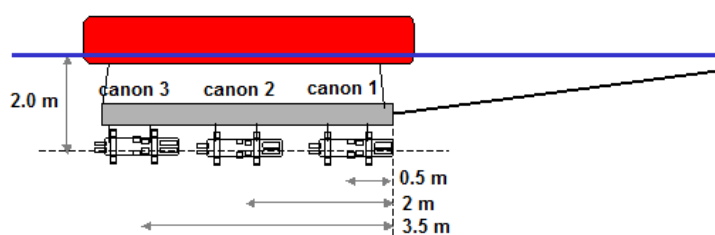


Figure 2. Géométrie d'une barre de source HR de 3 canons mini-GI.

La source est déportée sur bâbord, le bout de traction passant par le chaumard du tableau arrière. La longueur filée du bout de traction est de 20 m au tableau arrière, à laquelle s'ajoute la distance du point de traction au premier canon, seul canon actif.

L'enregistrement des données n'est pas « zéro délai » : il existe un délai entre l'ordre de tir donné par le système ECOS (Genavir) et le tir réel du canon, inhérent au mode de fonctionnement de la source. Le délai est mesuré précisément par pointé du signal hydrophone Time Break (fixé contre le canon) et vérifié à l'aide de l'arrivée directe sur les données sismiques.

Les principales caractéristiques de la signature champ lointain de la source HR sont les suivantes :

Amplitude 0-Pk 2.3 bar (227.3 dB réf. μPa à 1 mètre)

Amplitude Pk-Pk 4.1 bar

Ratio Pk/Bulle : 32.7

Bande passante à -6dB : 10-281 Hz (fréquence centrale ≈ 145 Hz)

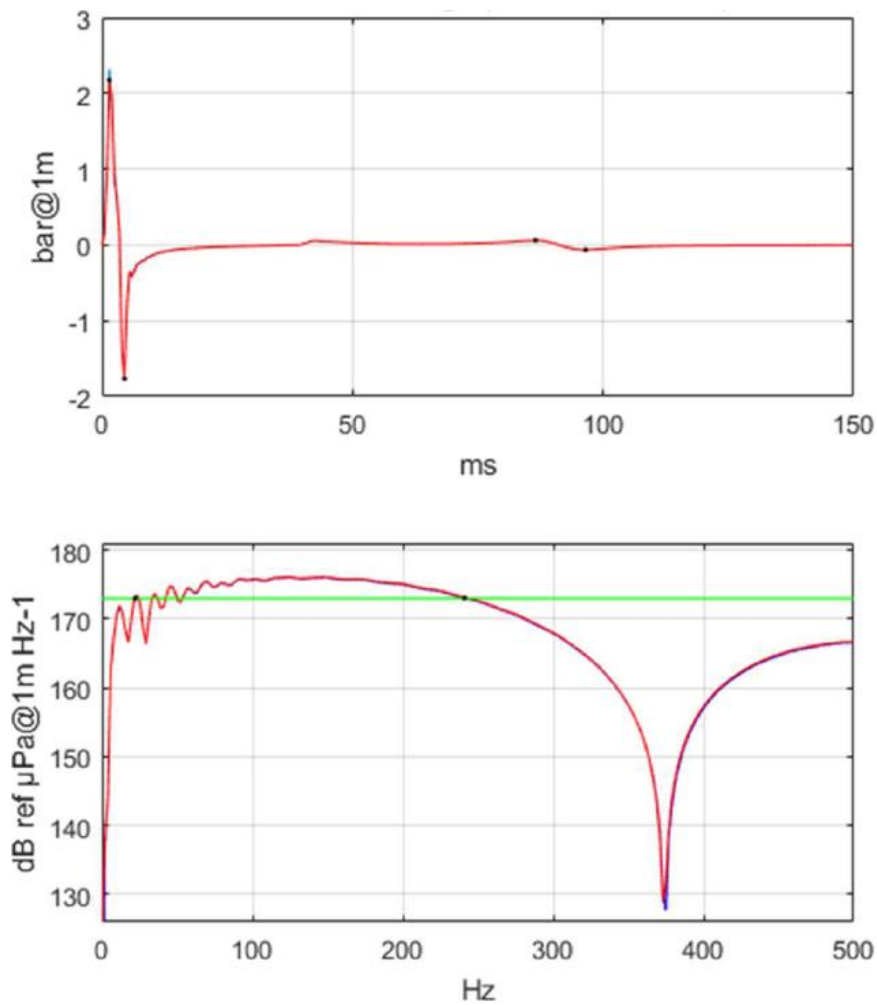


Figure 3. Caractéristiques du signal source HR (modélisation Gundalf®) pour un canon mini-GI 24/24 ci immergé à 2 m, et une pression de 140 bars ; signature champs lointain à incidence normale, filtre passe-bas à 800 Hz. Graphe du haut: signal temporel (polarité : pic positif = augmentation de pression) ; graphe du bas : spectre d'amplitude.

Les offsets théoriques [centre source – centres traces] varient de 75.5 à 3069 m (hypothèse *streamer* et câble source rectilignes).

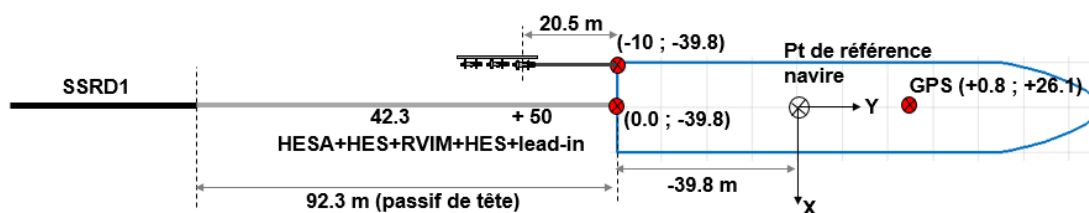


Figure 4. Géométrie d'acquisition théorique du dispositif de sismique Haute Résolution déployé pendant la campagne GHASS2 à bord du N/O Pourquoi Pas ?

2.1.3. Données sismiques HR acquises

Les paramètres d'acquisition sont les suivants :

- Fréquence d'échantillonnage : 2 kHz (0.5 ms)
- Délai à l'enregistrement : 0 s
- Cadence de tir : variable, de 3 à 5 s
- Longueur d'enregistrement : variable, de 2.75 s à 4.5 s
- Gain 2 : gain de 12 dB, amplitude maximale RMS de 400 mV
- Filtre anti-repliement : 0.8 LIN x fréquence de Nyquist (soit 800 Hz)
- Filtre passe-haut digital : OFF

Les traces auxiliaires sont définies comme suit (TB = hydrophone Time Break) :

- Aux 1 à 3 : non utilisées
- Aux 4 : TB canon 1 bâbord 24/24 ci (tête de la barre) – canon actif
- Aux 5 : TB canon 2 bâbord 24/24 ci (milieu de la barre) – canon de recharge
- Aux 6 : TB canon 3 bâbord 24/24 ci (queue de la barre) – canon de recharge

Seule la trace auxiliaire n°4 sera donc exploitée.

21 profils de sismique HR ont été acquis (profils 22 à 42).

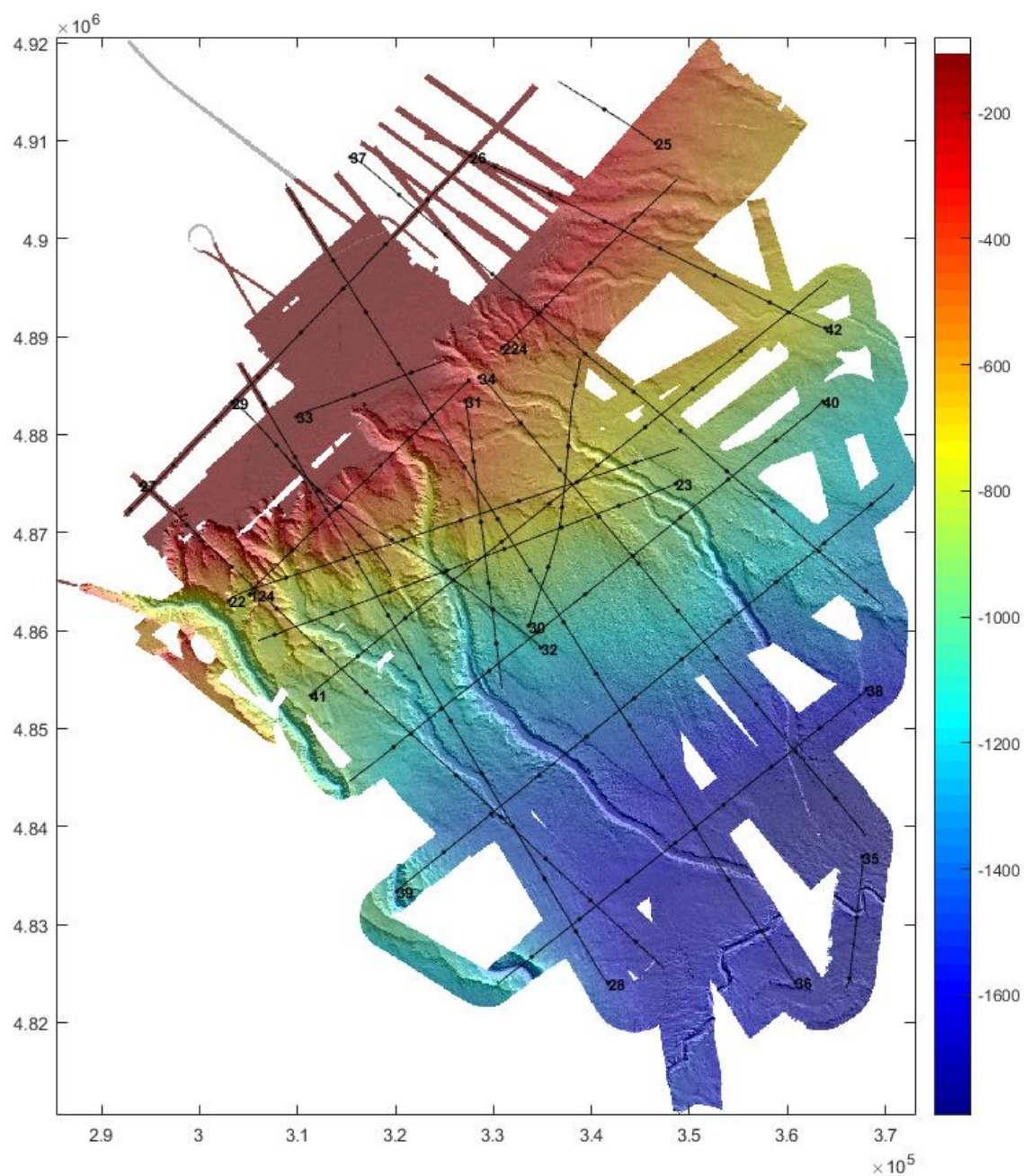


Figure 5. Localisation des profils sismiques HR acquis lors du leg 1 de la campagne GHASS2 ; projection UTM zone 36T ; bathymétrie issue des campagnes GHASS (N/O Pourquoi Pas ?, 2015) et GHASS2 (N/O Pourquoi Pas ?, 2021), traitement GEOOCEAN/ANTIPOD.

| N° Profil | Tirs | Date | Cap fond moyen (°) | Bathy (m) | Vitesse surf. moy. (Nds) | Longueur (km) | Δtir temps (s) | Record Time (s) | Localisation | Commentaires | |
|-----------|------------|--------|--------------------|-----------|--------------------------|---------------|----------------|-----------------|--------------|--|---|
| 22 | GH2_HR22.1 | 1-5121 | 22-Aug-2021 | 70 | 521-862 | 5,1 | 47.3 | 4 | 3.5 | Transverse Zone Crête | Interférences sismiques à partir du tir 3004 jusqu'à la fin du profil : autre bateau sismique (PGS) dans le Nord-Est de la zone |
| 23 | GH2_HR23.1 | 1-4183 | 22/23-Aug-2021 | 248 | 654-962 | 5 | 44.4 | 4 | 3.5 | Transverse Zone Crête | Interférences sismiques du début du profil jusqu'au tir 3085 : autre bateau sismique (PGS) dans le Nord-Est de la zone |
| 24a | GH2_HR24.1 | 1-3250 | 23-Aug-2021 | 44.4 | 221-744 | 5.2 | 30.3 | 4 | 3.5 | Parallèle haut de pente | Bird 1 à 1m ; plantage acquisition (problème de BNC) ; arrêté 40 minutes avant reprise acquisition sur séquence hr24.2 |
| 24b | GH2_HR24.2 | 1-2313 | 23-Aug-2021 | 44.4 | 258-480 | 5.1 | 23.6 | 4 | 3.5 | Parallèle haut de pente | |
| 25 | GH2_HR25.1 | 1-1279 | 23-Aug-2021 | 301 | 154-387 | 5.2 | 10.6 | 3 | 2.75 | Bordure plateau Est | profil en transit |
| 26 | GH2_HR26.2 | 1-6630 | 23-Aug-2021 | 223 | 114-141 | 4.3 | 49.8 | 3 | 2.75 | Transverse plateau | Plantage SEAL au tir 336 ; tir ~540 : recalage d'horloge ECOS suite à alarme |
| 27 | GH2_HR27.2 | 1-7005 | 23/24-Aug | 132 | 121-1674 | 5.1 | 71.6 | 4 | 3.5 | Grand profil ⊥ pente - Zone Ouest | |
| 28 | GH2_HR28.1 | 1-7536 | 24-Aug | 328 | 118-1547 | 5.2 | 72.3 | 4 | 3.9 | Grand profil ⊥ pente - Zone Ouest | Dérive max de la flûte 310 m |
| 29 | GH2_HR29.1 | 1-3786 | 24-Aug | 135 | 120-1243 | 5 | 22.9 | 4 | 3.5 | Profil transverse central | Ecartement "brusque" sur tribord pour éviter la bouée du piézo tirs 2400-3786 ; dérive max de la flûte 288 m |
| 30 | GH2_HR30.1 | 1-2783 | 24-Aug | 9 | 543-1077 | 5 | 26.6 | 4 | 3.5 | Profil transverse central | Ecartement progressif du profil pour éviter un navire en station |
| 31 | GH2_HR31.1 | 1-2838 | 24/25-Aug | 171 | 356-1313 | 4.9 | 28.5 | 4 | 3.5 | Profil transverse central | |
| 32 | GH2_HR32.1 | 1-3447 | 25-Aug | 308 | 125-1165 | 5 | 31.6 | 4 | 3.5 | Profil transverse central | Ecartement progressif du profil pour éviter une bouée piezo |
| 33 | GH2_HR33.1 | 1-2406 | 25-Aug | 68 | 106-258 | 5.1 | 15.3 | 3 | 2.75 | Bordure plateau central | profil en transit |
| 34 | GH2_HR34.1 | 1-5822 | 25-Aug | 139 | 454-1762 | 5 | 59.9 | 4 | 3.9 | Grand profil ⊥ pente - Zone Est | Durée d'enregistrement un peu courte en fin de profil (profondeur d'eau 1762 m) |
| 35 | GH2_HR35.1 | 1-1069 | 25-Aug | 188 | 1658-1732 | 4.9 | 12.3 | 5 | 4.5 | Bassin profond | profil en transit |
| 36 | GH2_HR36.1 | 1-9537 | 25/26-Aug | 327 | 101-1705 | 5.1 | 95.5 | 4 | 3.9 | Grand profil ⊥ pente - Zone central | Dérive max de la flûte 268 m |
| 37 | GH2_HR37.1 | 1-6867 | 26-Aug | 129 | 112-1342 | 5.3 | 70.0 | 4 | 3.5 | Grand profil ⊥ pente - Zone Est | Léger écart de route sur le dernier tiers du profil pour éviter un pétrolier à la dérive |
| 38 | GH2_HR38.1 | 1-3741 | 26-Aug | 230 | 1097-1698 | 5.1 | 47.0 | 5 | 4.5 | Parallèle pente - bassin profond | |
| 39 | GH2_HR39.1 | 1-6319 | 26/27-Aug | 49 | 1060-1509 | 5 | 64.4 | 4 | 3.9 | Parallèle pente - bassin | |
| 40 | GH2_HR40.1 | 1-5865 | 27-Aug | 230 | 901-1326 | 4.9 | 60.8 | 4 | 3.9 | Parallèle pente - limite sud zone centrale | |
| 41 | GH2_HR41.1 | 1-6591 | 27-Aug | 50 | 653-1040 | 5.1 | 66.5 | 4 | 3.5 | Parallèle pente - zone centrale | Dérive max de la flûte de 400 m ; passage sur un volcan de boue en fin de profil |
| 42 | GH2HR42.1 | 1-3898 | 28-Aug | 295 | 111-787 | 4.8 | 40.6 | 4 | 3.5 | Profil ⊥ pente - Zone Est | Nouveau passage sur le volcan de boue en début de profil |

Tableau 1. Liste des profils de sismique Haute Résolution acquis pendant le leg1 de la campagne GHASS2 (N/O Pourquoi Pas ?)

2.2. Sismique SIS1 480 ci

2.2.1. Réception – Streamer SIS1 – 960 traces

Un *streamer* solide SERCEL (SENTINEL® Solid Acquisition Sections RD) de 6000 m a été mis en œuvre. Il comprend 960 traces sismiques à inter-trace de 6.25 m enregistrées par le système d'acquisition sismique SEAL428 (SERCEL).

L'immersion du *streamer* est maintenue à 5 m avec une longueur filée de *lead-in* de 100 m depuis le tableau arrière et la mise en œuvre de 21 contrôleurs d'immersion (DigiBIRD®, ION ; logiciel DIGICOURSE) disposés tous les 300 mètres (en queue de tronçons actifs). Les contrôleurs fournissent également une mesure de cap compas magnétique utilisée pour le positionnement du streamer.

Tronçon passif de tête

- Lead-in : 100 m filé
 - Short Head Section : 6 m
 - HAU (Head Auxiliary Unit, mesure de la traction sur la flûte) : 0.3 m
 - Radial Vibration Isolation Module 17.5 m + ≈ 2.5 m à 1.5 T
 - Short Head Section : 6 m
 - Head Elastic Stretch Adapter : 10 m (inclus le Water Break)
- } ≈ 142.3 m

Tronçon actif : SSRD1 + SSRD2 + LAUM1 + SSRD3 + SSRD4 + LAUM2 +..... + LAUM19 + SSRD39 + SSRD40

- SSRD : Sentinel Solid acquisition section Reduced Diameter : 150 m, 24 traces, Ø 55 mm
 - LAUM (Line Acquisition Unit, power management and control of data flow) : 0.26 m
- } 6005 m

Tronçon passif de queue

- TAPU (Tail Acquisition and Power Unit) : 0.3 cm
 - Tail Elastic Stretch section : 50 m + allongement ?
 - STIC (Streamer to Tail Buoy Interface cable) : 25 m
 - Swivel : 0.25 m
 - Câble TBJ : 24 m
 - bouée de queue avec GPS : 1.5m (pt traction-antenne)
 - câble magnétomètre : 50 m
- } ≈ 101 m

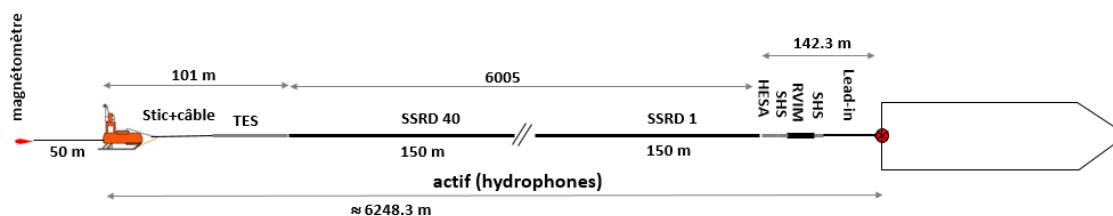


Figure 6. Longueurs des éléments du streamer sismique SIS1 de GHASS2 – 6000 m de tronçons actifs.

Point "d'ancrage" du *streamer* par rapport au point de référence du navire :

- $dx = 0$ (la poulie soutenant le *lead-in* est centrée sur l'axe du navire) ;
- $dy = -39.8$ m (tableau arrière, référence pour la longueur filée de *lead-in*) ;

La longueur totale du *streamer* tractée derrière le navire depuis le point "d'ancrage" est de l'ordre de 6248 m jusqu'au GPS de la bouée de queue. Le *streamer* est dans l'axe du navire avec une distance théorique [tableau arrière – centre première trace] de 145.4 m.

2.2.2. Source SIS1 480 ci

Du fait de la présence continue de dauphins sur la zone d'étude et du protocole de mitigation des risques pour le mammifères marins, la source initialement prévue d'un volume de 2570 ci (14 canons) n'a pas pu être opérée. Un dispositif source alternatif moins puissant et compatible avec la présence des dauphins a été mis en œuvre.

Cette source est composée de deux clusters de canons GGUN pour un volume total de 480 ci (4 canons). Une seule ligne de canons est mise à l'eau sur tribord, environ 50 mètres derrière le navire. Les autres canons/clusters de la ligne sont utilisés en rechange en cas de panne. L'immersion des canons est fixée à 5 mètres. La cadence de tir est de 10 s.

Ligne Tribord

| HYDRO NEAR FIELD | | Cluster1 | | Cluster2 | | Cluster3 | | Cluster4 | | Cluster5 | | |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SEGD Gunlink ch#2 | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 5 | |
| SEGD Seal Aux# | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 5 | |
| | | Néant | 90ci | 90ci | 90ci | 90ci | 150ci | 150ci | 150ci | 150ci | | |
| | |  |  |  |  |  |  |  |  |  | | |
| | | Gun Bd | Gun Bd | Gun Bd | Gun Td | Gun Bd | Gun Bd | Gun Bd | Gun Bd | Gun Bd | | |
| GUN SENSOR | | | | | | | | | | | | |
| SEGD Gunlink ch#1 | 1 | | 2 | | 3 | 4 | | 5 | 6 | | 7 | 8 |

Figure 7. Composition de la source de 480 ci ; les canons des clusters 3 et 4 sont actifs ; ceux des clusters 2 et 5 sont des rechanges ; le cluster 1 sert de lest ; les canons sont immergés à 5 m. Numéros des voies des données SEG D SEAL et GUNLINK associées aux capteurs source Gun Sensors et hydrophones Near Field.

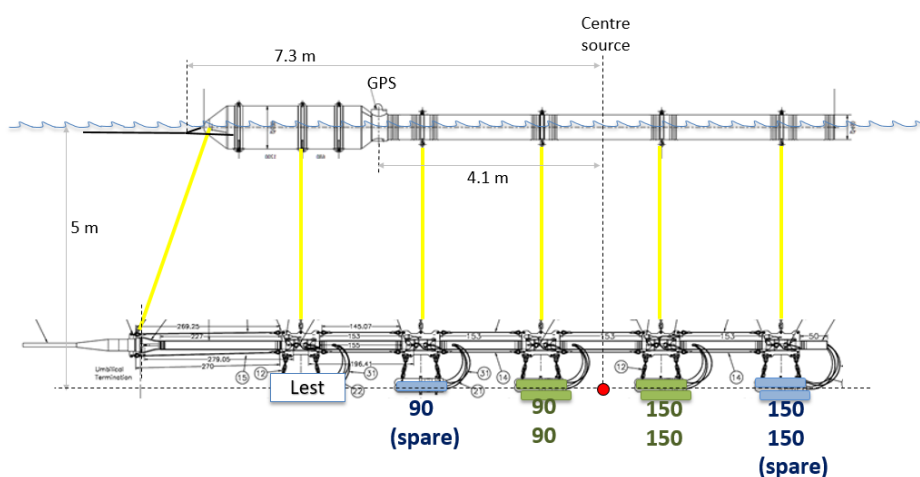


Figure 8. Géométrie de la source SIS1 480 ci.

Le mode de fonctionnement de la source SIS1 (gestion des tirs par GunLink®) induit un enregistrement des données « zéro délai » : le temps de déclenchement acoustique des canons est égal au temps du début d'enregistrement des données sismiques.

Les principales caractéristiques de la signature champs lointain de la source de 480 ci à 5 mètres d'immersion sont les suivantes :

- Amplitude 0-Pk 9.2 bar (239.2 dB réf. μPa à 1 mètre)
- Amplitude Pk-Pk 16.4 bar
- Ratio Pk/Bulle : 17.9
- Bande passante à -6dB : 6-108 Hz (fréquence centrale \approx 57 Hz)

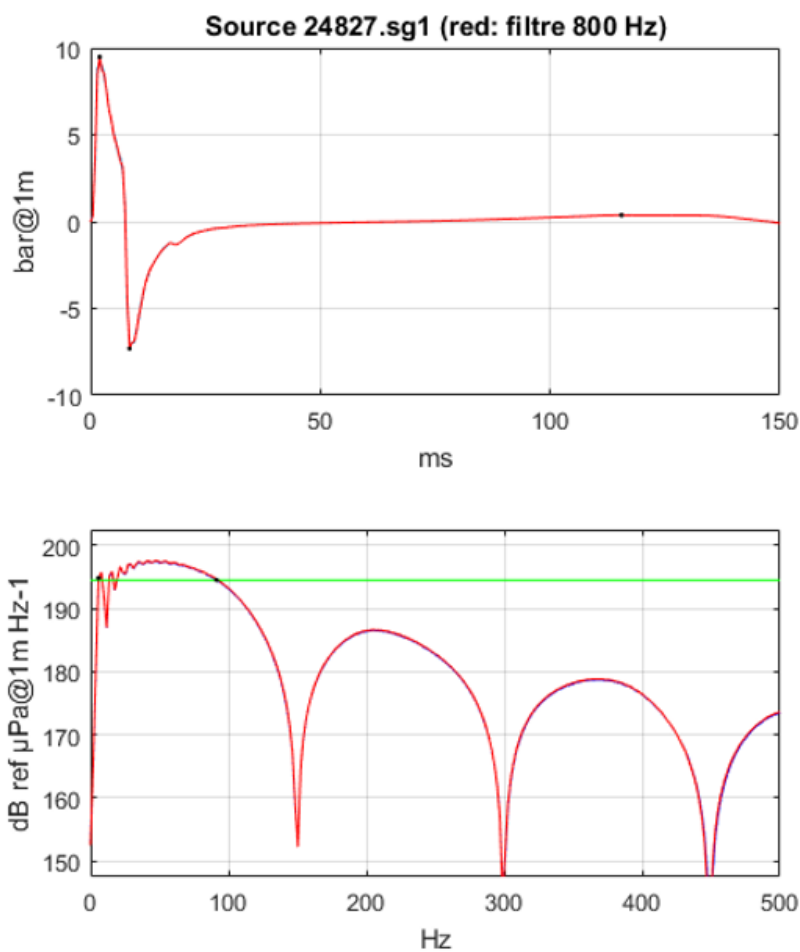


Figure 9. Caractéristiques du signal source 480 ci - modélisation Gundalf® pour une immersion de 5 m et une pression de 140 bars ; signature champs lointain à incidence normale, filtre passe-bas à 800 Hz . Graphe du haut : signal temporel (polarité : pic positif = augmentation de pression) ; graphe du bas : spectre d'amplitude.

La comparaison avec la source initialement prévue de 2570 ci immergée à 6 mètres indique une dégradation :

- diminution du niveau émis de l'ordre de 12 dB (facteur 4) ;
- ratio Pk/Bulle diminué : 18 contre 24 ;
- fréquence centrale relativement comparable : 57 Hz contre 50 Hz ;

Le flotteur source est tracté côté tribord à l'aide du câble (pantoire) de 45 mètres de long, repris en bout de tangon long de 5 mètres. Le tangon est positionné 6.3 m en avant du tableau arrière. La trainée du câble ombilical a tendance à rapprocher le flotteur de l'axe du navire.

Les offsets théoriques [centre source – centres traces] varient de 99.7 à 6093.2 m (hypothèse : *streamer* rectiligne et flotteur source ramené à 7.5 m de l'axe du navire).

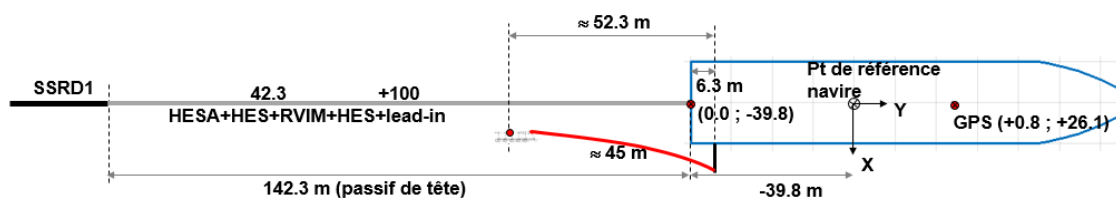


Figure 10. Géométrie d'acquisition théorique du dispositif de sismique SIS1 480 ci déployé pendant la mission GHASS2 à bord du N/O Pourquoi Pas ?

2.2.3. Données de sismique SIS1 acquises

Les paramètres d'acquisition sont les suivants :

- Fréquence d'échantillonnage : 1 kHz (1 ms)
- Délai à l'enregistrement : 0 s
- Cadence de tir : 10 s
- Durée d'enregistrement : 9 s
- Gain 1 : gain de 0 dB, amplitude maximale RMS de 1600 mV
- Filtre anti-repliement : 0.8 LIN x fréquence de Nyquist (soit 400 Hz)
- Filtre passe-haut digital : OFF

Les traces auxiliaires sont définies comme suit :

- Aux 1 : hydrophone Near Field cluster 1 Tribord
- Aux 2 : hydrophone Near Field cluster 2 Tribord
- Aux 3 : hydrophone Near Field cluster 3 Tribord
- Aux 4 : hydrophone Near Field cluster 4 Tribord
- Aux 5 : hydrophone Near Field cluster 5 Tribord
- Aux 6 à 10 : non utilisées
- Aux 11 : *Aim point* TTL Gunlink → ECOS (durée de 10 ms)
- Aux 12 : *Water Break* (hydrophones HESA)
- Aux 13 : *Time Break* TTL ECOS → Seal (durée de 200 ms)

9 profils de sismique SIS1 480 ci ont été acquis (profils 43 à 51).

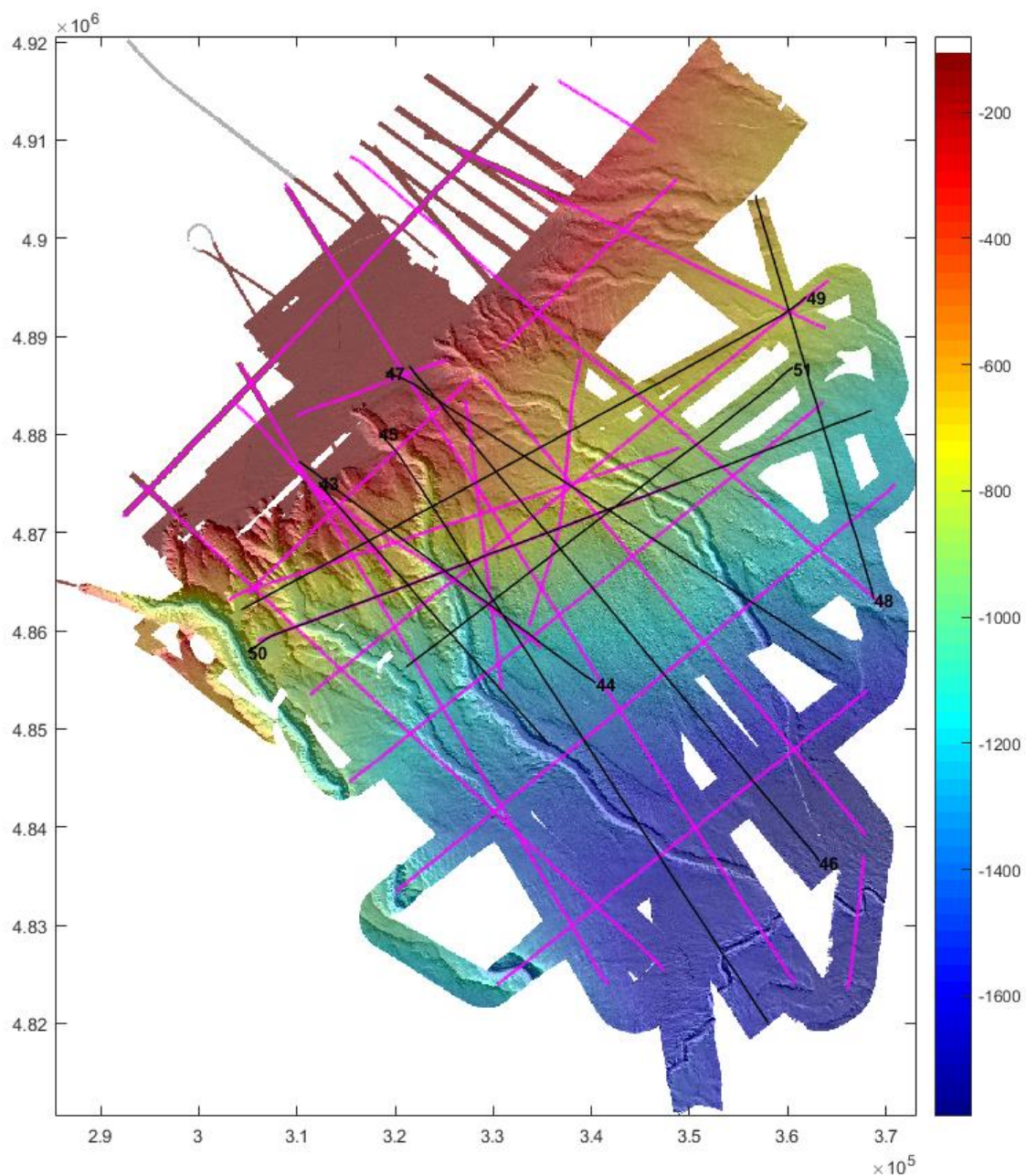


Figure 11. Localisation des profils sismiques SIS1 480 ci (en noir) acquis lors du leg1 de la campagne GHASS2 ; projection UTM zone 36T ; bathymétrie issue des campagnes GHASS (N/O Pourquoi Pas ?, 2015) et GHASS2 (N/O Pourquoi Pas ?, 2021), traitement GEOOCEAN/ANTIPOD ; en mauve, les profils de sismique HR acquis pendant GHASS2.

| N° Profil | Tirs | | Date | Cap fond moyen (°) | Bathy (m) | Vitesse surf. moy. (nds) | Longueur (km) | Source vol. (ci) | Lead-in (m) | Δtir temps (s) | Record Time (s) | Localisation | Commentaires |
|-----------|-------------|--------|---------------|--------------------|-----------|--------------------------|---------------|------------------|-------------|----------------|-----------------|--------------------------------------|--|
| 43 | GH2_SMT43.1 | 1-1589 | 29-Aug | 137 | 134-1486 | 4.7 | 33 | 480 | 90 | 10 | 9 | Profil ⊥ pente - Zone Ouest | mer agitée ; compas très bruités ; immersion variable 2-6 m (consigne=5 m) |
| 44 | GH2_SMT44.1 | 1-1418 | 29-Aug | 306 | 133-1269 | 5.2 | 35 | 480 | 100 | 10 | 9 | Profil ⊥ pente - Zone Ouest | ajustement du lead-in à 100 m pour stabiliser immersion tête de flûte |
| 45 | GH2_SMT45.1 | 1-2901 | 29/30-Aug | 146 | 266-1672 | 5.1 | 69.4 | 480 | 100 | 10 | 9 | Grand profil ⊥ pente - Zone Ouest | Jusqu'à 560 m de dérive de la flûte |
| 46 | GH2_SMT46.1 | 1-2675 | 30-Aug | 320 | 147-1785 | 5.2 | 62.9 | 480 | 100 | 10 | 9 | Grand profil ⊥ pente - Zone Centrale | La mer se dégrade sur la 2ème partie de profil -> immersion flûte plus instable, compas birds bruités ; sauts GPS bouée source |
| 47 | GH2_SMT47.1 | 1-2250 | 30-Aug | 121 | 138-1452 | 5.1 | 52.8 | 480 | 100 | 10 | 9 | Grand profil ⊥ pente - Zone Est | |
| 48 | GH2_SMT48.1 | 1-1570 | 30/31-Aug | 343 | 571-1437 | 5 | 40.2 | 480 | 100 | 10 | 9 | Grand profil ⊥ pente - Zone Est | Passage sur le volcan de boue en fin de profil ; compas bird bruités |
| 49 | GH2_SMT49.1 | 1-2522 | 31-Aug | 240 | 467-782 | 4.9 | 63.1 | 480 | 100 | 10 | 9 | Parallèle pente - zone centrale | Forte dérive flûte |
| 50 | GH2_SMT50.1 | 1-2683 | 31-Aug | 68 | 644-1356 | 5.2 | 65.5 | 480 | 100 | 10 | 9 | Parallèle pente - zone centrale | |
| 51 | GH2_SMT51.1 | 1-1926 | 31-Aug/1-Sept | 231 | 774-1151 | 5.1 | 47.2 | 480 | 100 | 10 | 9 | Parallèle pente - zone centrale | Dérive >1000m en début de profil |

Tableau 2. Liste des profils de sismique SIS1 480 ci acquis pendant le leg1 de la campagne GHASS2 (N/O Pourquoi Pas ?).

3. Traitement des données HR

Voir l'annexe 1 pour une représentation schématique de la séquence de traitement HR.

3.1. Correction du délai source – sismique HR

Le signal hydrophone Time Break (TB) du canon actif, enregistré en trace auxiliaire des données sismiques, a été utilisé pour estimer précisément le délai de déclenchement du canon. Pour chaque profil, le temps d'arrivée T_{max} du maximum d'amplitude du signal TB est pointé automatiquement pour chaque tir. Le déclenchement du canon (Time Break) intervient 1 ms avant le T_{max} pointé, soit un décalage constant de 2 échantillons qui sera corrigé par la suite.

Le pointé du T_{max} est enregistré sous la forme d'un fichier ascii pour chaque profil. Il est constitué de deux colonnes : le n° de tir et l'échantillon pointé.

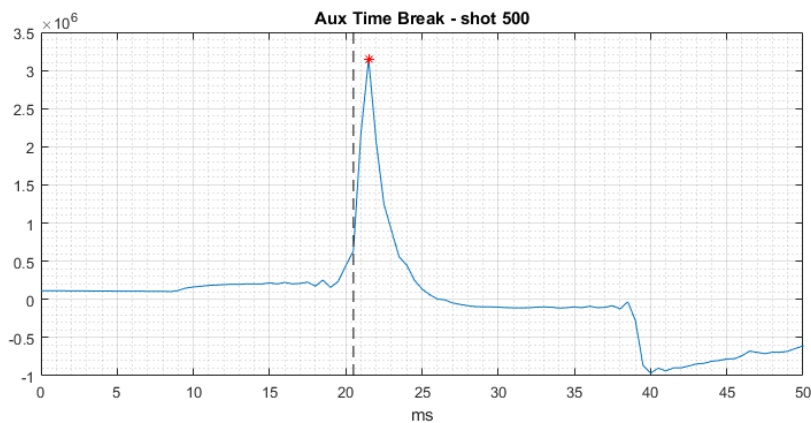


Figure 12. Exemple de pointé du maximum du signal Time Break du canon actif (profil 41, tir 500). Le temps de déclenchement du canon est 1 ms avant le maximum d'amplitude.

Note : les données auxiliaires utilisées sont celles exportées au format SEG Y lors du contrôle qualité bord ; la sélection des tirs analysés correspond donc à celle définie à bord lors du pré-traitement des données SEG D (les girations sont exclues).

Un contrôle de la correction du délai source pointé est réalisé en l'appliquant au signal de l'arrivée directe de la première trace sismique pour chaque profil. Un défaut de pointé du délai source entraînerait un saut au niveau du temps de l'arrivée directe.

Aucun défaut de source n'a été constaté pendant l'acquisition HR. Tout au long de la mission, le délai est de l'ordre de 20.5 ms. Les variations du délai sont très faibles, de l'ordre de 0.5 ms, confirmant la stabilité de la source durant l'acquisition HR.

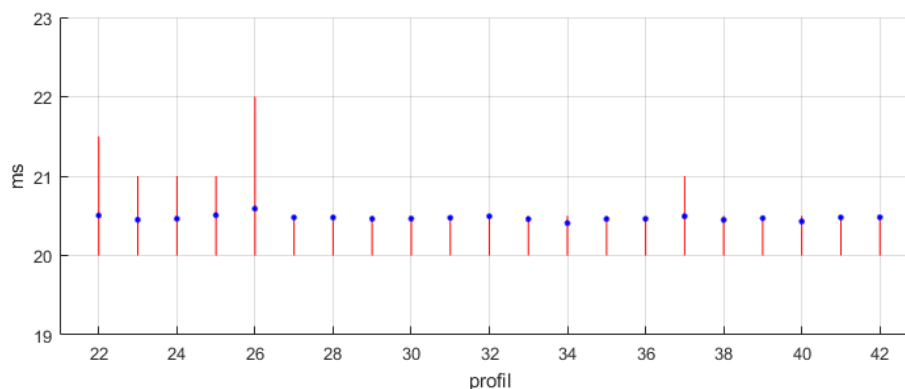


Figure 13. Valeur moyenne par profil du délai source HR estimée par pointé du signal hydrophone TB. Les barres rouges indiquent les valeurs min et max du délai par profil.

3.2. Traitement des capteurs de navigation – sismique HR

- *Données GPS navire et bouée de queue*

Le système de positionnement (CINNA et ECOS) a fonctionné correctement, excepté pour quelques portions de tirs, mais sans grande conséquence :

- profil 28 : message raw GPS navire non régulièrement rafraîchi jusqu'au tir 3342, a priori lié à un problème de diffusion de la navigation bord par le système Techsas ;
- profil 29 : absence de tir ECOS pendant 1'40" entre les fichiers SEGD 80 (n° ECOS 80) et le fichier SEGD 81 (n° ECOS 105), due à une erreur de manipulation de l'horloge de référence sismique Meinberg entre les profils 28 et 29 ;

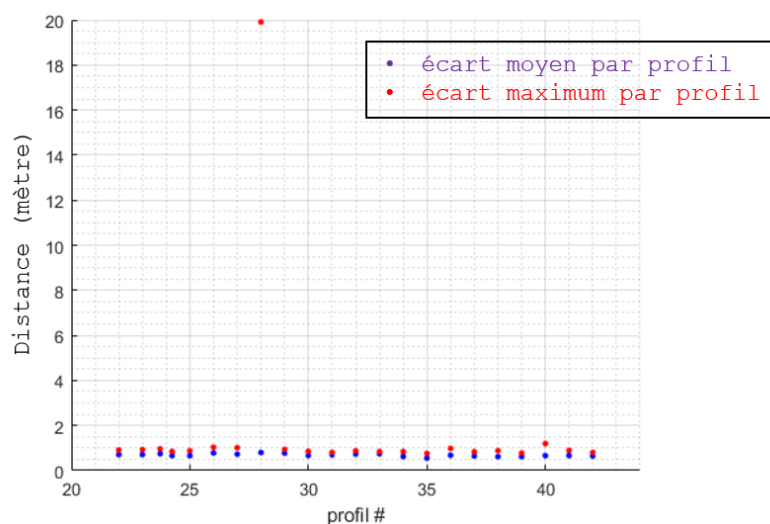


Figure 14. Ecart moyen par profil entre la position du point de référence du navire estimée par ECOS (intégration temps réel) et le GPS « brut » traité en temps différé : en bleu écart moyen, en rouge écart maximal. L'écart maximal conséquent pour le profil 28 est la conséquence du problème de diffusion de la navigation bord par TECHSAS.

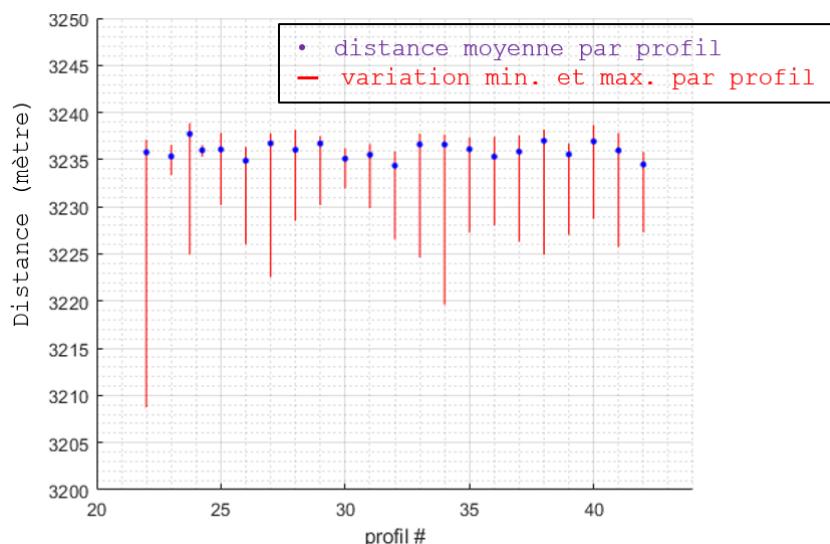


Figure 15. Distance moyenne par profil entre le point de référence navire et la bouée de queue (positions issues du traitement des données GPS). En bleu, moyenne, en rouge plage de variation entre les valeurs minimum et maximum ; variations liées en partie à la dérive du streamer et aux fins de giration).

Le positionnement GPS du navire et de la bouée de queue sont de très bonne qualité. Ils ont été traités via le logiciel SolidQC sans aucune édition.

- *Données caps*

Le cap gyrocompas du navire ne présente pas de défaut. Les caps des contrôleurs d'immersion sont globalement très peu bruités avec des écarts-types inférieurs à 0,25° (valeurs calculées sur le bruit des mesures de cap). Les profils 124 et 224 sont légèrement plus bruités. Les données caps des contrôleurs sont généralement considérées bruitées pour un écart-type supérieur à 1°.

Les données ont été traitées avec le programme *filtre-compas.m*. Dans la majorité des cas, l'édition manuelle des « sauts » (première étape) est inférieure à 0,1% des tirs. Elle est respectivement de 0,74% et 1,24% pour les profils 124 et 224. Après édition, les données sont filtrées en 2D (seconde étape), filtre Savitzky-Golay d'ordre 1 en 2 passes : une première passe suivant la dimension des contrôleurs d'immersion (filtre sur 3 contrôleurs) puis selon la dimension des tirs : 23 tirs pour un inter-tir de 3s, 19 tirs pour un inter-tir de 4s et 15 tirs pour un inter-tir de 5s. Un filtre passe-bas final est ensuite appliqué pour chaque avion suivant la dimension des tirs.

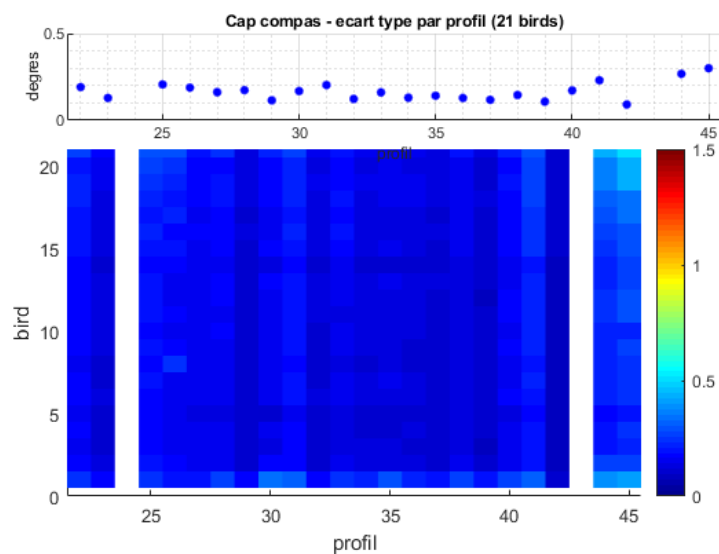


Figure 16. Ecart type sur le bruit des mesures compas magnétiques des contrôleurs d'immersion. Les profils 124 et 224 sont représentés respectivement aux numéros 44 et 45.

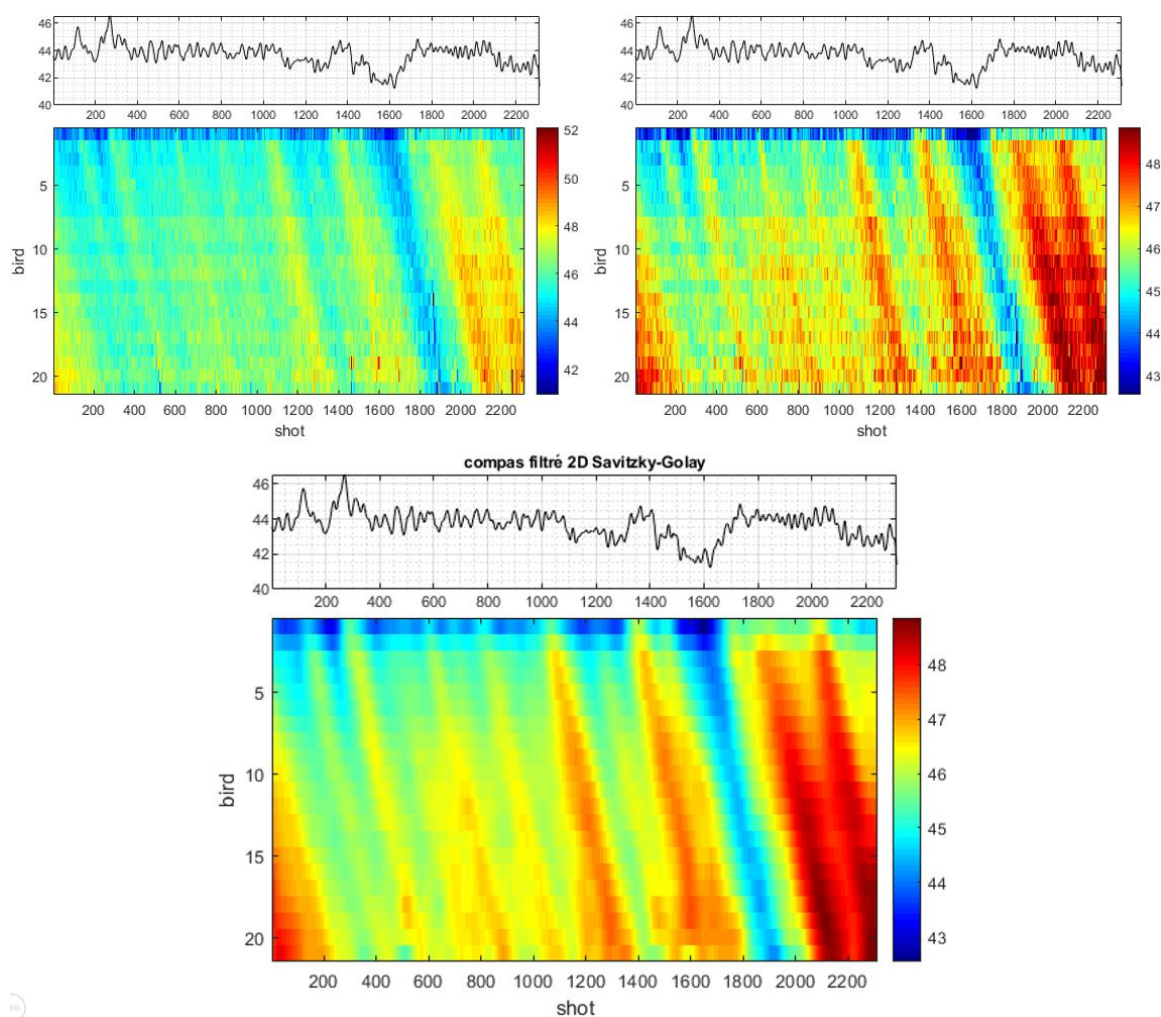


Figure 17. Profil224 (sismique HR, 21 contrôleurs espacés de 150 mètres), caps avions bruts (en haut à gauche), après édition manuelle (en haut à droite), après filtrage 2D Savitzky-Golay (en bas). Le graphe du haut représente les variations du cap gyrocompas du navire.

3.3. Traitement du positionnement – sismique HR

- *Ajustement de la géométrie d'acquisition*

Au cours de l'acquisition sismique HR, aucune modification de géométrie n'a eu lieu (longueurs filées et points de traction inchangés). Il n'y a eu ni panne, ni remontée programmée pour maintenance. La géométrie théorique (i.e. ne tenant pas compte de la dérive) est donc identique pour tous les profils.

Elle est cependant vérifiée systématiquement (programme *check_posit.m*) pour chaque profil par comparaison entre le pointé de l'arrivée directe sur les traces sismiques et la modélisation du temps d'arrivée directe basée sur la géométrie théorique (streamer et source rectilignes derrière le navire). Pour cela, les temps directs des traces 1, 24 et 48 sont pointés et modélisés puis sont représentés sur un point de tir moyen correspondant à la somme de plusieurs tirs pour lesquels la flûte est alignée. L'utilisation d'un point de tir moyen permet une meilleure analyse en s'affranchissant des phases parfois multiples et des amplitudes parfois faibles du *first break* sur les points de tir unitaires.

Les temps de trajet direct pointés sont corrigés du délai source. La vitesse de propagation dans l'eau en surface utilisée pour la modélisation est de 1517 m/s. Il s'agit de la vitesse de propagation moyenne en surface mesurée tout au long de la mission avec les sondes CTD ou avec le thermosalinomètre du bord.

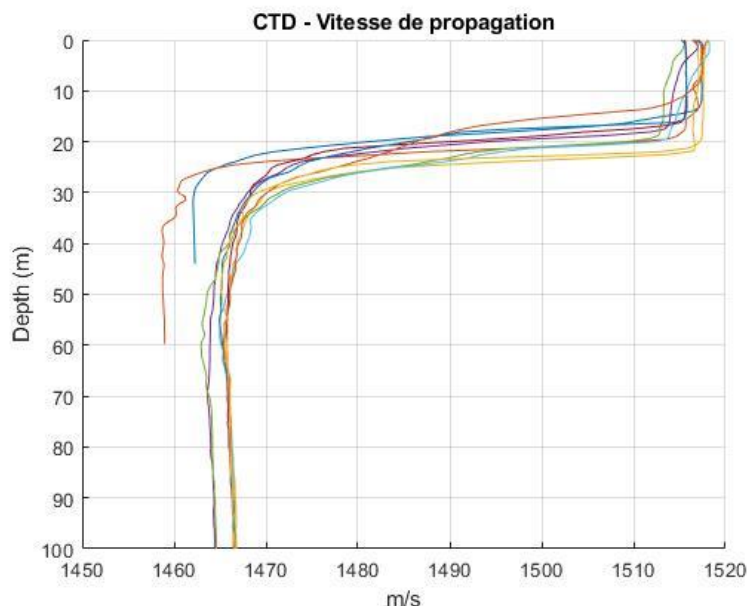


Figure 18. Mesures CTD réalisées tout au long de la campagne GHASS2, visualisation limitée à la couche 0-100m. La vitesse de propagation moyenne en surface est de 1517 m/s.

Suite aux comparaisons entre pointé et modélisation du temps de l'arrivée directe, la géométrie a été légèrement modifiée par rapport à celle utilisée à bord lors du contrôle qualité. La longueur

du câble source a été allongée à 22 m contre 20,5 m lors du contrôle qualité afin de minimiser l'écart entre pointé et modélisation pour tous les profils.

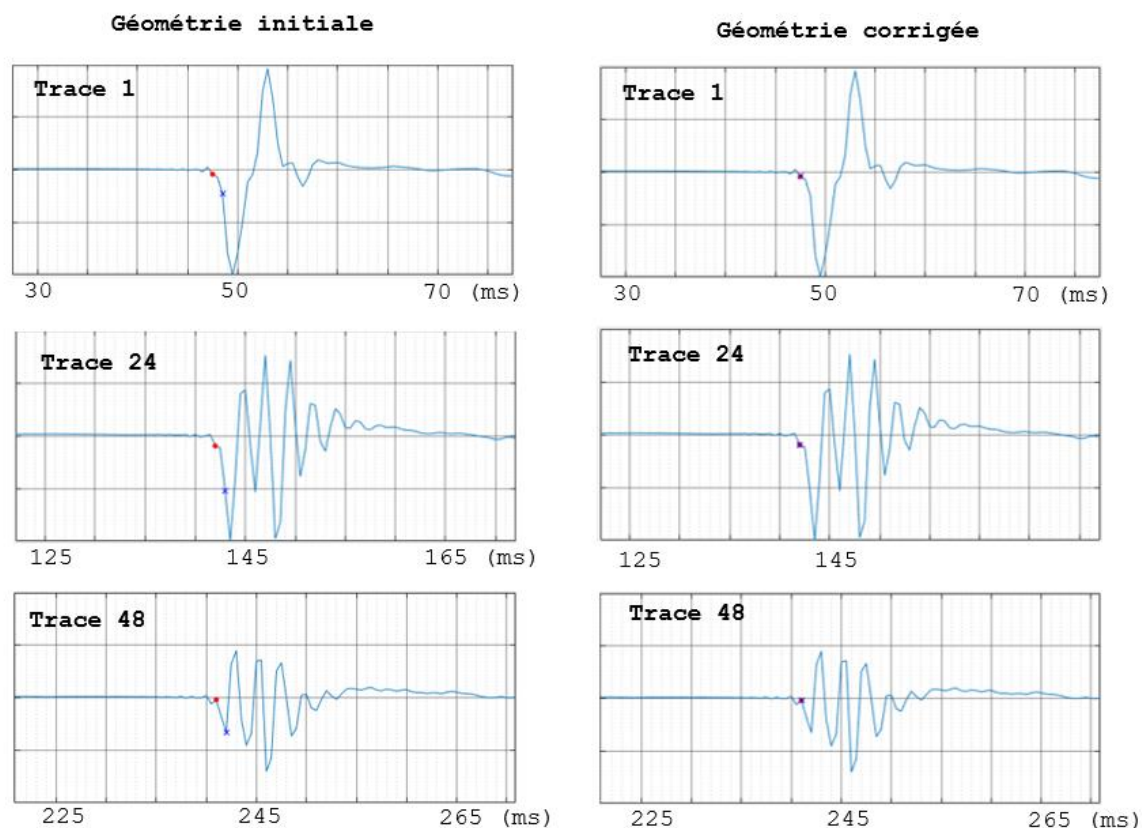


Figure 19. Comparaison des temps d'arrivée directe pointés (point rouge) et calculés à partir de la géométrie d'acquisition (croix bleue) : exemple du profil042. A gauche : avant correction de la géométrie. A droite : après prise en compte de la géométrie corrigée. Amplitudes normalisées.

- **Positionnement source – récepteur – bin**

Une fois la géométrie vérifiée, le positionnement de la source et des récepteurs est calculé via le logiciel SolidQC (version 3.4.0). La position de la source (un canon unique) est déterminée en projetant la longueur source-navire, déterminée précédemment, suivant le cap gyrocompas du navire. La longueur filée du câble source étant faible, l'erreur induite par l'incertitude sur le cap de projection est faible également (3.5 mètres pour une incertitude de 10° sur le cap de projection).

Les positions des récepteurs (480 traces à 6.25 m) et de la bouée de queue sont déterminées en utilisant les caps compas des contrôleurs d'immersion traités afin de calculer la déformée de la flûte. La comparaison entre la position estimée de la bouée de queue et sa position GPS permet de corriger cette déformée. Ce décalage est imputable aux incertitudes sur les mesures de caps des contrôleurs d'immersion, essentiellement dues à la précision de leur calibration. La correction est en moyenne de 1.5 degrés sur la longueur de la flûte (~3200m). La déformée de la flûte est ainsi recalée depuis le point de traction jusqu'à la position GPS de la bouée de queue.

Les positions sources et récepteurs sont projetées dans un référentiel cartésien spécifique pour chaque profil, avec l'axe Y suivant la direction d'acquisition (*in-line*) et l'axe X perpendiculaire au profil (*cross-line*).

Les données sont ensuite triées en collection point milieu commun (CMP) en réalisant un *binning* à pas de 6.25 m. La position des centres des bins est calculée de manière à privilégier les offsets courts : les centres des bins sont centrés sur les positions CMPs de la première trace. Pour chaque profil, le fichier *binning* contient une ligne par couple (tir, récepteur) enregistrant la position source, récepteur, bin, n° de bin et couverture.

Lors du *binning*, des statistiques sont réalisées sur l'étalement latéral des points milieux des traces par rapport au centre des *bins* dû à la dérive de la flûte. Sur l'ensemble des données, l'étalement moyen entre le centre des *bins* et les points milieux des 480 traces est de 63 m, reflet d'une dérive moyenne relativement limitée de la flûte. Cette moyenne cache cependant des étalements localement plus élevés, jusqu'à 150-200 mètres et des variations le long des profils.

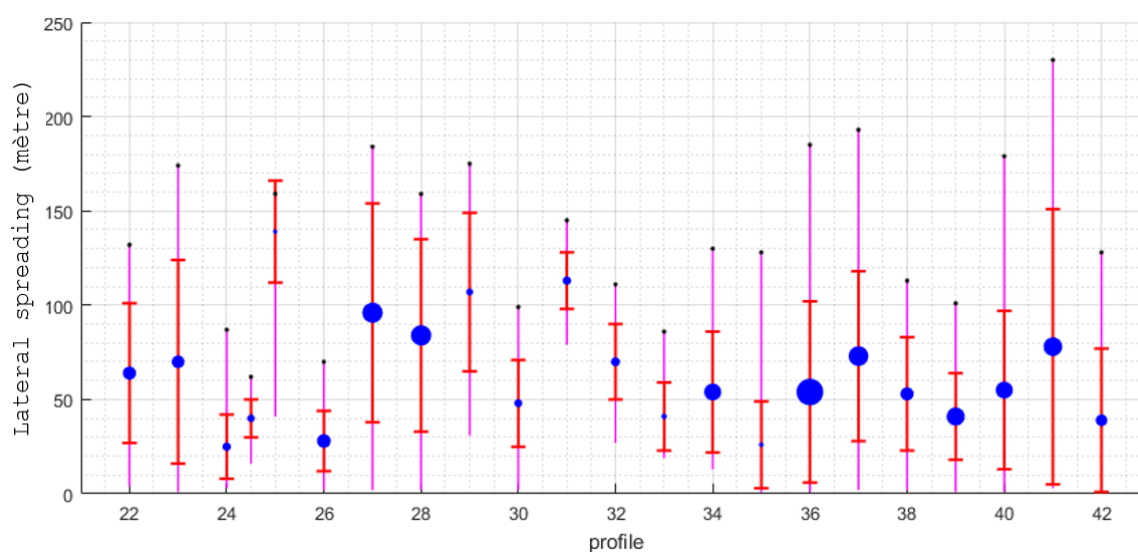


Figure 20. Statistiques par profil de l'étalement latéral des CMPs ($X_{CMPs} - X_{centre\ bin}$). Points bleus : moyenne (taille du point fonction du nombre de bins, i.e. de la longueur du profil) ; barre rouge : écart type ; barre mauve : [minimum maximum] ; point noir : maximum.

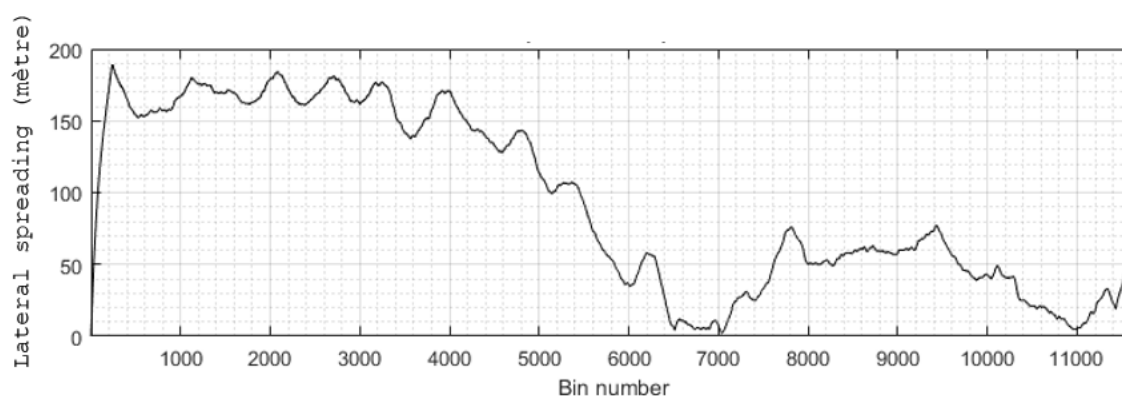


Figure 21. Exemple d'estimation de l'étalement latéral des CMPs (prise en compte des 480 traces) pour chaque bin du profil 27.

Le positionnement aboutit à un offset moyen source – centre de la première trace de l'ordre de 74 mètres et un offset maximum (trace 480) de l'ordre de 3069 mètres.

La couverture moyenne par bin de 6.25 m est fonction de la cadence de tir : 234 pour 5 s, 294 pour 4 s, 385 pour 3 s. Il s'agit cependant d'une couverture purement géométrique, qui ne tient pas compte d'une éventuelle réduction du nombre de traces pour limiter la dérive latérale et qui ne tient pas compte non plus de la nécessité de limiter les offsets lors du traitement NMO (*mute anti-stretch*).

3.4. Reformatage des données sismiques HR

La procédure habituelle de reformatage des données SEG-D consiste à générer un fichier SEG-Y collections points de tir par profil. La taille du fichier SEG-Y généré correspond au volume de données brutes SEG-D (un fichier par tir), soit jusqu'à 100 Go par profil. Cette taille de fichier est trop importante pour les traitements à suivre qui accèdent aux traces de façon non séquentielle du fait du tri en collections CMP (jusqu'à 3.5 millions de traces pour un profil). Les données prétraitées au format SEG-Y sont donc automatiquement découpées en fichiers de 10 Go.

Les traces SEG-Y sont codées au format IEEE Float big-endian. Le SEG-Y est de type révision 1. Un filtre passe-haut à 15 Hz est appliqué pour s'affranchir des variations basses fréquences du signal (houle). Le délai source, les positions source, récepteur et bin sont renseignés dans les entêtes de trace. Le délai source est codé en [ms]x100. Il n'est pas appliqué aux traces. Les coordonnées sont exprimées dans le référentiel (X,Y) du profil en centimètres. Les paramètres de projection sont renseignés dans l'entête EBCDIC du fichier SEG-Y.

Les fichiers SEG-Y des données HR (480 traces échantillonnées à 0.5 ms, cadence de tir de 3 à 5 s, enregistrement de 2.75 à 4.5 s) représentent un volume total de 1.3 To.

3.5. Imagerie à vitesse constante – sismique HR

Afin de valider le positionnement, les données sont sommées et migrées à vitesse constante. Les 480 traces sont sommées à vitesse de 1485 m/s pour vérifier la focalisation des signaux sur le fond de l'eau. Cette première section sommées sert également au pointé du fond de l'eau qui sera utilisé dans la phase d'édition des traces bruitées.

3.6. Edition des traces bruitées – sismique HR

- **Nature du bruit**

Les analyses de bruit réalisées à bord lors du contrôle qualité ont montré des niveaux moyens très faibles de l'ordre de 1 μ bar, du fait notamment des bonnes conditions de mer. Ces valeurs moyennes de bruit occultent cependant des valeurs sporadiquement plus élevées. Ce bruit est de différentes natures :

- bruit créé par les 21 contrôleurs d'immersion (Figure 22). Cela est classiquement observé avec le streamer solide. On observe des bursts centrés sur les contrôleurs, puis du bruit de plus faible amplitude se propageant de part et d'autre des contrôleurs ; les bursts sont "inorganisés" et affectent la gamme de fréquence du signal ;
- des signaux « parasites » ont aussi été fréquemment enregistrés, le plus souvent sous la forme d'arrivées plus ou moins rectilignes sur les points de tir (Figure 23). Ils sont dus aux tirs sismiques d'un navire d'exploration pétrolière réalisant un survey 3D proche des côtes ukrainiennes, à la limite des eaux roumaines (100-150 km au NW de la zone d'étude de la mission GHASS2). Les traitements sommaires d'imagerie réalisés à bord (sommation à vitesse constante) semblent montrer que ces bruits ne sont pas très pénalisants. Leur organisation doit permettre de les atténuer par un traitement adapté ;
- des défauts sur certaines traces (Figure 24), passés inaperçus lors du contrôle qualité bord, engendrent des discontinuités du signal de très forte amplitude. Ces traces doivent être absolument éditées avant tout traitement d'imagerie.

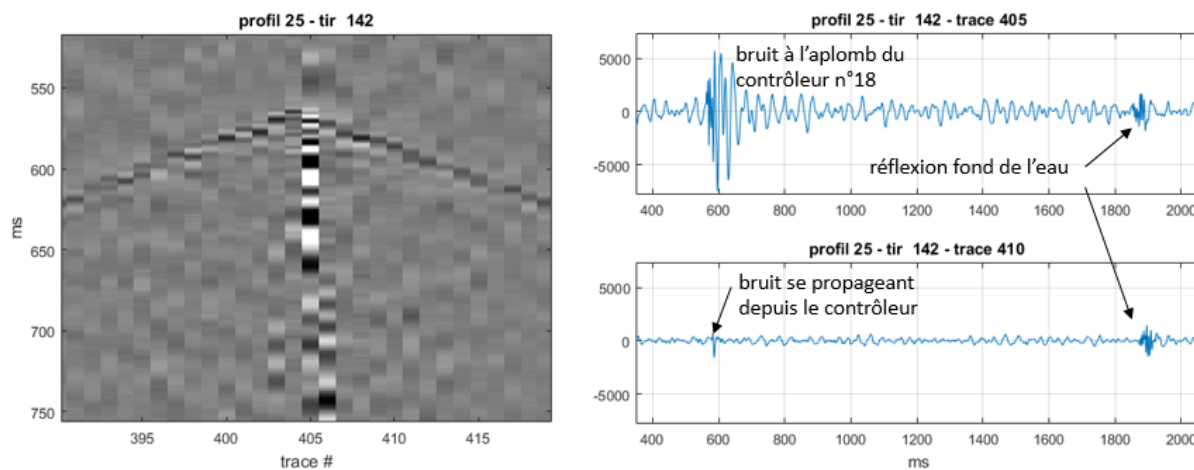


Figure 22. Exemple de bruit dû aux contrôleurs d'immersion observé sur une collection point de tir (profil 25, tir 142, filtre passe bande 20-400 Hz). Le niveau de bruit est relativement élevé à l'aplomb du contrôleur ; le bruit se propageant de part et d'autre est de niveau bien plus faible.

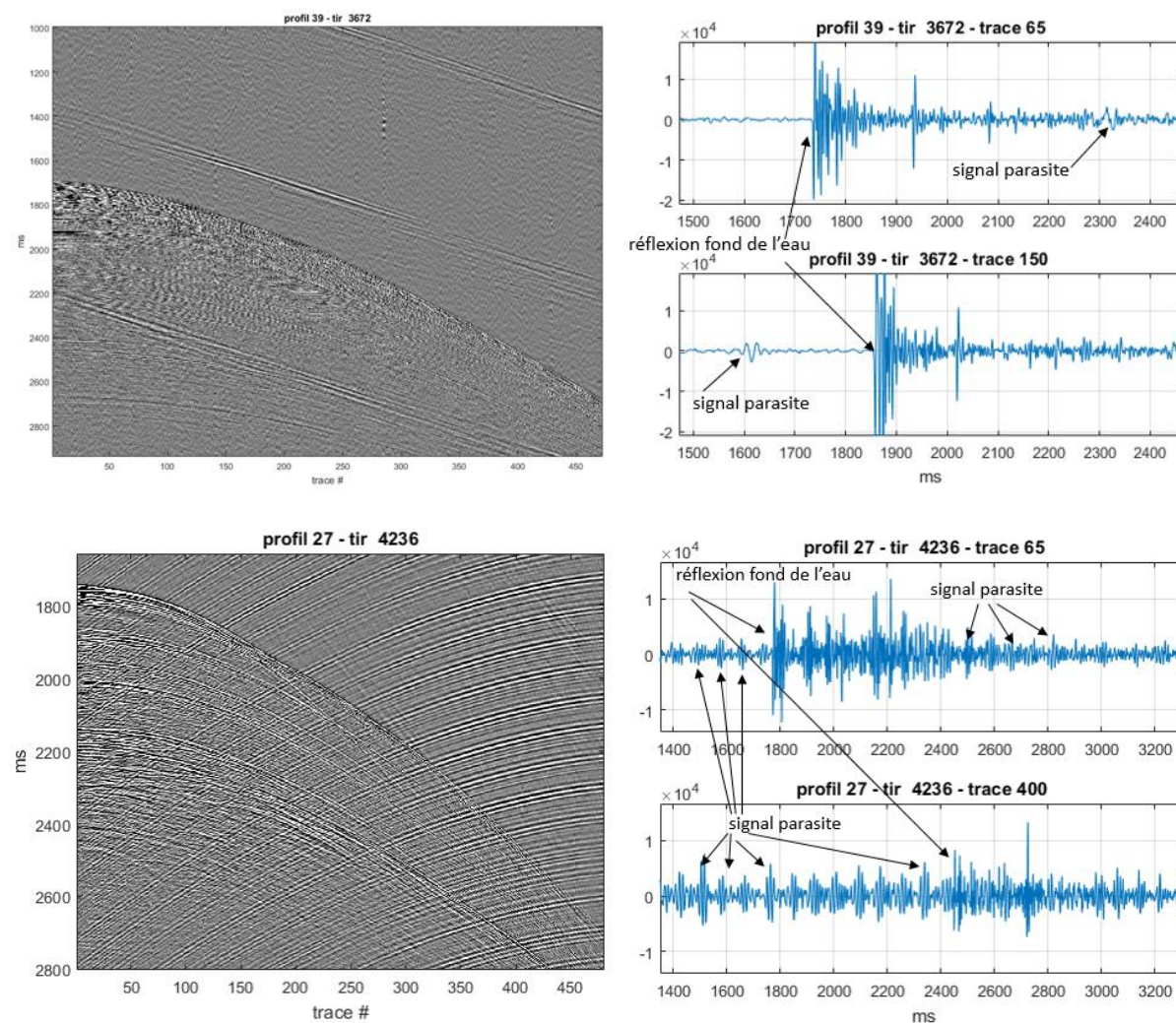


Figure 23. Exemples de signaux parasites dus aux tirs d'exploration pétrolière observés sur collections points de tir (figure du haut : profil 39, tir 3672 ; figure du bas : profil 27, tir 4236 ; filtre passe bande 20-400 Hz).

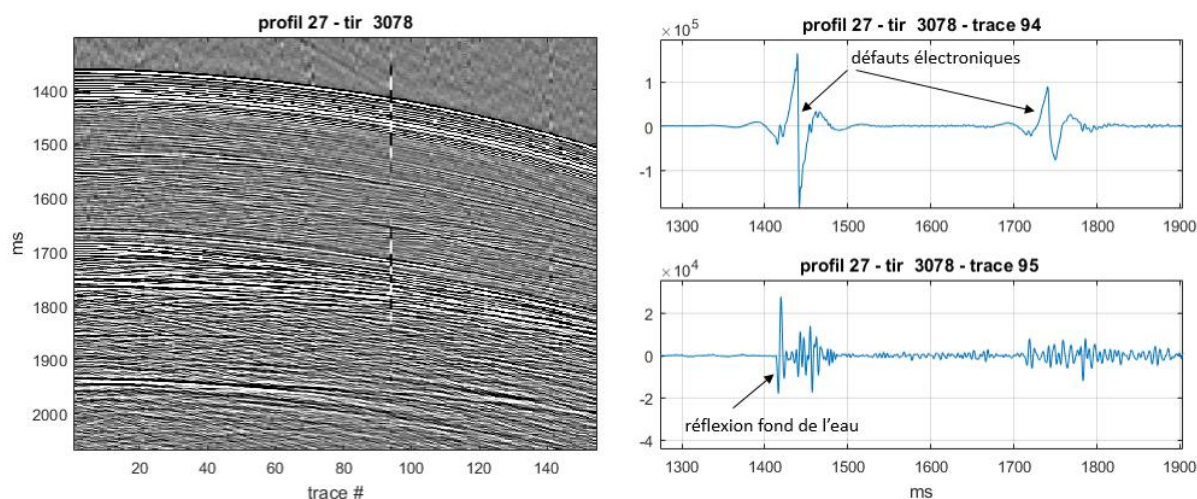


Figure 24. Exemple de bruit dû aux défauts électroniques observés sur collection point de tir après filtre passe-bande (profil 27, tir 3078, filtre passe bande 20-400 Hz). A noter la différence d'échelle d'amplitude entre la trace 94 (défaut électronique) et la trace 95 (aucun défaut).

- **Adaptation de l'édition des traces bruitées**

L'édition des traces basée sur une simple estimation du niveau de bruit moyen sur des fenêtres temps limitées, comme celle employée pour le contrôle qualité bord, n'est pas adaptée pour réaliser une édition précise des tirs-traces à rejeter. Les fenêtres temps d'estimation du bruit, prises en fin de trace ou entre l'arrivée directe et le fond de l'eau, ne peuvent pas relever toutes les anomalies et peuvent inclure aussi du signal (multiples par exemple). De plus, l'édition basée sur un simple seuil de bruit maximum est souvent inadaptée : le seuil est soit trop élevé et donc pas assez sélectif, soit trop faible et alors trop sélectif.

Une méthode plus discriminante est basée sur la comparaison locale d'attributs du signal sur un certain nombre de tirs et de traces consécutifs. Un signal (tir, trace) est édité, i.e. flagué, lorsque la valeur de son attribut est en anomalie par rapport à la valeur « normale » de l'attribut estimée sur les signaux voisins. Le grand nombre de traces et de tirs de la sismique HR rend ces calculs d'attributs relativement longs. Une première étape consiste donc à pré-traiter les données et à en réduire le volume. De même, l'analyse doit être restreinte à la partie utile du signal ; une trace ne doit pas être éditée si du bruit apparaît uniquement dans la colonne d'eau. Plusieurs attributs ont été testés en fonction des objectifs de détection d'anomalie ou d'édition.

- **Détection des traces en défaut (contrôle qualité bord) – attribut « discontinuité »**

Pour le contrôle qualité bord (implémentation dans le logiciel SolidCheck contrôlant les fichiers de données sismiques brutes SEG-D), l'analyse doit être rapide et exhaustive. L'objet est simplement de détecter les défauts d'acquisition, marqués par de fortes discontinuités du signal. Pour cela, l'attribut est calculé sur la valeur absolue de la dérivée de l'ensemble de la trace, égal au rapport [maximum / moyenne] de ce signal. Les données sont au préalable filtrées passe-bas à 10 Hz pour supprimer les variations liées aux signaux sismiques. Une valeur « normale » unique de cet attribut est calculée en prenant la moyenne de ce rapport sur l'ensemble des données du profil (moyenne sur 90% des valeurs centrées sur le maximum de leur histogramme). Une trace est « en anomalie »

si sa valeur attribut est au moins 6 fois supérieure à la valeur attribut moyenne. Ce seuil d'anomalie est relativement élevé pour ne pas aboutir à de fausses détections ; il permet cependant de relever les anomalies de discontinuité du signal (défauts sur certaines traces) et d'avertir l'utilisateur par un message *Warning* dans le rapport d'analyse issu du logiciel SolidCheck.

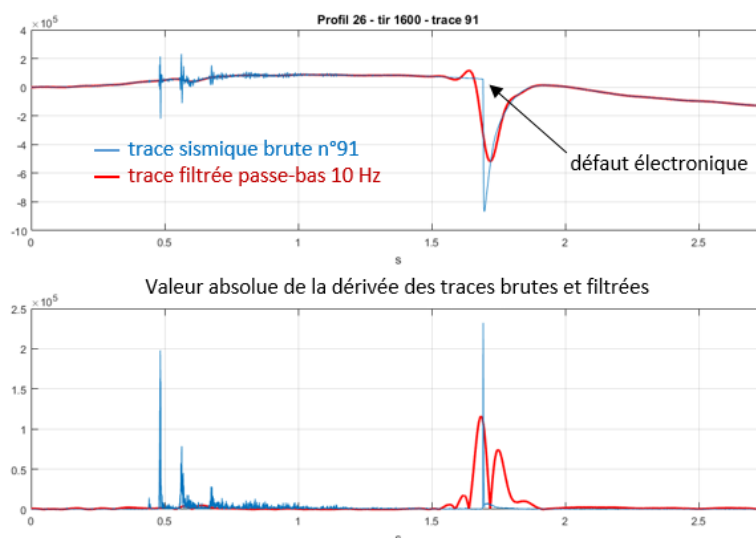


Figure 25. Exemple de trace présentant un défaut (discontinuité du signal brut), profil 26, trace 91 ,tir 1600. La figure du bas représente la valeur absolue de la dérivée de la trace. Les courbes rouges correspondent au signal filtré passe-bas (10 Hz). Sur le graphe du bas, les variations d'amplitude liées aux réflexions et à la discontinuité sont du même ordre de grandeur avant filtre. Après filtre passe bas, seul le défaut lié à la discontinuité du signal reste prépondérant.

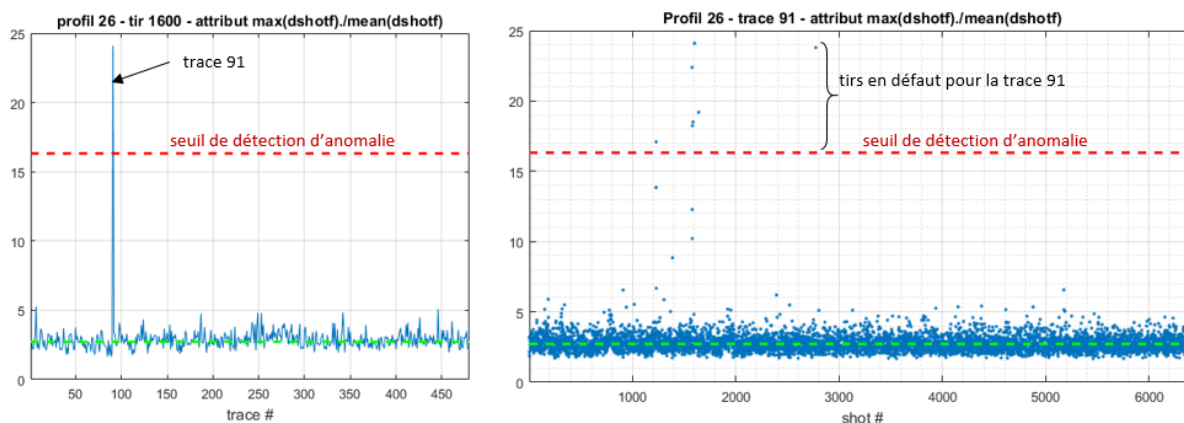


Figure 26. Exemple de valeurs de l'attribut $[\max(\text{abs}(\text{diff}(\text{signal}))) / \text{mean}(\text{abs}(\text{diff}(\text{signal})))$] calculées pour le profil 26. Figure de gauche : pour toutes les traces du point de tir 1600 ; figure de droite : pour tous les tirs de la trace 91. Celle-ci apparaît en défaut (attribut supérieur au seuil) pour 7 tirs du profil. En pointillés verts, valeur moyenne de l'attribut sur l'ensemble du profil ; en pointillés rouges, seuil d'anomalie égal à 6 fois la valeur moyenne.

Cette première analyse sur l'ensemble des données SEG-D HR fait ressortir trois traces en défaut (traces 83, 91 et 94) appartenant à la section active n°4, pour 14 profils sur les 21 acquis. Les défauts affectent de 5 à plus de 100 tirs par profil. L'ensemble des profils est probablement affecté pour ces traces ; le seuil appliqué relativement élevé ne détecte pas toutes les traces en anomalie. Cette analyse est cependant pertinente pour du contrôle qualité bord afin d'attirer l'attention sur une section active affectée par de potentiels défauts.

- **Edition des traces pour l'imagerie post-stack – attribut « distorsion »**

Pour l'édition des traces bruitées avec comme objectif l'imagerie post-stack, seul le bruit de relative forte amplitude doit être édité. La couverture multiple permet d'atténuer largement le bruit résiduel. Ce bruit de relative forte amplitude correspond essentiellement aux discontinuités du signal (anomalie électronique) et aux *bursts* sur les traces localisées sous les contrôleurs d'immersion. L'attribut calculé pour cette édition, nommé ci-après *distorsion*, est le rapport entre l'amplitude de la trace et l'amplitude de référence estimée localement sur les tirs et traces voisines. L'amplitude est calculée sur des fenêtres de temps de 37.5 ms permettant d'intégrer les éventuels bruits qui ne sont pas ponctuels après filtre passe-bande. Une trace est éditée si elle montre une *distorsion* trop élevée pour l'une des fenêtres temps, en considérant uniquement les amplitudes à partir du fond de l'eau. Les différentes étapes sont détaillées ci-dessous.

Edition des traces bruitées - première étape - diminution du volume de données

Les traces sismiques sont lues à partir des fichiers SEGY collections points de tirs. Le pointé du fond de l'eau réalisé sur une première section sommée à vitesse constante permet d'estimer le temps d'arrivée du fond de l'eau pour les 480 traces. Les données de positionnement permettent de passer d'un pointé (*#bin, t_{fond}*) à une information (*#source, #récepteur, t_{fond}*). Le délai source doit être également connu avec précision pour chaque tir. Ces données permettent de débiter l'analyse de la trace sismique à partir de la réflexion fond de l'eau.

Un filtre passe-bande 20-400 Hz est appliqué. Les *bursts* de bruit sont alors marqués par des relatives fortes amplitudes sur une durée de plusieurs dizaines de ms. Afin de réduire le volume de donnée, la moyenne de la valeur absolue du signal est calculée par fenêtre de 37.5 ms à partir du fond de l'eau. Cette donnée est sauvegardée par profil sous la forme d'une matrice 3 dimensions A (*nFenêtresTemps, nTirs, nTraces*). Le gain en volume dépend de la profondeur d'eau, mais il est au minimum d'un facteur 50 pour les profils plateau et plus élevé pour les profils sur la pente et le bassin.

Edition des traces bruitées - seconde étape – calcul de l'attribut distorsion

L'attribut *distorsion* est calculé à partir des données d'amplitude de la matrice A. Pour chaque fenêtre temps *ifenetre* de chaque trace (*itir, itrc*), l'attribut est égal à :

$$A(\text{ifenetre}, \text{itir}, \text{itrc}) / \bar{A}(\text{ifenetre}, \text{itir} \pm 10 \text{ tirs}, \text{itrc} \pm 10 \text{ traces})$$

Le choix de l'excursion en nombre de traces et de tirs est important, car il conditionne la définition de la valeur locale « normale » de la *distorsion*. Pour éditer les traces bruitées par les contrôleurs d'immersion, la moyenne est réalisée sur ± 10 traces (les contrôleurs sont espacés toutes les 24 traces). La moyenne locale \bar{A} est calculée sur 90% des valeurs centrées sur le maximum de l'histogramme pour éviter de prendre en compte les traces bruitées. L'attribut *distorsion* est sauvegardé par profil sous la forme d'une matrice 3 dimensions D (*nFenêtresTemps, nTirs, nTraces*). Cette étape est la plus coûteuse en temps, car elle nécessite un calcul de moyenne locale représentative (via le calcul d'un histogramme) pour chaque échantillon A(*ifenetre, itir, itrc*).

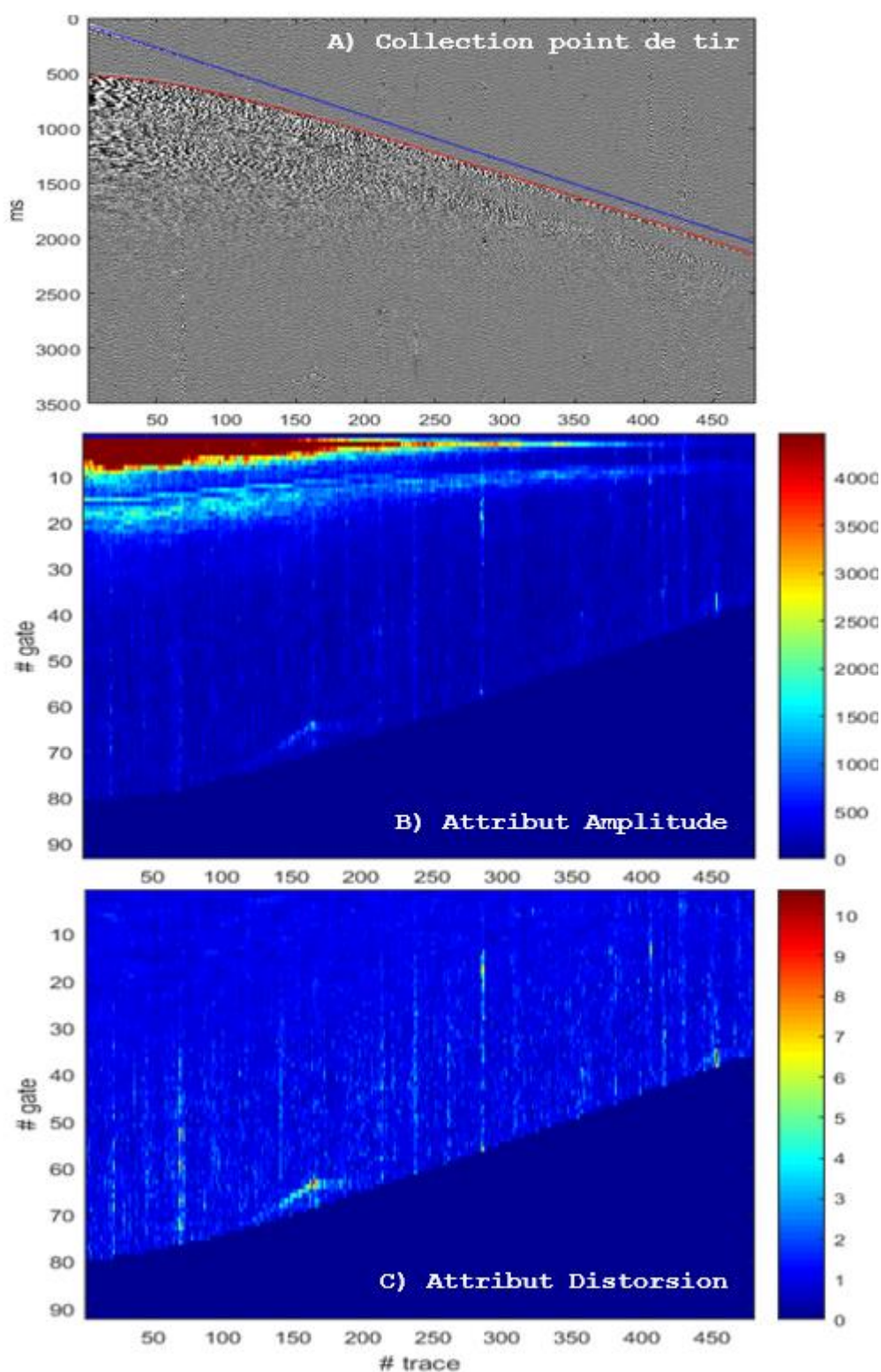


Figure 27. Exemple de calcul de l'attribut distorsion sur un point de tir. Figure A) : point de tir filtré 20-400 Hz avec l'arrivée directe en bleu et la réflexion fond de l'eau estimée en rouge (profil 24b, tir 1554). Figure B) : attribut Amplitude calculé sur des fenêtres de 37.5 ms à partir du fond de l'eau. Figure C) : attribut distorsion calculé en considérant +/- 10 traces et +/- 10 tirs.

Edition des traces bruitées - troisième étape – critère de distorsion maximum

L'analyse des valeurs de distorsion montre que les variations locales d'amplitude liées aux réflexions et aux multiples donnent lieu à des distorsions généralement inférieures à 3. Afin d'être conservatif et de n'éditer que les traces avec un niveau de bruit relativement élevé, le seuil de distorsion est fixé à 5. Dès que la valeur maximum de distorsion calculée sur toutes les fenêtres de la trace dépasse 5, la trace est flaguée. Comme attendu, un bruit de relative faible amplitude par rapport aux amplitudes réfléchies locales ne sera pas détecté ; alors que le même bruit localisé dans une fenêtre temps avec de faibles amplitudes réfléchies sera détecté et la trace sera flaguée. Dans le cas où le bruit n'est pas détecté, cela n'aura pas d'impact puisqu'il sera de relative faible amplitude. A l'inverse, si le bruit est détecté (car de relative forte amplitude), c'est l'ensemble de la trace qui sera flaguée, y compris la partie avec des amplitudes réfléchies élevées et sans bruit. Le seuil de détection doit donc être assez élevé pour éditer uniquement les bruits de relative forte amplitude.

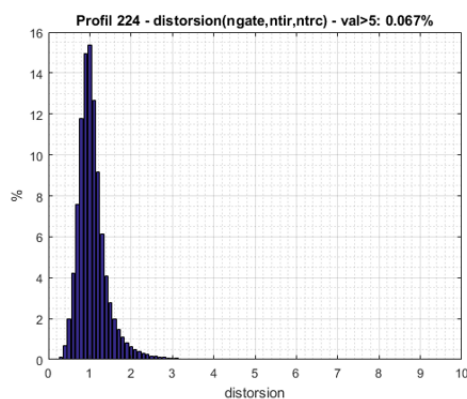


Figure 28. Distribution de type log normale calculées pour toutes les fenêtres temps, toutes les traces et tous les tirs du profil 24b. Seules 0.067 % des valeurs de distorsion sont supérieures à 5.

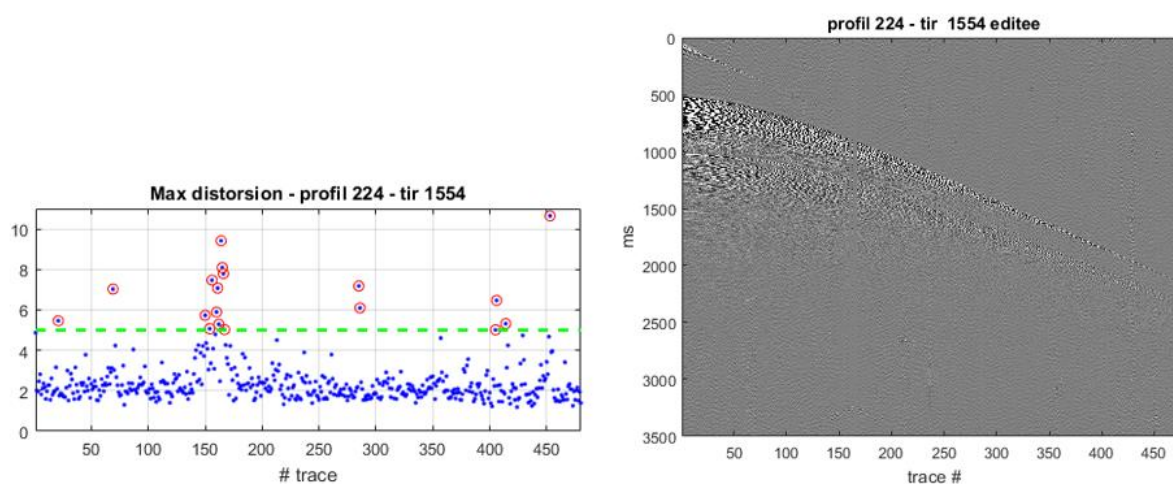


Figure 29. Application du critère d'édition (maximum de distorsion < 5) sur un point de tir (profil 24b, tir 1554) ; figure de gauche : valeur maximum de distorsion par trace (en vert le seuil fixé à 5 ; en rouge les traces éditées) ; figure de droite : point de tir édité (à comparer avec le point de tir sans édition de la figure précédente).

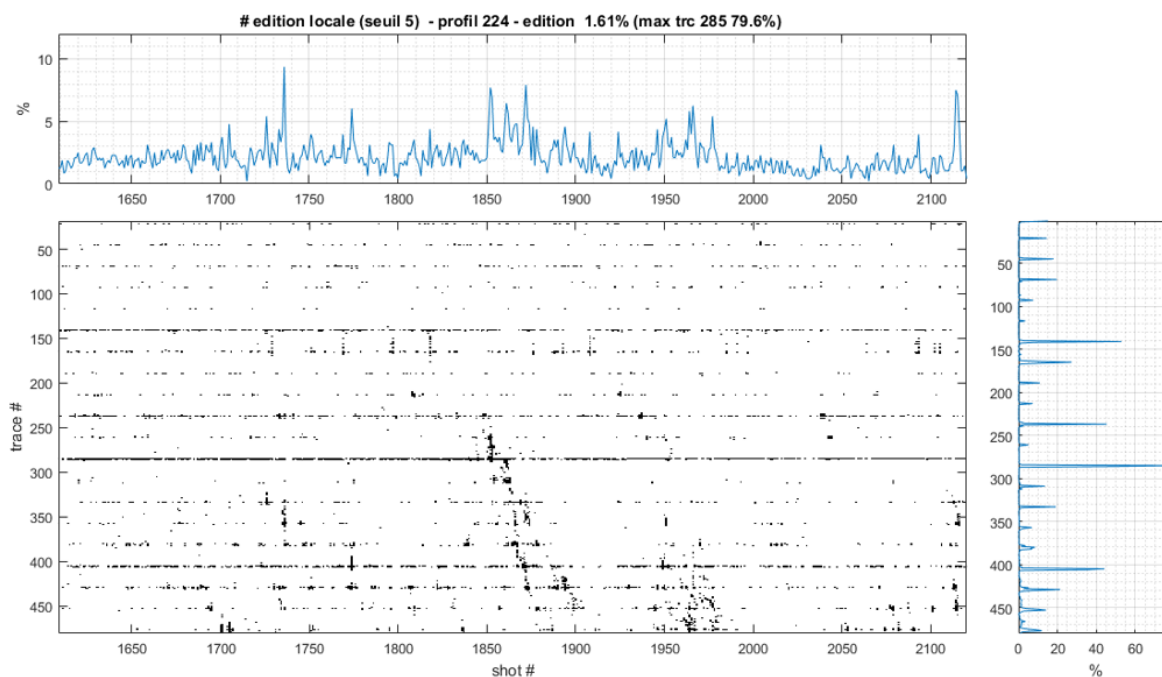


Figure 30. Résultat d'édition sur une portion des tirs du profil 24b à l'aide du seuil de distorsion fixé à 5. En noir les traces éditées. Sur l'ensemble du profil, 1.61% des traces sont éditées. Les traces au niveau des contrôleurs d'immersion apparaissent les plus bruitées (jusqu'à 79.6 % des tirs éditées pour la trace 285 de ce profil).

Résultats de l'édition basée sur le critère de distorsion maximale

Le nombre de traces avec une valeur de distorsion maximum supérieure à 5 reste très faible. En moyenne sur les 21 profils HR, cela concerne moins de 0.5% des données. Les traces en défaut affectées par des discontinuités sont toutes détectées par cette méthode d'édition. Les traces en anomalie (en dehors des défauts de continuité du signal) sont quasi exclusivement celles à l'aplomb des contrôleurs d'immersion, les plus bruitées. La trace 285 (contrôleur n°13) est la plus affectée, avec un pourcentage d'édition variant de 13 à 70 %. Les traces 353 à 360 ont dû être entièrement flaguées pour le profil 23 et les 451 premiers tirs du profil 24. Aucune cause évidente n'a été trouvée pour ce bruit disparu aussi brutalement qu'il est apparu.

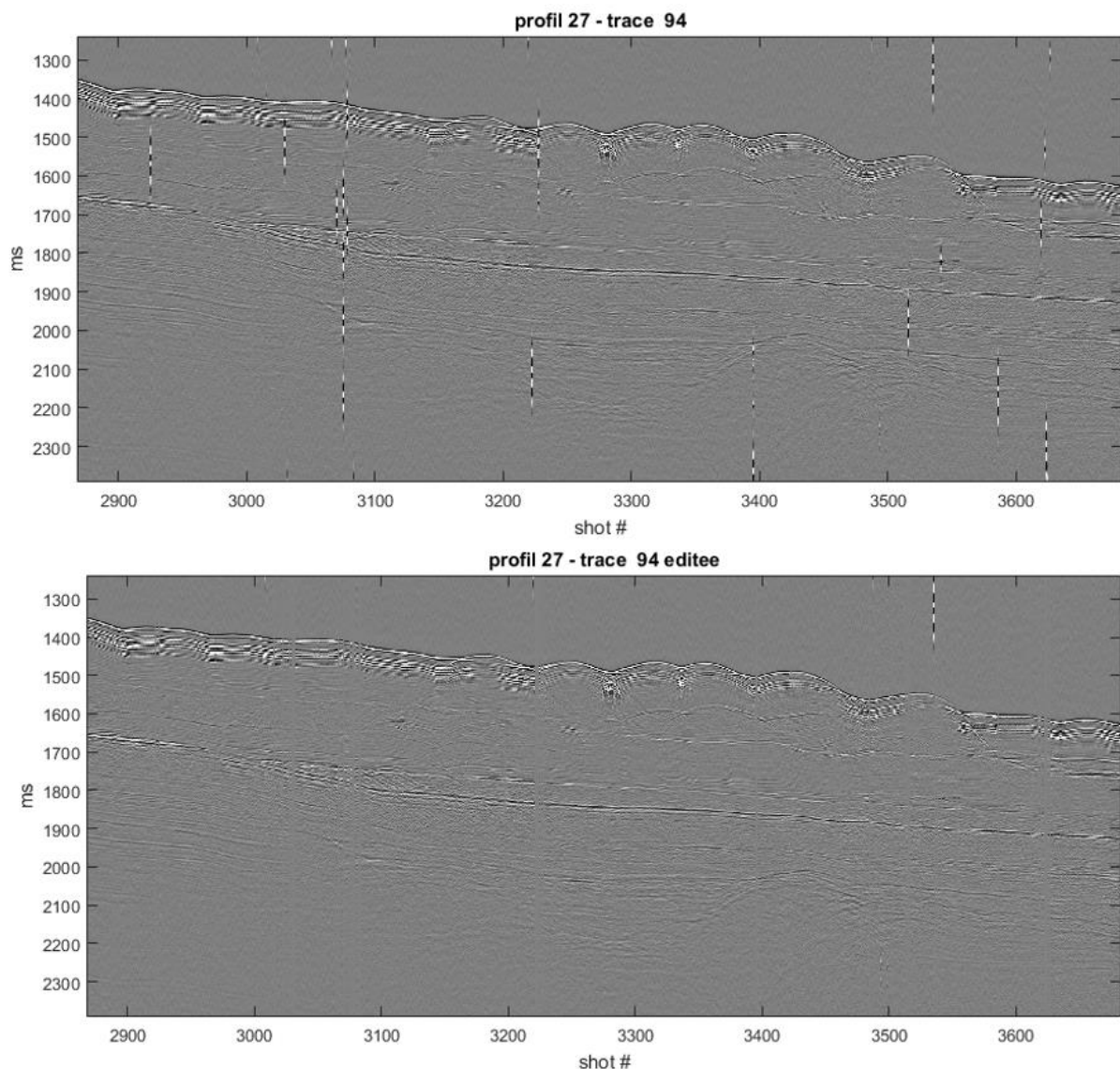


Figure 31. Illustration de l'édition des traces présentant des défauts électroniques par la méthode de critère de seuil sur l'attribut distorsion ; profil 27, trace 94.

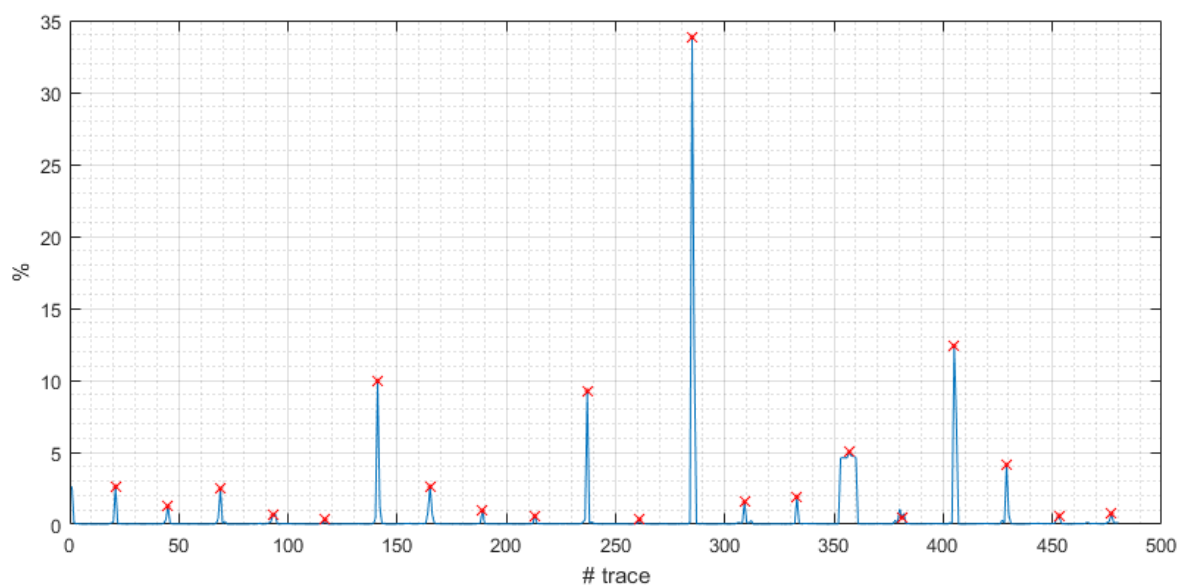


Figure 32. Pourcentage d'édition (critère de distorsion maximum) par trace sur l'ensemble des profils HR ; les croix rouges indiquent les positions des contrôleurs d'immersion.

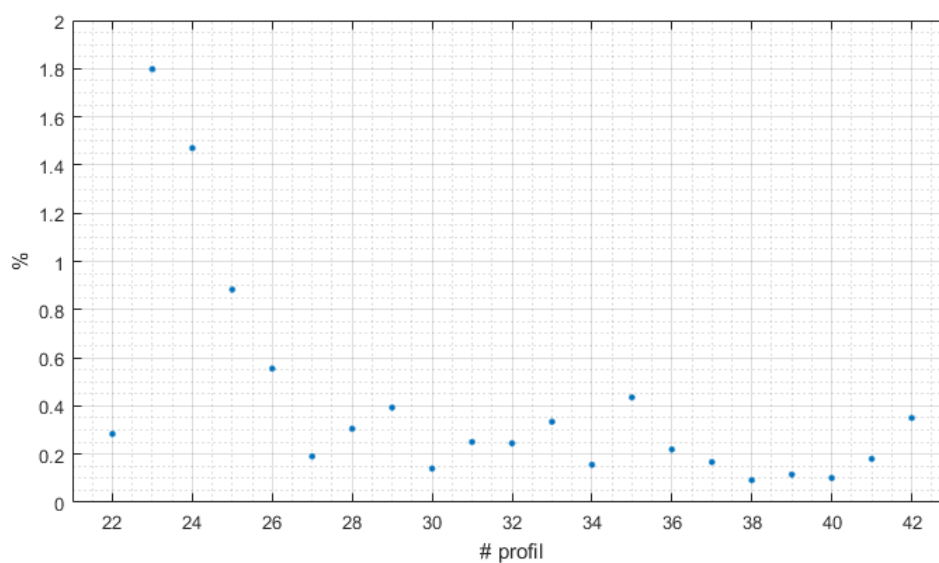


Figure 33. Pourcentage d'édition (critère de distorsion maximum) par profil HR

3.7. Analyse du signal sismique HR

Les bonnes conditions de mer et le bon équilibrage du *streamer* ont permis de le maintenir à une immersion de 2 m garantissant une signature optimale (immersion égale à celle de la source) et un contenu fréquentiel homogène. Les 21 contrôleurs d'immersion disposés tous les 150 m et la longueur filée de câble de tête *lead-in* de 50 mètres ont permis de maintenir cette immersion optimale. L'analyse des données d'immersion des contrôleurs indique que les 2 mètres sont bien respectés en moyenne dès le contrôleur #2. Le premier contrôleur, 5 m devant la première trace, maintient en moyenne une immersion de 1.6 m.

L'analyse fréquentielle des traces sismiques montre que le *streamer* reste le plus souvent à une immersion contenue entre 1.5 et 2.5 mètres : fréquence de coupure du réfléchi surface comprise entre 300 et 500 Hz.

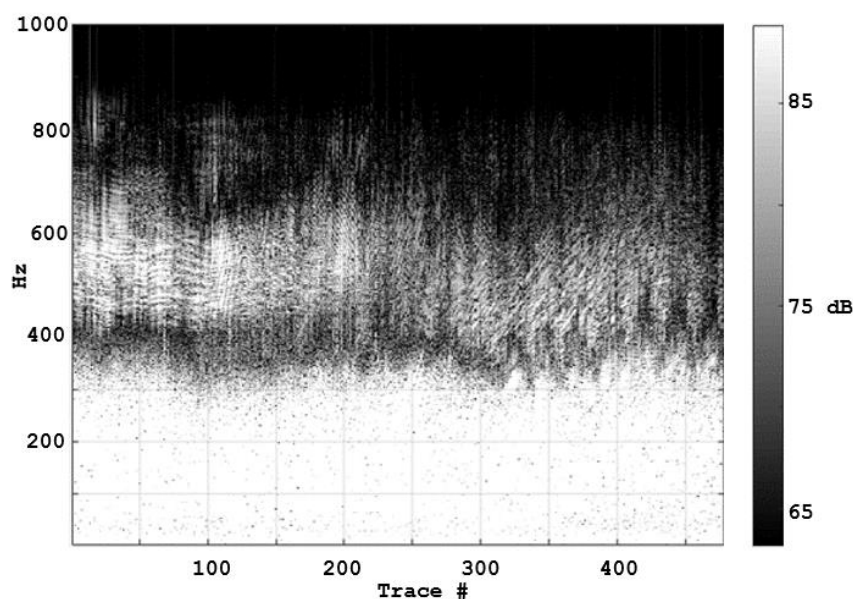


Figure 34. Exemple d'analyse spectrale des 480 traces (profil 36, tir 750) montrant en noir la fréquence de coupure associée à l'interférence avec le réfléchi surface, comme un instantané du profil d'immersion du streamer. La fréquence de coupure varie entre 300 et 450 Hz, correspondant à une gamme d'immersion de 1.7 à 2.5 m tout le long du streamer. Angle d'incidence maximum sur le fond de l'eau de l'ordre de 42° pour la trace 480 de ce tir.

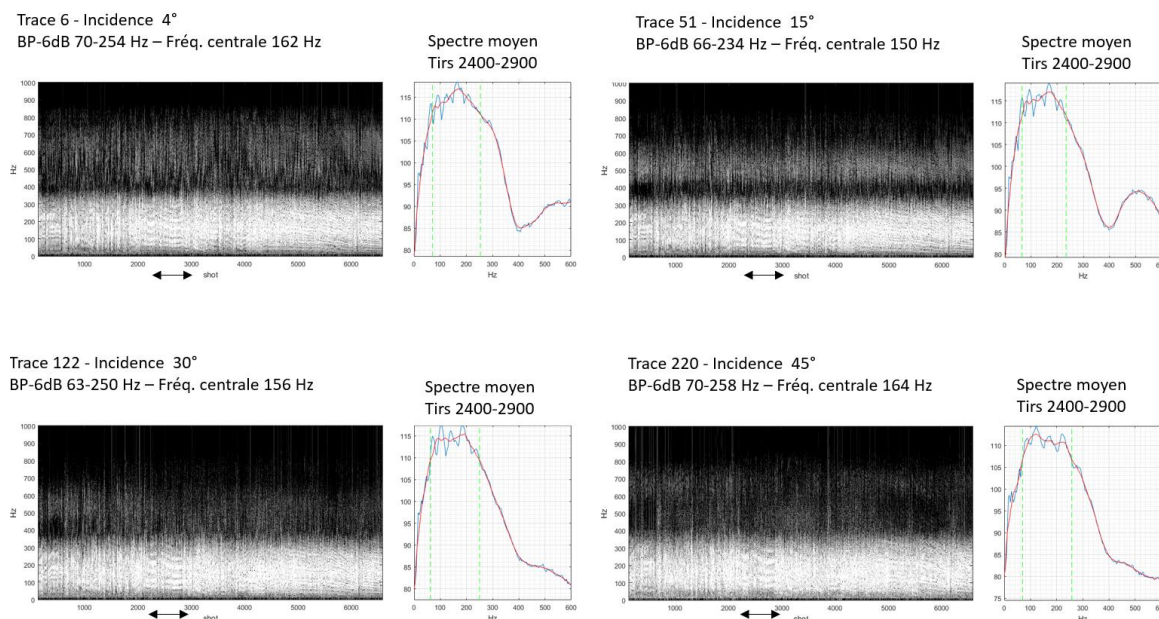


Figure 35. Contenu fréquentiel en fonction de l'angle d'incidence – Profil HR 41 – Analyse spectrale à partir du fond de l'eau sur une fenêtre de 250 ms pour 4 traces. Spectres moyens calculés sur 500 tirs (2400-2900) pour lesquels le fond de l'eau est plat (bathymétrie ≈ 730 m), correspondant à des angles d'incidence de 4°, 15°, 30° et 45°.

Jusqu'à un angle d'incidence maximum de l'ordre de 45° considéré dans cette première phase d'imagerie post-stack, le contenu fréquentiel des différentes traces est homogène : une bande passante à -6dB de l'ordre de 65-250 Hz et une fréquence centrale de l'ordre de 150-160 Hz. Le contenu fréquentiel est plus haute fréquence pour les plus grandes incidences du fait d'un délai *ghost* réduit.

Le filtre passe-bande 20-375 Hz appliqué par la suite préserve largement ce contenu fréquentiel.

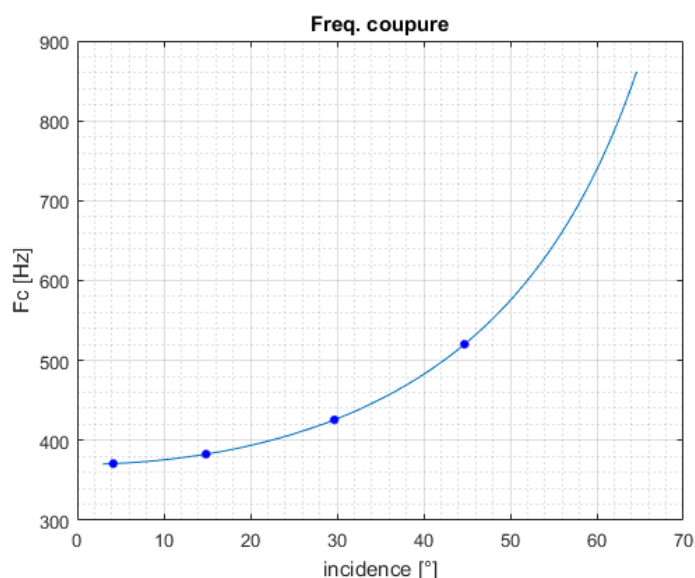


Figure 36. Modélisation de la fréquence de coupure due à l'interférence avec le réfléchi surface du récepteur (*ghost*) pour une bathymétrie de 730 m, une immersion streamer de 2 m, et des offsets variant de 75 à 3070 m (480 traces @ 6.25 m), correspondant aux paramètres de la figure précédente. Les points bleus correspondent aux traces (6, 51, 122, 220)

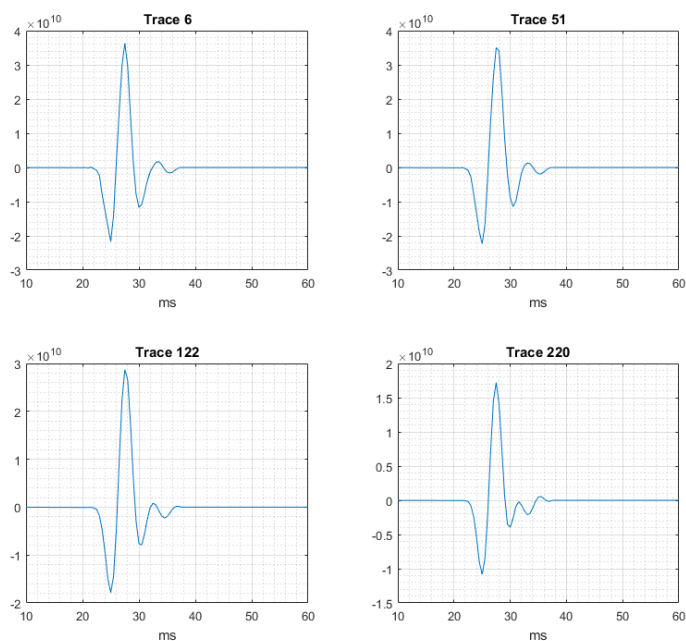


Figure 37. Signature sismique estimée à partir de la réflexion fond de l'eau – Profil HR 41 – Moyenne calculée sur 500 tirs pour lesquels le fond de l'eau est plat, correspondant à des angles d'incidence de 4°, 15°, 30° et 45°. Filtre passe-bande appliqué : 25-400 Hz, correction de divergence sphérique appliquée.

3.8. Analyse de vitesses RMS et sommation – sismique HR

Une première phase d'analyse de vitesse est réalisée de façon exhaustive et « rapide » : analyse de l'ensemble des profils avec un pointé de vitesse non horizon consistant à pas de 500 à 1000 mètres (80 à 160 bins). Elle a pour but de fournir un premier jeu de sections HR traitées et un premier modèle de vitesse qui pourra être utile aux phases d'imagerie suivantes. Elle doit également améliorer la profondeur de pénétration, même si à ce stade, aucun traitement anti-multiple n'est appliqué.

- *Calcul des panneaux de semblance*

Les panneaux de semblance servant au pointé de vitesse RMS sont calculés à partir de *supergathers* (2 bins de part et d'autre du bin d'analyse) tous les 40 bins (250 mètres) avec un pas de 2.5 m/s pour une gamme de vitesse RMS variable : de 1250 m/s à 2000 m/s pour les profils plateau et de 1450 à 2000 m/s pour les autres. Le mute anti-stretch est fixé à 150 % (1.5 fois la période). Le filtre passe-bande appliqué est 20-375 Hz ; un gain de type AGC est appliqué sur une fenêtre de 20 ms.

Pour prendre en compte la dérive du streamer sur les zones avec une forte variation latérale de la morphologie des structures géologiques, le code de calcul de semblance a été adapté (voir détails en annexe 2). Pour chaque *supergather*, plusieurs matrices de semblance sont calculées en considérant des longueurs réduites du streamer (streamer complet, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{4}$ de streamer).

- *Pointé de vitesse*

Le pointé est réalisé sur les panneaux de semblance à l'aide de l'interface Matlab *vel_analysis*. La section traitée à vitesse constante est utilisée comme guide, mais le pointé n'est pas réalisé à horizon consistant.

Le code d'analyse de vitesse a été modifié pour permettre de sélectionner le panneau de semblance pointé (réduction du nombre de traces utilisées, voir annexe 2) en fonction de la dérive du streamer et de la nature des structures. Le fichier de vitesses RMS indique pour chaque *supergather* pointé le panneau de semblance utilisé (streamer complet, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{4}$ de streamer) ainsi que la dérive latérale maximale de la partie de streamer utilisée.

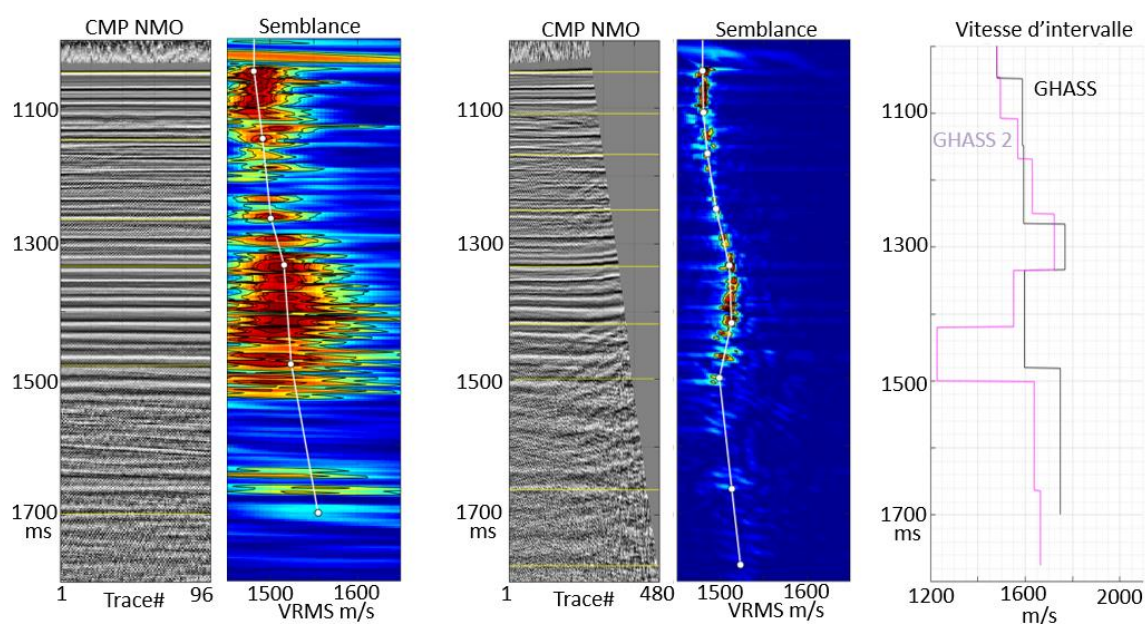


Figure 38. Exemple de pointé de vitesse RMS sur les données de sismique HR. Comparaison entre les données de la campagne GHASS (2015, streamer de 600 m) et celles de la campagne GHASS2 (2021, streamer de 3000 m) sur le même point géographique sur la zone de la crête. Figure de gauche : collection CMP et panneau de semblance profil 34a (GHASS) ; figure centrale : collection CMP et panneau de semblance profil 23 (GHASS2) ; figure de droite : comparaison des vitesse d'intervalle issues des deux lois Vrms pointées.

- **Sommation**

Le programme de sommation utilise le *binning* à 6.25 m calculé précédemment. Le modèle de vitesse RMS est celui pointé à pas de 500-1000 mètres. Il est interpolé linéairement entre deux points d'analyse.

Les données sismiques sont lues dans les fichiers SEGY collections point de tir (découpés par fichiers de 10 Go). Le délai source est corrigé. Un filtre passe-bande 25-400 Hz est appliqué. Le résultat de l'édition des traces bruitées est également pris en compte. Un mute anti-stretch est appliqué aux données lors de la correction NMO avant sommation. La couverture finale après mute anti-stretch est estimée sur le fond de l'eau ; pour cela, le temps d'arrivée du fond de l'eau a été pointé au préalable sur les sections imagées à vitesse constante.

Les tests de correction NMO réalisés ont permis de vérifier la relation de distorsion du signal par correction NMO (Yilmaz, 1987) : $\Delta f / f = \Delta t_{NMO} / t_0$. Ce rapport correspond en première approximation (vitesse constante) à un angle d'incidence donné. Ainsi, pour un angle d'incidence de l'ordre de 30°, la fréquence centrale est réduite à 130 Hz contre 150 Hz avant correction NMO. A 45° d'incidence, la fréquence centrale est de l'ordre de 100 Hz après correction NMO.

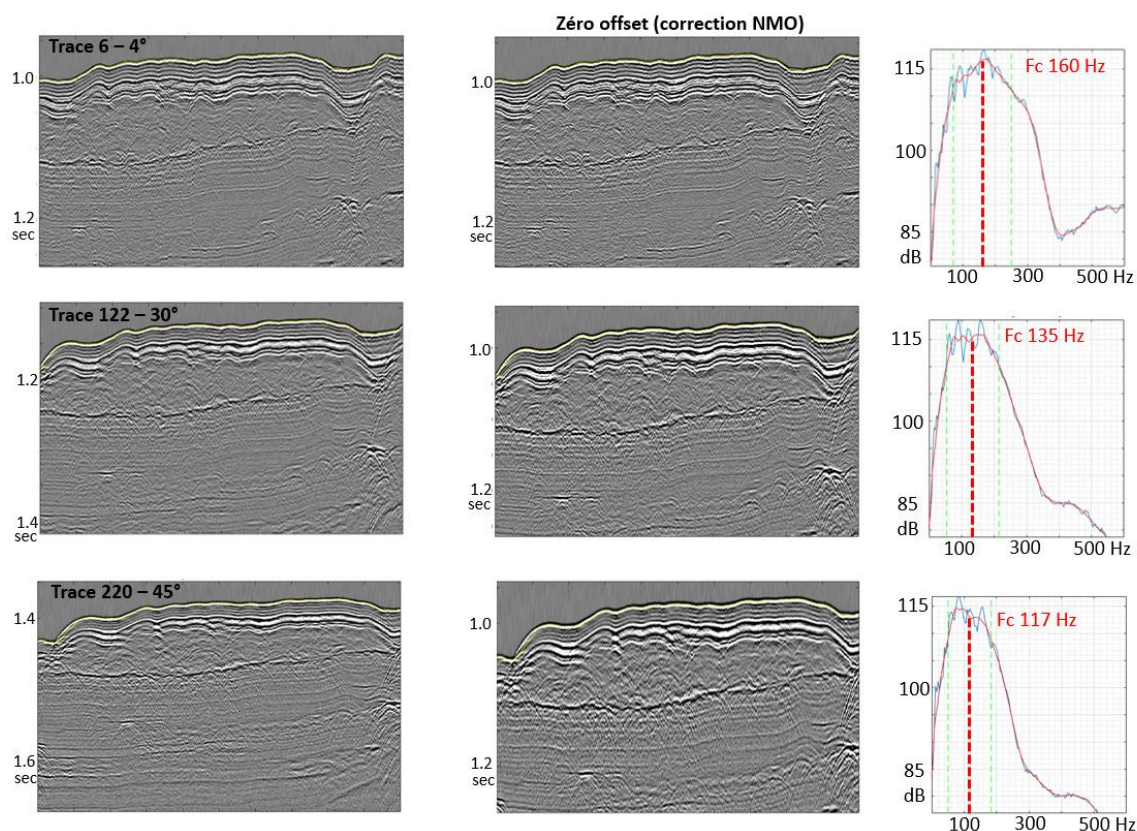


Figure 39. Illustration du décalage en fréquence lié à la correction NMO (étirement du signal pour les grands offsets) – profil 41 – tirs 2400-2900 – traces 6, 122 et 220 correspondant à des incidences sur le fond de l'eau de respectivement 4°, 30° et 45°. Figures de gauche : sections récepteur commun ; figures centrales : sections après correction NMO ; figures de droite : spectres moyens calculés sur les sections après correction NMO (Fc = fréquence centrale)

Les premiers tests de sommation ont été réalisés avec un mute anti-stretch à 150%. La comparaison des sections sommées sur 96 traces et 480 traces montre une dégradation si l'on somme la totalité des traces : en amplitude et en résolution. Cela tient à une correction NMO non optimale aux grands angles d'incidence, au filtre passe-bas induit par la correction NMO et à une éventuelle dérive du streamer. Un mute anti-stretch de 150% correspond en première approximation (vitesse constante) à un angle d'incidence maximum de 45°. Le choix a été fait pour cette première phase d'imagerie de limiter l'angle d'incidence à 30° en appliquant un mute anti-stretch de 116%, ce qui permet de sommer les 480 traces sans dégrader la résolution.

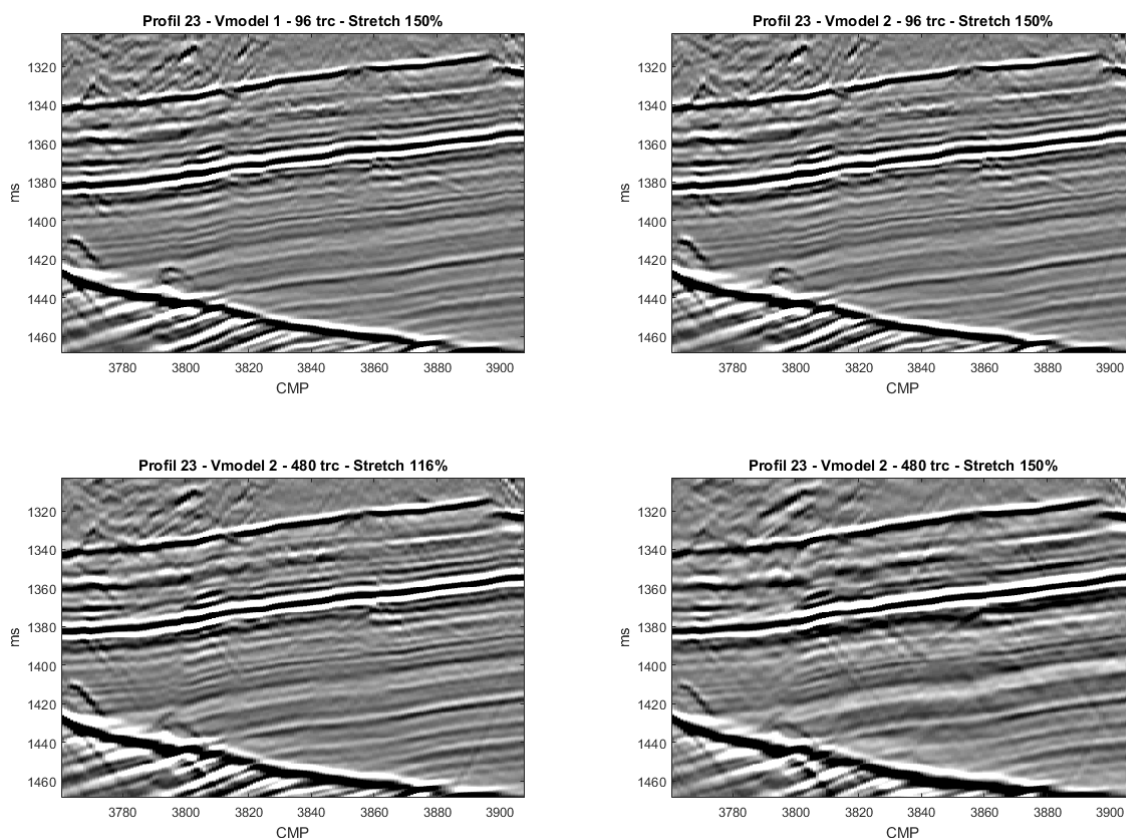


Figure 40. Comparaison de sections migrées post-stack, profil 23. Graphes du haut : sommation limitée à 96 traces ; à gauche avec le premier modèle de vitesse RMS pointé rapidement, à droite après pointé fin ; on ne note pas d'impact des variations fines du modèle de vitesse sur l'imagerie. Graphes du bas : sommation des 480 traces, avec un mute anti-stretch fixé à 150% à droite et 116% à gauche ; on note une dégradation de la résolution en appliquant un mute pas suffisamment restrictif.

En résumé, pour préserver le contenu fréquentiel de la sismique HR en imagerie NMO-Stack, il est préférable de diminuer la valeur du mute anti-stretch à 116% et sommer les 480 traces, plutôt que de ne sommer que 96 traces avec un mute anti-stretch à 150%. Cela permet de conserver une homogénéité en terme d'angle d'incidence, de contenu fréquentiel, indépendamment de la bathymétrie.

La limitation de la couverture induite par le mute anti-stretch de 116% est fonction de la bathymétrie. Ordre de grandeur de la couverture sur le fond de l'eau pour 480 traces sommées :

- profils plateau : 8 (contre 23 avec un anti-stretch de 150%) ;
- profils zone centrale : 80 (contre 160 avec un anti-stretch de 150%) ;
- profils bassin : 130 (contre 225 avec un anti-stretch de 150%) ;

- *Migration*

La section sommée est importée sur la station de traitement Promax afin de réaliser la migration post-stack temps utilisant le modèle de vitesse pointé (migration de type Kirchhoff).

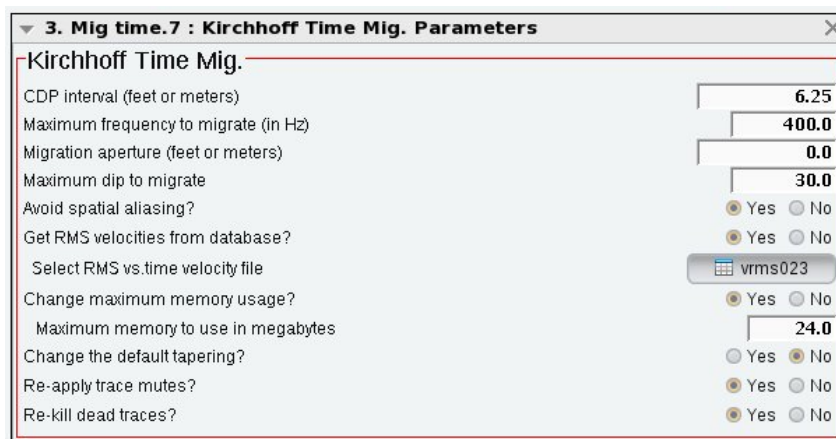


Figure 41. Paramètres de migration (Promax) appliqués sur les sections sommées HR

- *Analyse de vitesse « fine »*

Les premières analyses de vitesse ont montré la capacité de caractériser finement les vitesses du système gaz / hydrates de gaz grâce aux grands offsets (3000 m pour la sismique HR). Afin de mieux cibler les zones marquées par des anomalies de vitesse, les profils centrés sur la zone d'intérêt principal (système gaz / hydrates de gaz de la zone de la crête) ont fait l'objet d'une analyse de vitesse RMS avec un pas de 250 m.

| Profil | Nb bins | Bins analysés à pas de 250 m | Nb de points d'analyse |
|--------|---------|------------------------------|------------------------|
| 22 | 7754 | totalité | 189 |
| 23 | 7290 | totalité | 178 |
| 30 | 4445 | totalité | 108 |
| 31 | 4750 | totalité | 112 |
| 32 | 5241 | totalité | 129 |
| 34 | 9778 | 1-5000 | 153 |
| 36 | 15475 | 6000-11000 | 203 |
| 38 | 7710 | totalité | 189 |
| 40 | 9918 | 2100-7000 | 163 |
| 41 | 10828 | totalité | 267 |

Tableau 3. Liste des profils de sismique HR analysés (vitesse RMS) à pas de 250 m

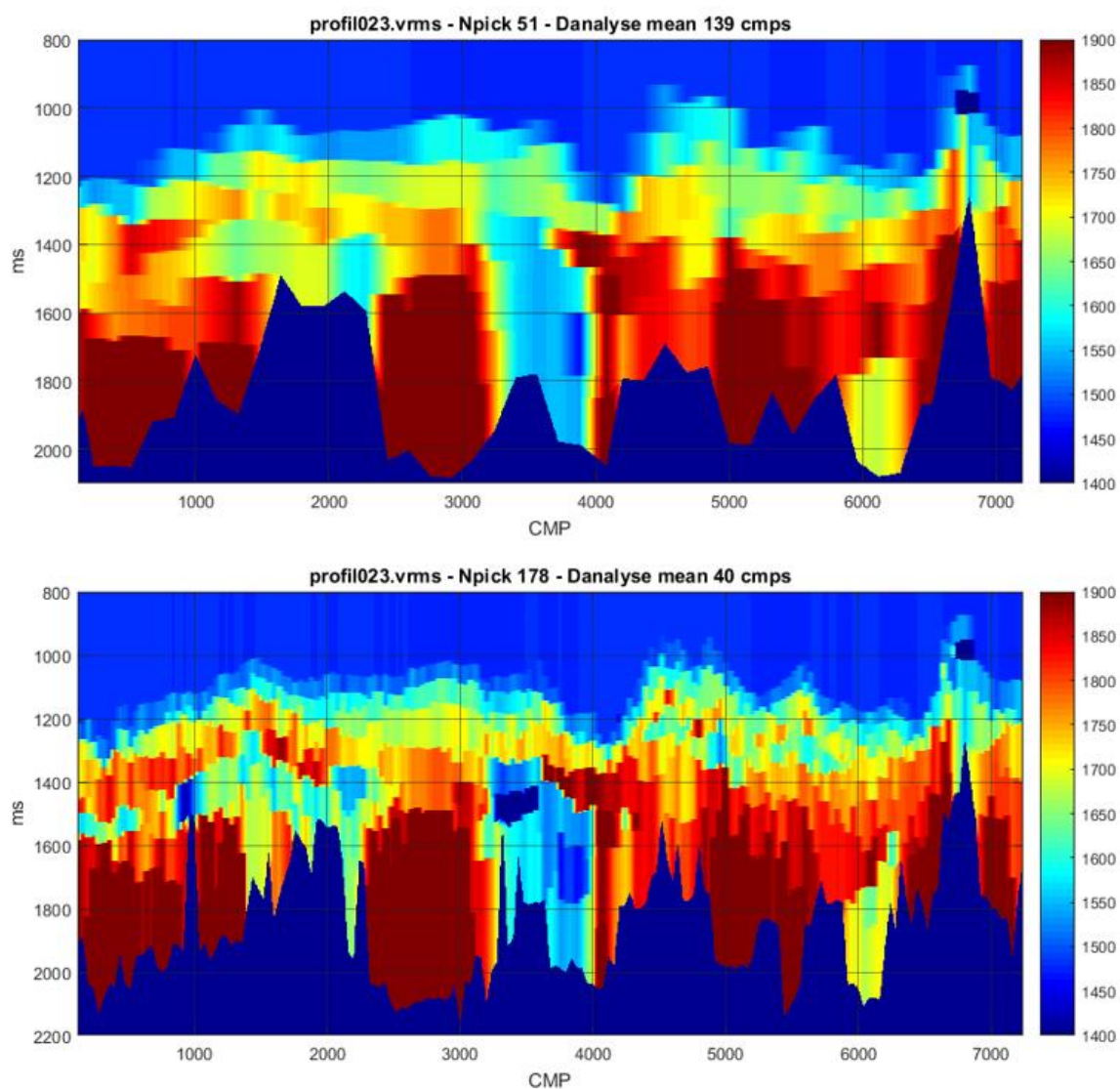


Figure 42. Exemple de modèles de vitesse d'intervalle (m/s) issus du pointé de vitesse RMS sur la sismique HR. Profil 23. Figure du haut : analyse rapide à pas de 500-1000 m ; figure du bas : analyse « fine » à pas de 250 m.

4. Traitement des données SIS1 480 ci

Voir l'annexe 1 pour une représentation schématique de la séquence de traitement SIS1 BF.

4.1. Délai source – sismique SIS1

La gestion des tirs par le contrôleur de source GunLink® (Seamap) permet un enregistrement « zéro délai » des données : le début de l'acquisition correspond au déclenchement acoustique des canons. Les données n'ont donc pas à être corrigées du délai source.

4.2. Traitement des capteurs de navigation – sismique SIS1

- *Données GPS navire et bouée de queue*

Le système de positionnement (CINNA et ECOS) a fonctionné correctement, excepté pour le profil 46 durant lequel le rafraîchissement du message raw GPS a été interrompu ponctuellement pour les tirs 473-474 et 883 à 898, du fait d'une erreur lors de tests de câblage. Pour ces tirs, la position ECOS estimée et intégrée en temps réel a été utilisée.

Les données de positionnement navire, bouée de queue ainsi que les mesures de gyrocompas du navire sont de bonne qualité. Il n'y a eu aucune édition sur ces mesures.

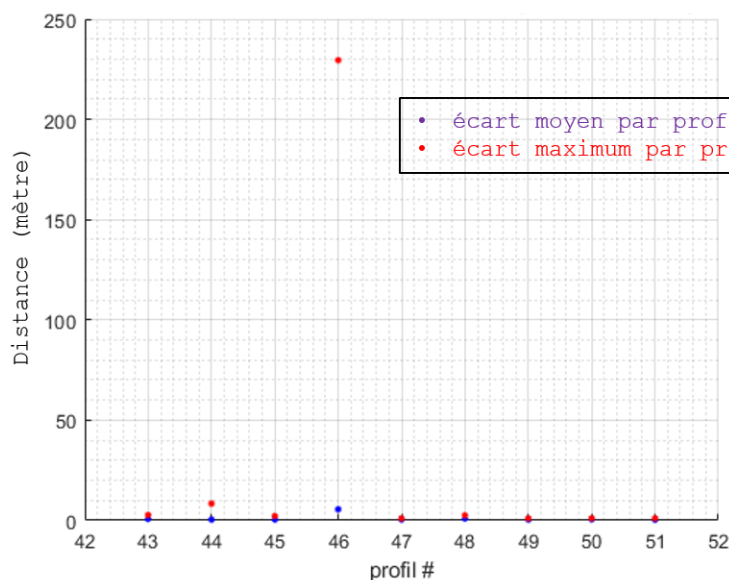


Figure 43. Ecart en distance entre la position du point de référence navire ECOS (intégration temps réel) et le GPS « brut » traité en temps différé : en bleu l'écart moyen, en rouge l'écart maximal. L'écart maximal conséquent pour le profil 46 est la conséquence du test de câblage ayant entraîné un arrêt ponctuel du rafraîchissement du message GPS « brut ».

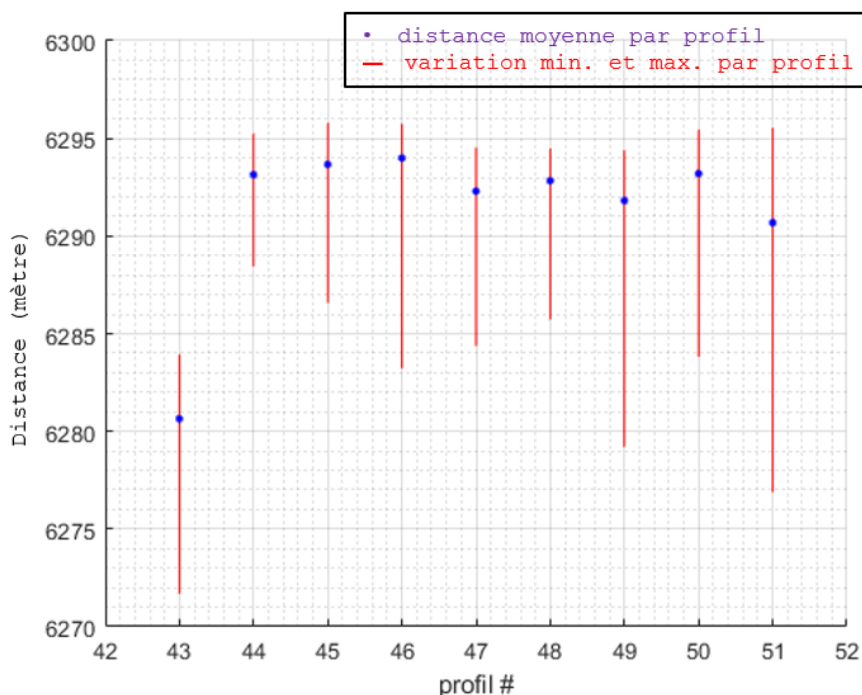


Figure 44. Distance (en m) entre le point de référence navire et la bouée de queue traités en temps différé. En bleu, moyenne, en rouge écart-type (variations liées en partie à la dérive du streamer et aux girations). On peut noter le changement de géométrie entre les profils 43 et 44 avec l'ajout d'une dizaine de mètres de câble de tête du streamer (lead-in).

- *Données GPS source*

La source SIS1 est équipée d'un positionnement GPS, ce qui n'est pas le cas pour la source HR. Pour tous les profils SIS1 acquis, excepté le profil 46, la position GPS source est utilisée au rejeu après édition manuelle des quelques sauts ponctuels. Pour chaque profil, moins de 1% des positions GPS source ont dû être éditées.

Pour le profil 46, les sauts étant plus récurrents et de plus forte amplitude, la position GPS source ne peut pas être utilisée. Les autres profils ainsi que les portions du profil 46 pour lesquelles la position GPS est correcte sont utilisés afin d'estimer la longueur filée du câble source et l'offset latéral, la source étant très fortement ramenée dans l'axe du navire par son câble ombilical. La position source du profil 46 est ensuite estimée en projetant la longueur filée du câble source derrière le navire. La longueur estimée du câble source est de 52.4 m (câble source + distance centre source-GPS) et l'offset latéral de la source à 5 m sur tribord.

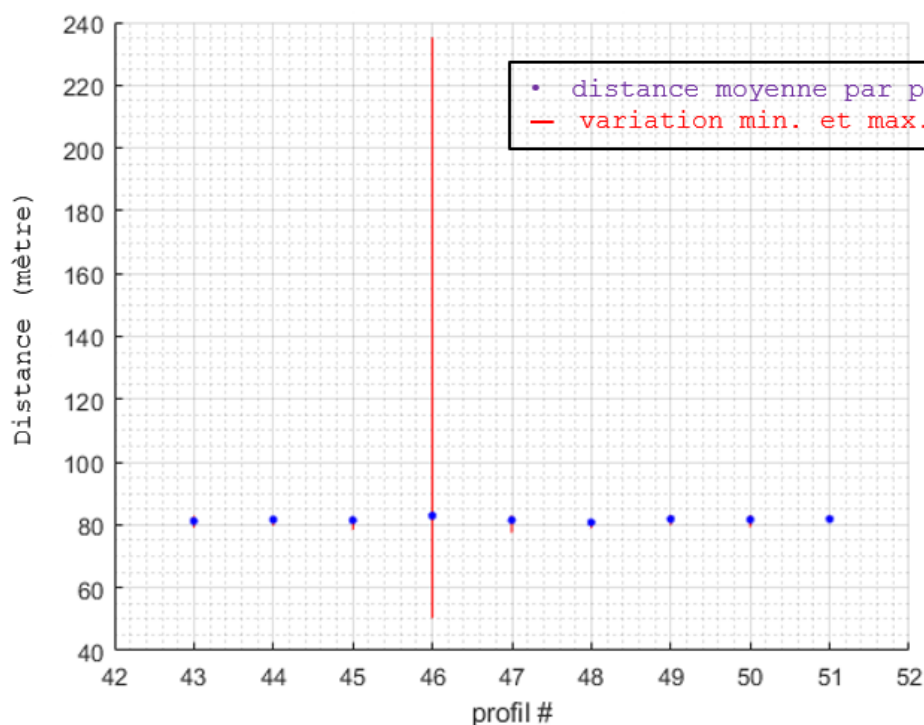


Figure 45. Distance (en m) entre le point de référence navire et la position GPS « brute » de la source SIS1. En bleu, la moyenne, en rouge la plage de variations valeurs entre les minimum et maximum (variations liées en partie aux girations). On peut noter les écarts plus conséquents pour le profil 46 dus aux sauts du GPS source.

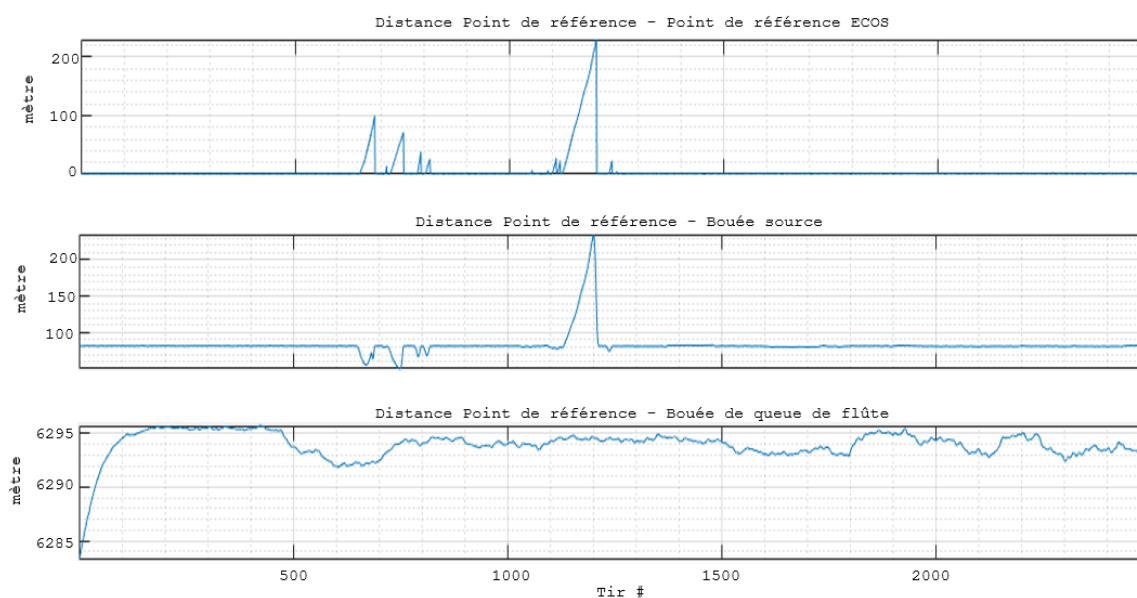


Figure 46. Ecart en distance entre le point de référence navire et la position ECOS (figure du haut), la position GPS source (figure du centre), et la position GPS de la bouée de queue de flûte (figure du bas) calculés pour le profil 46. On peut noter les problèmes de rafraichissement du message GPS navire et les sauts importants du GPS source.

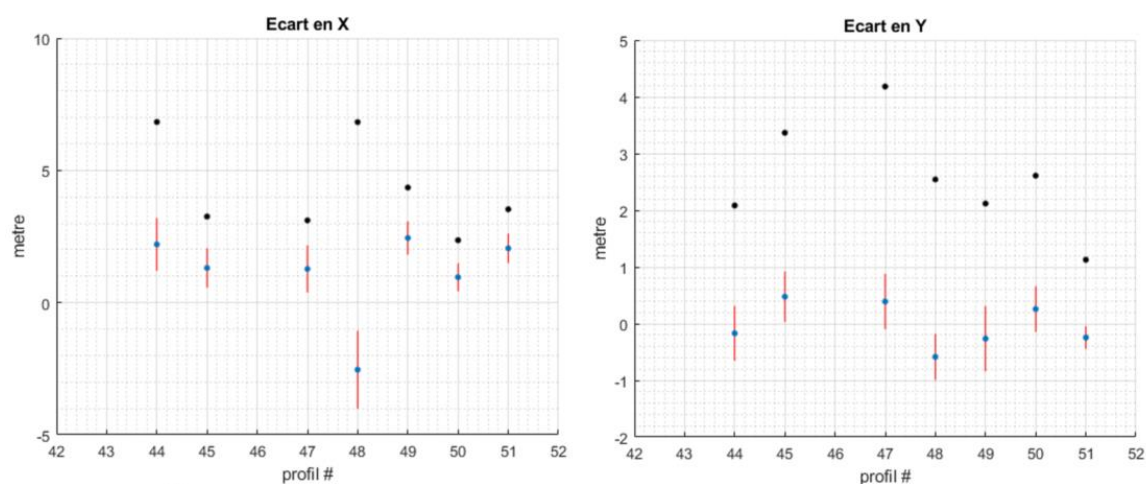


Figure 47. Comparaison entre la position source donnée par le GPS et la position source estimée par projection derrière le navire. A gauche : écart en X soit latéralement (perpendiculairement à l'avancée du navire). A droite : écart en Y soit longitudinalement (dans l'axe du navire). En bleu : écart moyen ; en noir : écart maximal ; en rouge : écart-type sur l'écart.

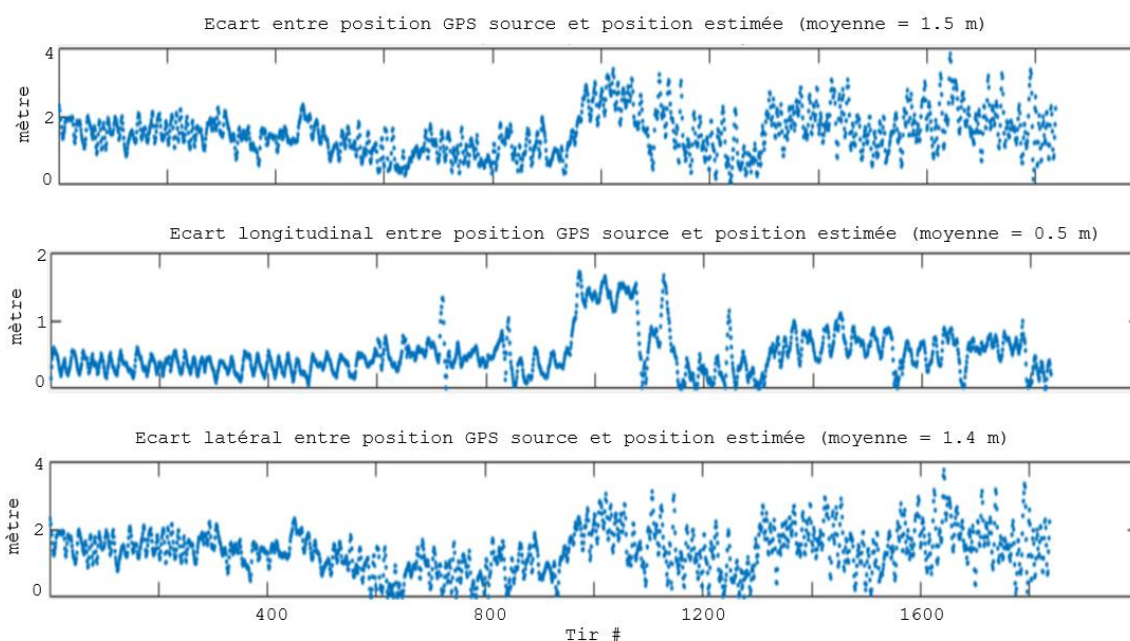


Figure 48. Comparaison entre positions GPS source et positions source obtenues par projection de la longueur filée du câble source derrière le navire pour le profil 46. Les tirs 600 à 1250 pour lesquels la position GPS source n'est pas utilisable ont été exclus. En haut : écart total ; au centre : écart longitudinal ; en bas : écart latéral.

- **Données caps**

Le cap gyrocompas du navire ne présente pas de défaut. Les caps avions sont globalement peu bruités avec des écarts-types inférieurs à 0.5° (valeurs calculées sur le bruit des mesures de cap). Le profil 43 est plus bruité (écart type moyen de 1°), notamment en queue de flûte.

Les mesures de caps avion sont tout d'abord éditées manuellement de manière à supprimer les plus gros artéfacts. Dans la majorité des cas, la proportion des données de caps éditées manuellement (programme *filtre-compas.m*) est inférieure à 0,5 %. Elle est de 2.4 % pour le profil

43. Après édition, les données sont filtrées en 2D, filtre Savitzky-Golay d'ordre 1 en 2 passes : une première passe suivant la dimension des contrôleurs d'immersion (filtre sur 3 contrôleurs) puis selon la dimension des tirs (filtre sur 7 tirs). Un filtre passe-bas final est ensuite appliqué pour chaque avion suivant la dimension des tirs.

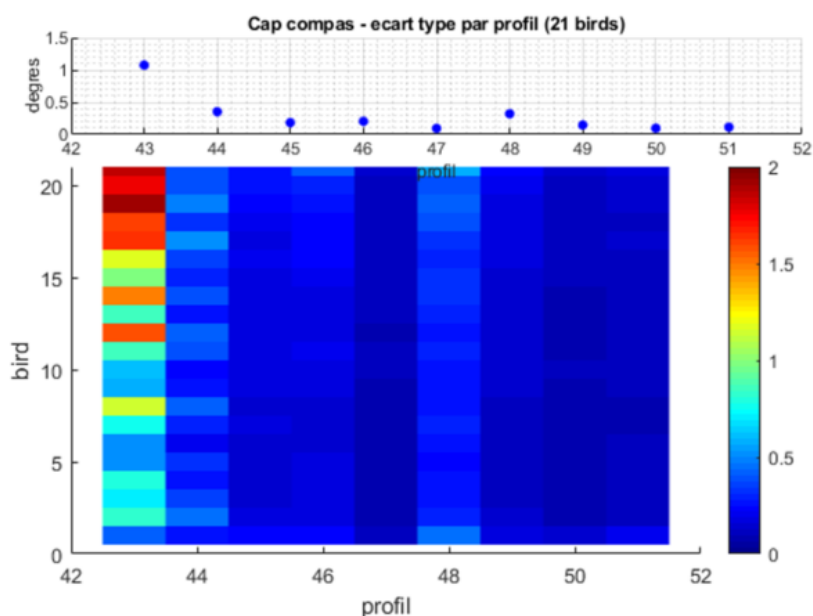


Figure 49. Ecart type sur le bruit des mesures compas magnétiques des contrôleurs d'immersion. Figure du haut : moyenne par profil sur les 21 contrôleurs d'immersion. On peut noter le profil 43 plus bruité, particulièrement en queue de flûte.

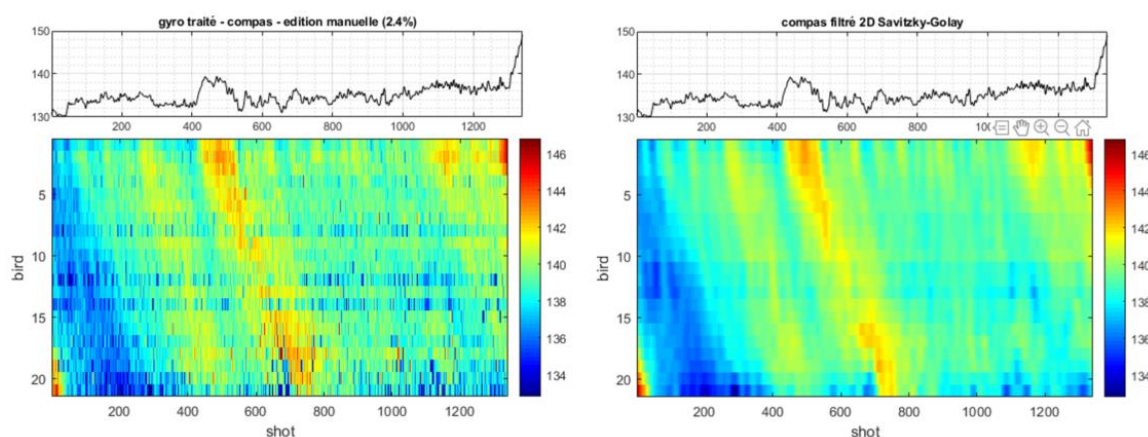


Figure 50. Profil 43, caps avions après édition manuelle (à gauche) et après filtrage 2D Savitzky-Golay (à droite). La courbe du haut représente les variations du cap gyrocompas du navire.

4.3. Traitement du positionnement – sismique SIS1

- *Ajustement de la géométrie d'acquisition*

Au cours de l'acquisition sismique SIS1 480 ci, il n'y a eu ni panne, ni remontée programmée pour maintenance. En revanche, le câble de tête streamer (*lead-in*) a été allongé d'une dizaine de mètres entre les profils 43 et 44. Il faut donc considérer deux géométries différentes :

- une géométrie particulière pour le profil 43 avec un lead-in de l'ordre de 90 m ;
- une géométrie constante pour tous les autres profils avec un lead-in de l'ordre de 100 m.

La géométrie est systématiquement vérifiée au rejeu (programme *check_posit*) pour chaque profil par comparaison entre le pointé de l'arrivée directe et la modélisation du temps d'arrivée directe basée sur la géométrie théorique. Pour cela, les temps directs des traces 1, 24 et 48 sont modélisés puis sont représentés sur un point de tir moyen correspondant à la somme de plusieurs tirs pour lesquels la flûte est alignée. L'utilisation d'un point de tir moyen permet une meilleure analyse en s'affranchissant des phases parfois multiples et des amplitudes parfois faibles du *first break* sur les points de tir unitaires. La vitesse de propagation dans l'eau en surface utilisée pour la modélisation est de 1517 m/s (cf. §3.3).

Après comparaison des positions GPS source et des positions estimées de la source par projection derrière le navire, la longueur de câble source est maintenue à 52.4 m (extrémité du tangon – centre source), la distance « centre source – point de traction » étant de 4.2 m. L'offset latéral source est réduit à 5 m car la source est très fortement ramenée dans l'axe du navire par la traction sur l'ombilical. L'écart longitudinal (en Y) entre les positions GPS source et les positions estimées est le plus impactant pour les offsets source-récepteur. Il est inférieur au mètre pour tous les profils.

Suite aux comparaisons entre pointé et modélisation du temps de l'arrivée directe, la géométrie a été légèrement modifiée par rapport à celle utilisée à bord lors du contrôle qualité. La position source est connue (GPS). Afin de minimiser l'écart entre pointé et modélisation, la longueur du lead-in est réduite de 3 m pour les deux configurations, soit 87 m pour le profil 43 et 97 m pour tous les autres.

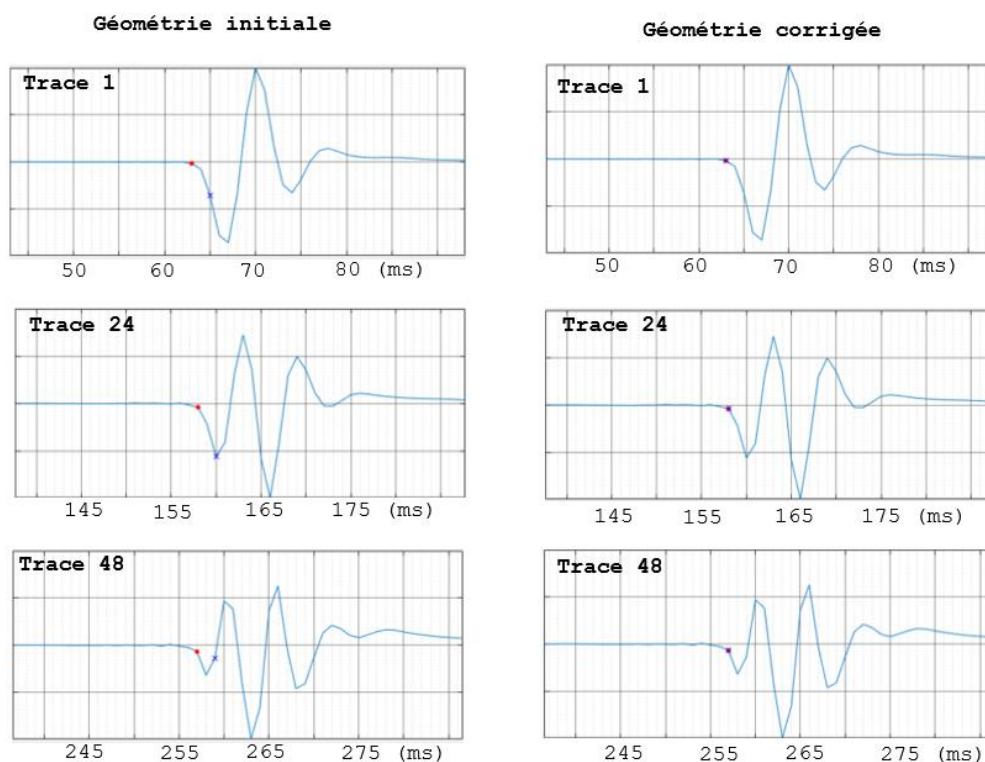


Figure 51. Profil051 - Comparaison des temps d'arrivée directe pointés (point rouge) et calculés à partir de la géométrie d'acquisition (croix bleue). A gauche : avant correction de la géométrie. A droite : après prise en compte de la géométrie corrigée (réduction de la longueur du câble lead-in du streamer). Amplitudes normalisées.

- **Positionnement source – récepteur – bin**

Une fois la géométrie vérifiée, le positionnement de la source et des récepteurs est calculé via le logiciel SolidQC (version 3.4.0).

La position source utilisée est :

- la position GPS source éditée pour tous les profils, excepté le 46 ;
- la position déterminée en projetant la longueur estimée du câble source suivant le cap gyrocompas du navire pour le profil 46.

Les positions des récepteurs (960 traces à 6.25 m) et de la bouée de queue sont déterminées en utilisant les caps compas des contrôleurs d'immersion traités, afin de prendre en compte la déformée de la flûte. La comparaison entre la position estimée de la bouée de queue et sa position GPS permet de corriger cette déformée. Ce décalage est imputable aux incertitudes sur les mesures de caps des contrôleurs d'immersion, essentiellement dues à l'imprécision de leur calibration. La correction est en moyenne de 1.7 degrés sur la longueur de la flûte (~6200m), elle est au maximum de 2.7 degrés pour le profil 43, profil dont les mesures de caps avion sont les plus bruitées. La déformée de la flûte est ainsi recalée depuis son point de traction jusqu'à la position GPS de la bouée de queue.

Comme pour les données HR, les positions sources et récepteurs sont projetées dans un référentiel cartésien spécifique pour chaque profil, avec Y suivant la direction d'acquisition (*in-line*) et X perpendiculairement au profil (*cross-line*).

Les données sont ensuite triées en collection point milieu commun (CMP) en réalisant un *binning* à pas de 25 m. La taille du bin fixée à 25 m est cohérente avec la résolution latérale attendue et maximise le taux de couverture, augmentant théoriquement le rapport signal sur bruit, notamment pour les réflecteurs profonds, objectifs des données de sismique SIS1 480 ci.

La position (X,Y) des centres des bins est calculée de manière à privilégier les offsets courts : les positions des bins sont centrées sur les positions CMPs de la première trace. Pour chaque trace (couple source-récepteur) enregistrée, le fichier *binning* contient la position source, récepteur, bin, n° de bin et ordre de couverture théorique.

L'étalement latéral des points milieux des traces par rapport au centre des *bins* est également contrôlé. Il est dû à la dérive de la flûte. Sur l'ensemble des données, l'étalement moyen entre le centre des *bins* et les points milieux des 960 traces est proche de 180 m, reflet d'une dérive moyenne relativement limitée de la flûte. Cette moyenne cache cependant des disparités entre profils. Par exemple, le profil 47 présente une dérive très faible avec un étalement moyen de 64 m, alors que le profil 49 a lui un étalement moyen de 284 m. Des variations conséquentes sont également constatées le long d'un même profil avec des étalements localement plus élevés pouvant aller jusqu'à 400-500 mètres.

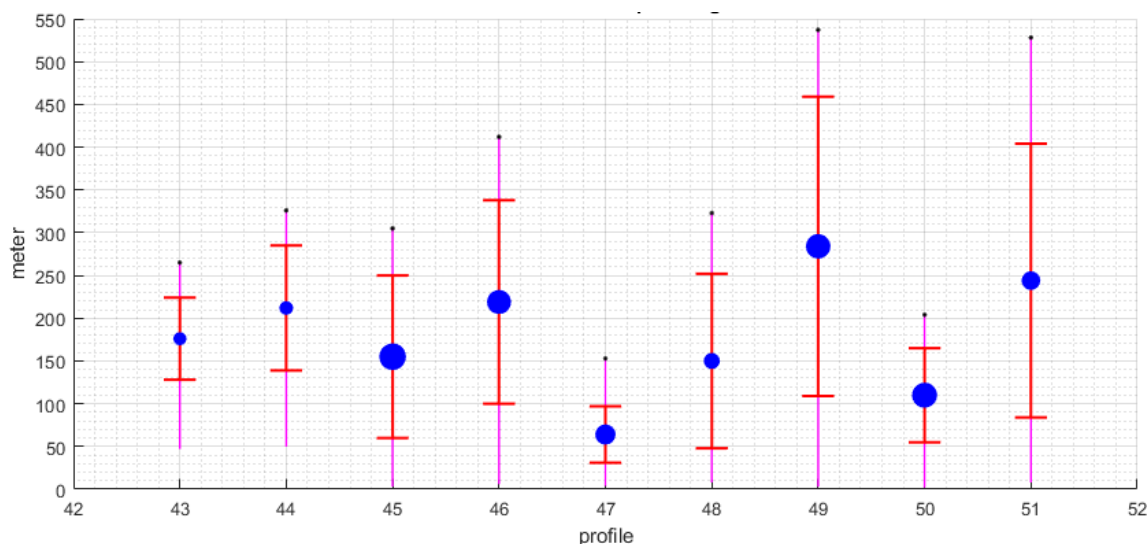


Figure 52. Statistiques par profil sur l'étalement latéral des CMPs ($XCMPs - X_{\text{centre bin}}$). Points bleus : moyenne (taille du point fonction du nombre de bins, i.e. de la longueur du profil) ; barre rouge : écart type ; barre mauve : [minimum maximum] ; point noir : maximum.

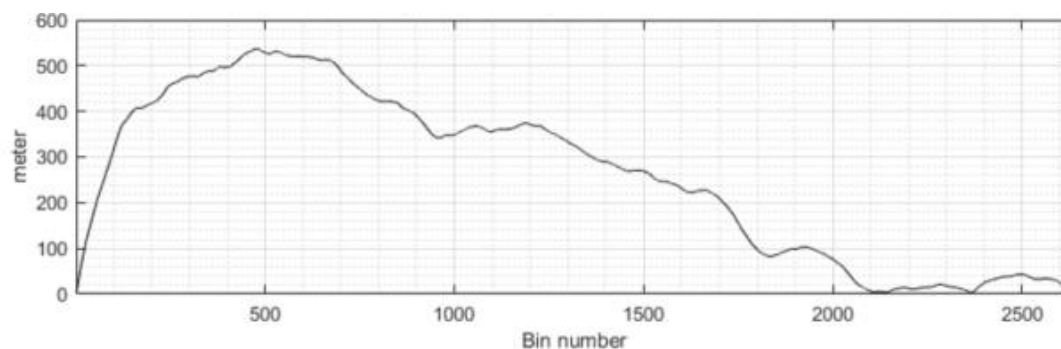


Figure 53. Illustration de l'étalement latéral des CMPs (prise en compte des 960 traces) le long du profil 49.

Lors du *binning*, toutes les traces sont prises en compte, quel que soit l'étalement latéral. L'impact d'une limitation de l'étalement sur la couverture théorique peut être plus ou moins important selon les profils.

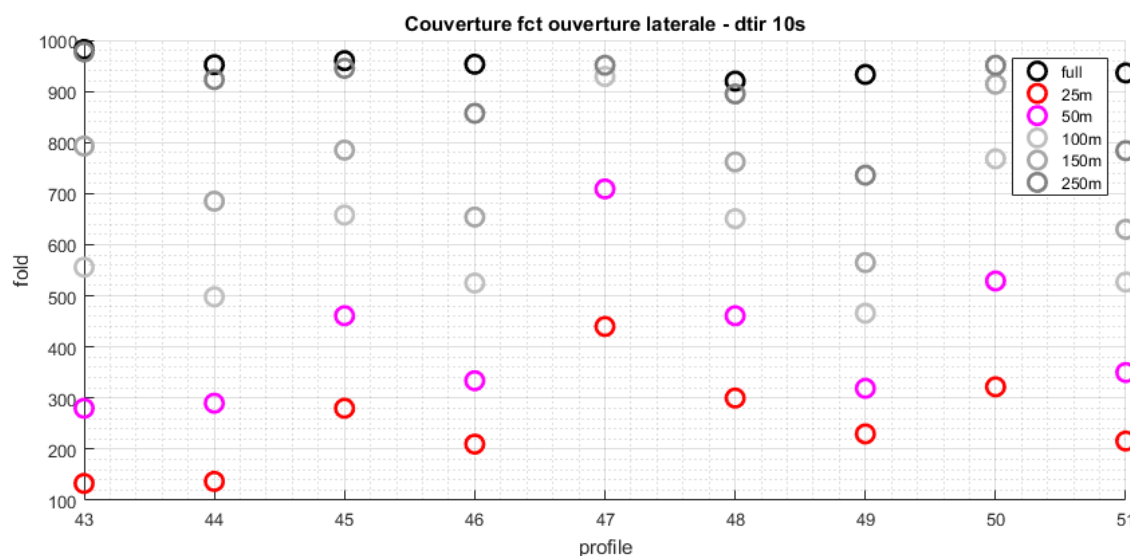


Figure 54. Couverture théorique sur les bins de 25 m - moyenne par profil en fonction de la limitation de l'étalement latéral. Le profil 47 est marqué par une dérive du streamer très faible d'où une couverture qui reste élevée (>400) même pour une limitation de l'étalement à 25 m.

Pour les neuf profils de sismique SIS1, la couverture nominale se situe autour de 950 avec des petites disparités en fonction de la vitesse du bateau (la majorité des profils ont été acquis à une vitesse fond proche de 4.9 nœuds). Cette couverture nominale sera ensuite largement réduite par l'application du mute anti-stretch avant sommation des traces.

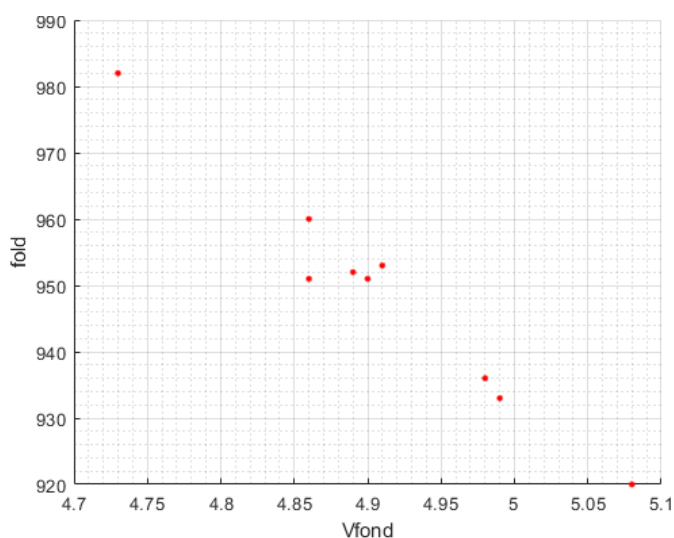


Figure 55. Couverture nominale (sismique SIS1, 960 traces, bin de 25 m) moyenne par profil en fonction de la vitesse fond moyenne.

4.4. Reformatage des données sismiques SIS1

La procédure habituelle de reformatage des données SEG-D consiste à générer un fichier SEG-Y collections points de tir par profil. La taille du fichier SEG-Y généré correspond au volume des données brutes SEG-D (un fichier par tir), soit jusqu'à 90 Go par profil pour les profils SIS1 de la campagne GHASS2. Cette taille de fichier est trop importante pour les traitements à suivre qui accèdent aux traces de façon non séquentielle du fait du tri en collections CMPs (jusqu'à 3.5 millions de traces pour un profil). Les données prétraitées collections points de tir au format SEG-Y sont donc automatiquement découpées en fichiers de 10 Go ; chaque fichier contient un nombre limité de points de tir.

Les traces SEG-Y sont codées au format IEEE Float big-endian. Le SEG-Y est de type révision 1. Un filtre passe-haut à 10 Hz est appliqué pour s'affranchir des variations basses fréquences du signal (houle). Les positions source, récepteur et bin sont renseignées dans les entêtes de trace. Le délai source est nul. Les coordonnées sont exprimées dans le référentiel (X, Y) du profil en centimètres. Les paramètres de projection sont renseignés dans l'entête EBCDIC du fichier SEG-Y.

Les fichiers SEG-Y des données SIS1 BF (960 traces échantillonnées à 1 ms, cadence de tir de 10 s, enregistrement de 9 s) représentent un volume total de 600 Go.

4.5. Imagerie à vitesse constante – sismique SIS1

Afin de valider le positionnement et le reformatage, les données sont sommées après correction NMO (mute anti-stretch fixé à 150%) et migrées à vitesse constante (1485 m/s). Seules les 96 premières traces sont sommées afin de s'affranchir des problèmes de dérive. Cette première section donne également un premier aperçu des structures imagées et servira de guide aux analyses de vitesse.

4.6. Edition des traces bruitées – sismique SIS1

La nature du bruit est identique à celle des données de sismique HR (cf. §3.6). On retrouve notamment quelques traces affectées par des discontinuités de forte amplitude (exemple : trace 285) détectées par une simple analyse de la dérivée de la trace après application d'un filtre passe-bas à 10 Hz.

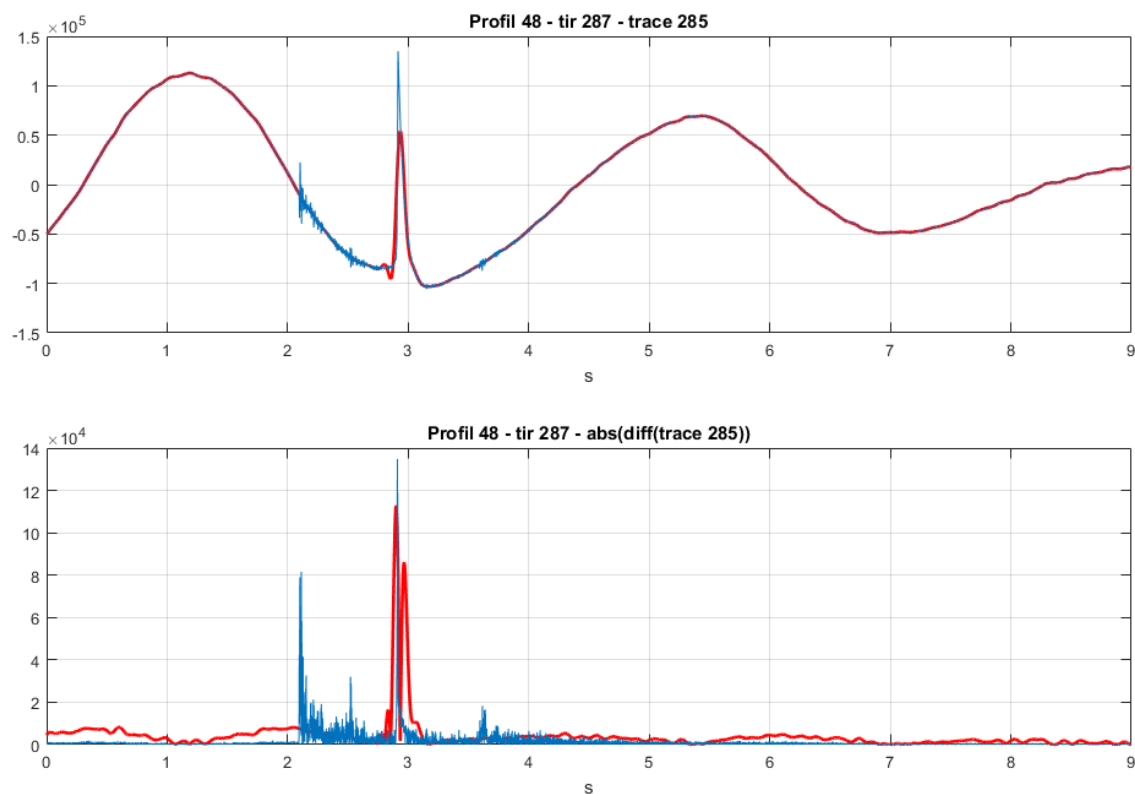


Figure 56. Exemple de trace présentant un défaut (discontinuité du signal brut), profil 48, trace 285, tir 287. La figure du bas représente la valeur absolue de la dérivée de la trace. Les courbes rouges correspondent au signal filtré passe-bas (10 Hz). Sur le graphe du bas, les variations d'amplitude liées aux réflexions et à la discontinuité sont du même ordre de grandeur avant filtre. Après filtre passe bas, seul le défaut lié à la discontinuité du signal reste prépondérant.

La méthode d'édition par seuil sur l'attribut de distorsion est identique à celle appliquée pour la sismique HR (cf. §3.6). Les traces bruitées correspondent aux emplacements des 21 contrôleurs d'immersion. Le pourcentage des traces bruitées est plus élevé que pour la sismique HR avec une mer globalement plus agitée, surtout pour les deux premiers profils 43 (17.5 % d'édition) et 44 (13 % d'édition). Les contrôleurs d'immersion doivent « travailler » plus (actionnement des ailes) pour maintenir l'immersion à 5 m, engendrant plus de bruit.

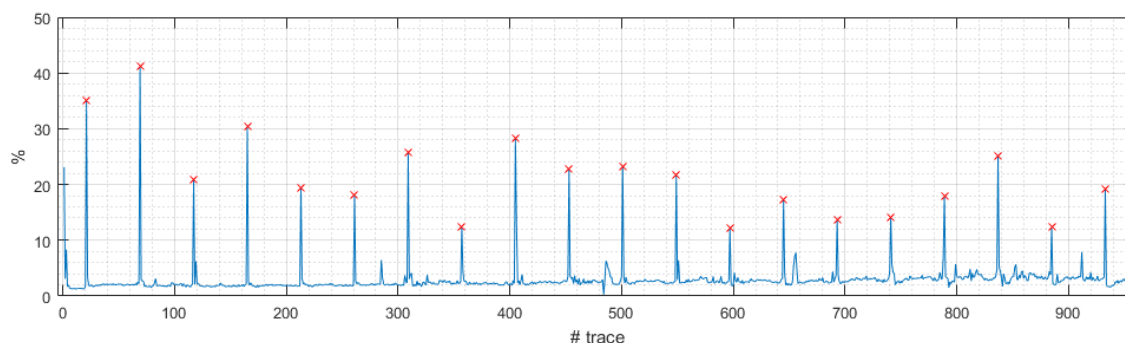


Figure 57. Pourcentage d'édition (critère de distorsion maximum) par trace sur l'ensemble des profils SIS1 ; les croix rouges indiquent les positions des contrôleurs d'immersion.

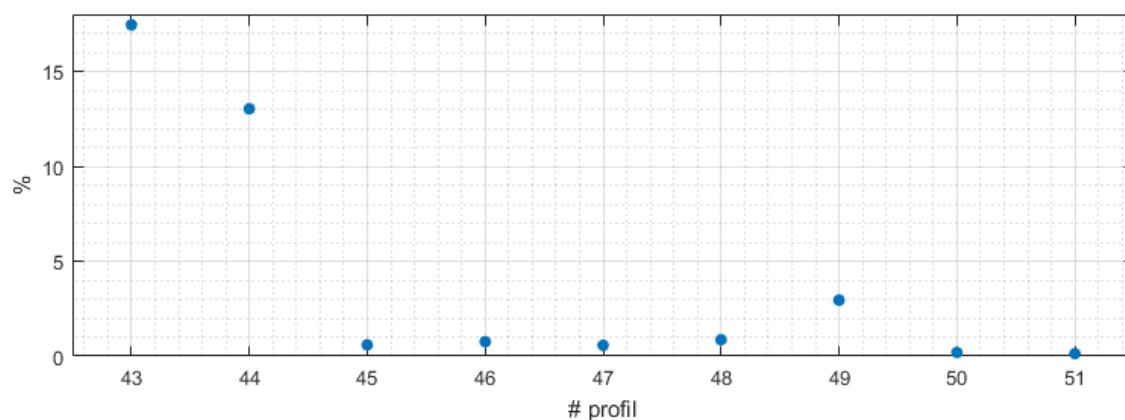


Figure 58. Pourcentage d'édition (critère de distorsion maximum) par profil SIS1

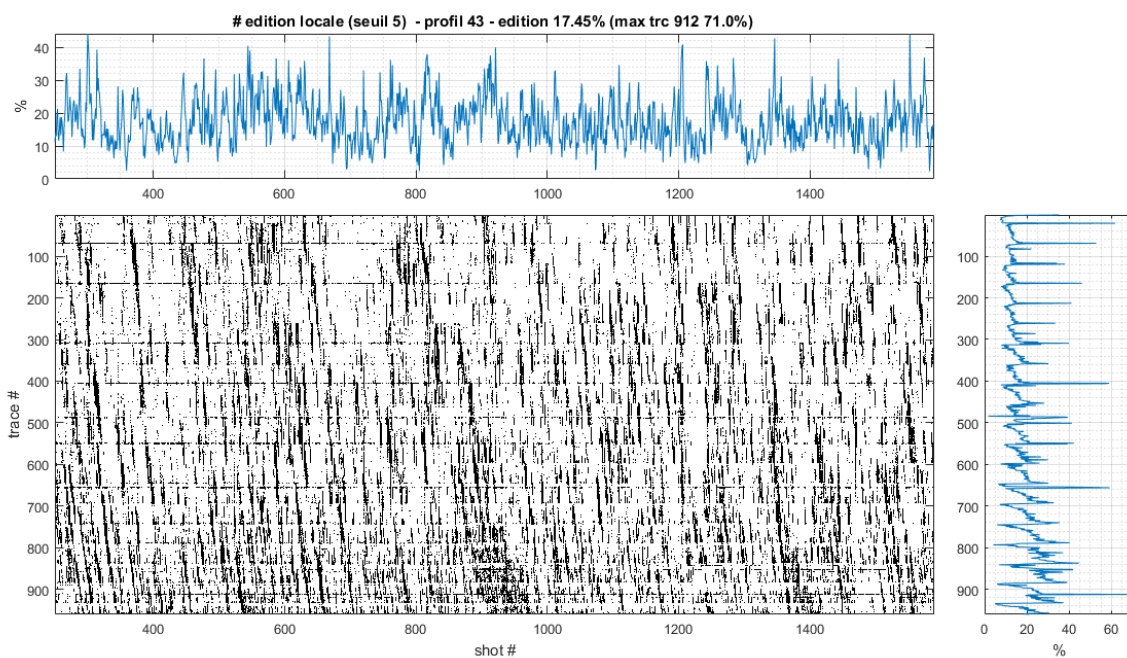


Figure 59. Résultat d'édition sur une portion des tirs du profil 43 à l'aide du seuil de distorsion fixé à 5. En noir, les traces éditées. Graphe du haut : pourcentage moyen par tir ; graphe de droite : pourcentage moyen par trace. Sur l'ensemble du profil, 17.5% des traces sont éditées. Les traces au niveau des contrôleurs d'immersion apparaissent les plus bruitées (jusqu'à 71 % des tirs édités pour la trace 912 de ce profil).

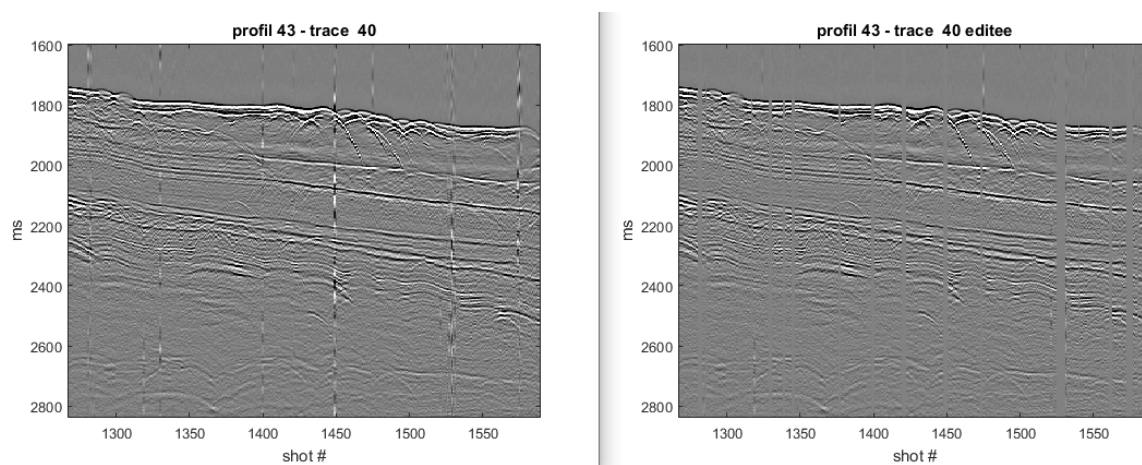


Figure 60. Illustration de l'édition des traces par la méthode de critère de seuil sur l'attribut distorsion ; profil 43, trace 40 ; figure de gauche sans édition ; figure de droite après édition ; les traces éditées sont mises à zéro.

Le gain en imagerie avec édition des traces bruitées est surtout notable en profondeur sur les réflecteurs de relative faible amplitude. Plus en surface, le taux de couverture élevé atténue largement le bruit sur les réflecteurs de plus forte amplitude.

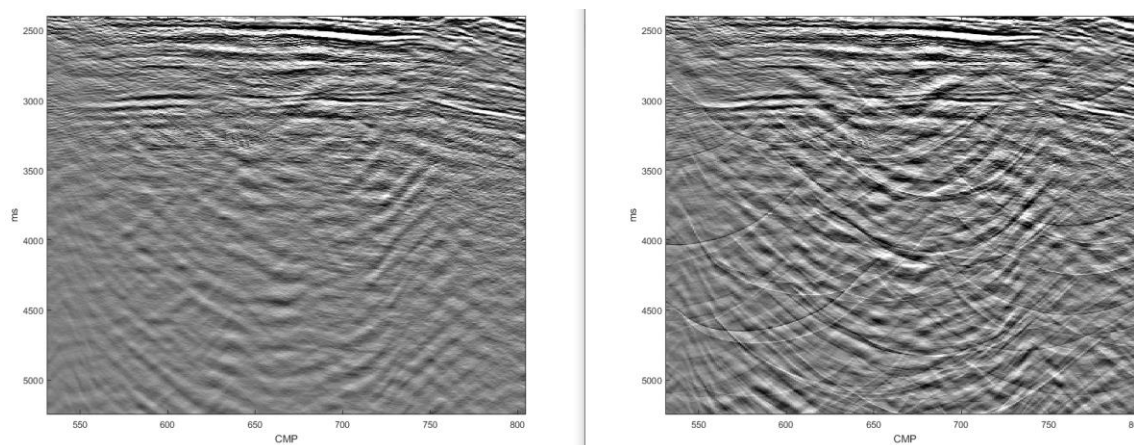


Figure 61. Illustration du gain obtenu en imagerie avec édition des traces bruitées : exemple du profil SIS1 n°43 ; sommation des 960 traces (binning à 25 m, mute anti-stretch fixé à 150 %) et migration à l'aide du modèle de vitesse RMS pointé. Figure de droite : sans édition ; figure de gauche : avec édition des traces bruitées. Après migration, le bruit apparaît sous la forme d'hyperboles qui masquent les réflecteurs profonds de faible amplitude.

4.7. Analyse du signal sismique SIS1

Les conditions de mer étaient relativement bonnes, bien que légèrement dégradées par rapport à celles rencontrées lors de l'acquisition de la sismique HR. Cela a permis de maintenir l'immersion de la flûte à 5 m et ainsi d'obtenir une signature sismique optimale et un contenu fréquentiel homogène.

Le profil 44, l'un des plus bruités par l'état de mer, présente localement (sur 10-20 traces) des variations d'immersion comprises entre 3 et 6.25 m pour les traces les plus éloignées des contrôleurs d'immersion. Les traces proches d'un avion ont une immersion plus constante et proche de 5 m. Le profil 45, le moins bruité, présente une très grande stabilité de la fréquence de coupure associée à l'interférence avec le réfléchi surface autour de 150 Hz soit une immersion constante à 5 m.

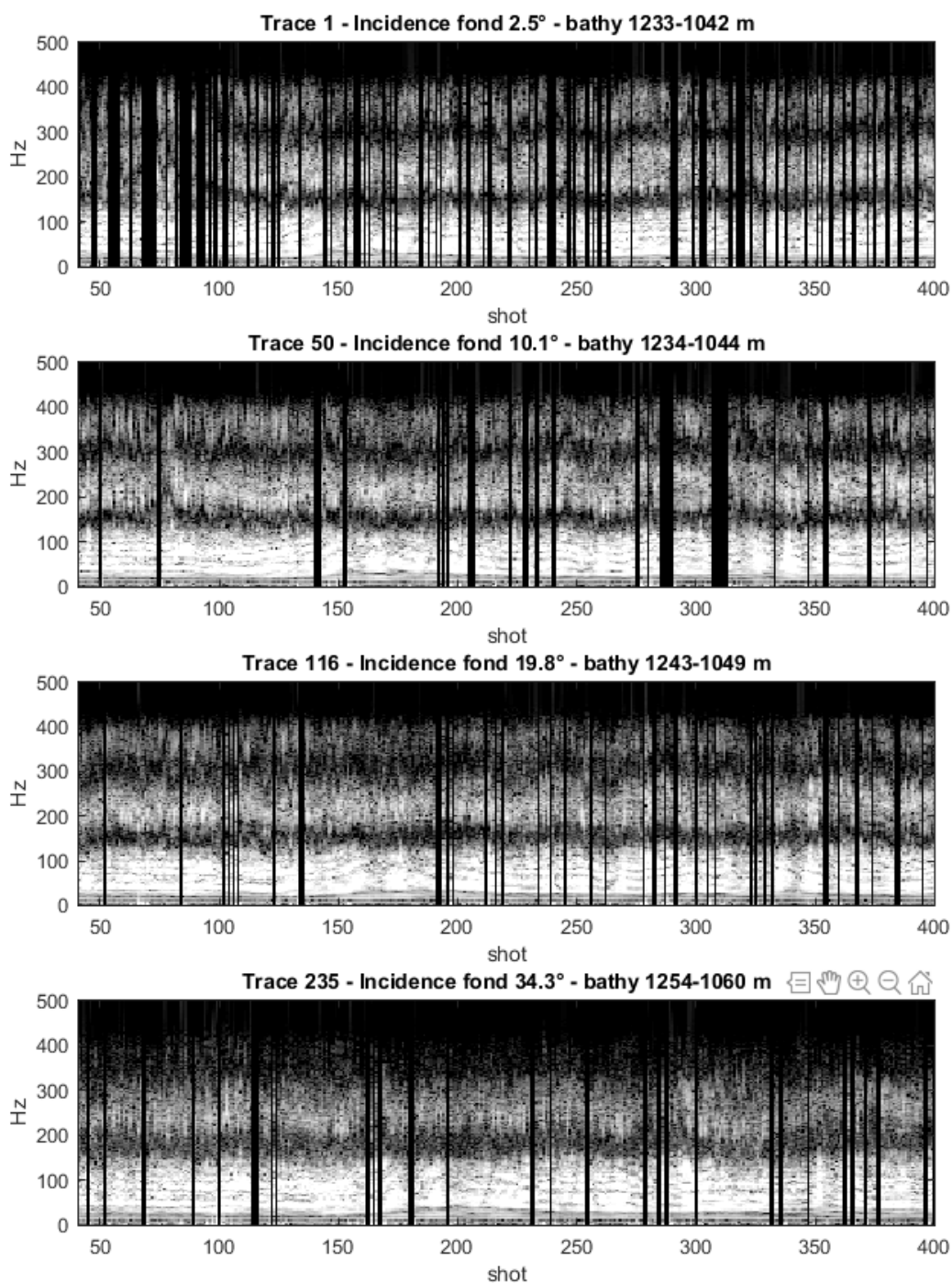


Figure 62. Profil 44 Tirs 41-400 – Analyse spectrale à partir du fond de l'eau sur une fenêtre de 250 ms pour les traces 1, 50, 116 et 235 montrant en noir la fréquence de coupure associée à l'interférence avec le réfléchi surface, représentative des variations d'immersion des traces pour les tirs considérés. La fréquence de coupure est globalement située autour de 150 Hz ; valeur attendue pour une immersion de 5 m, avec des variations très locales (10-20 tirs) comprises entre 120 et 250 Hz soit une gamme d'immersion de 3 à 6.25 m. Angle d'incidence maximum sur le fond de l'eau fonction de la trace considérée : de 2.5 à 34°. Trace 1 située 5 m derrière le 1^{er} avion, Trace 50 située entre les avions 2 et 3, Trace 116 située au niveau de l'avion 4, Trace 235 située entre les avions 6 et 7. Spectres calculés sur une portion du profil à fond plat.

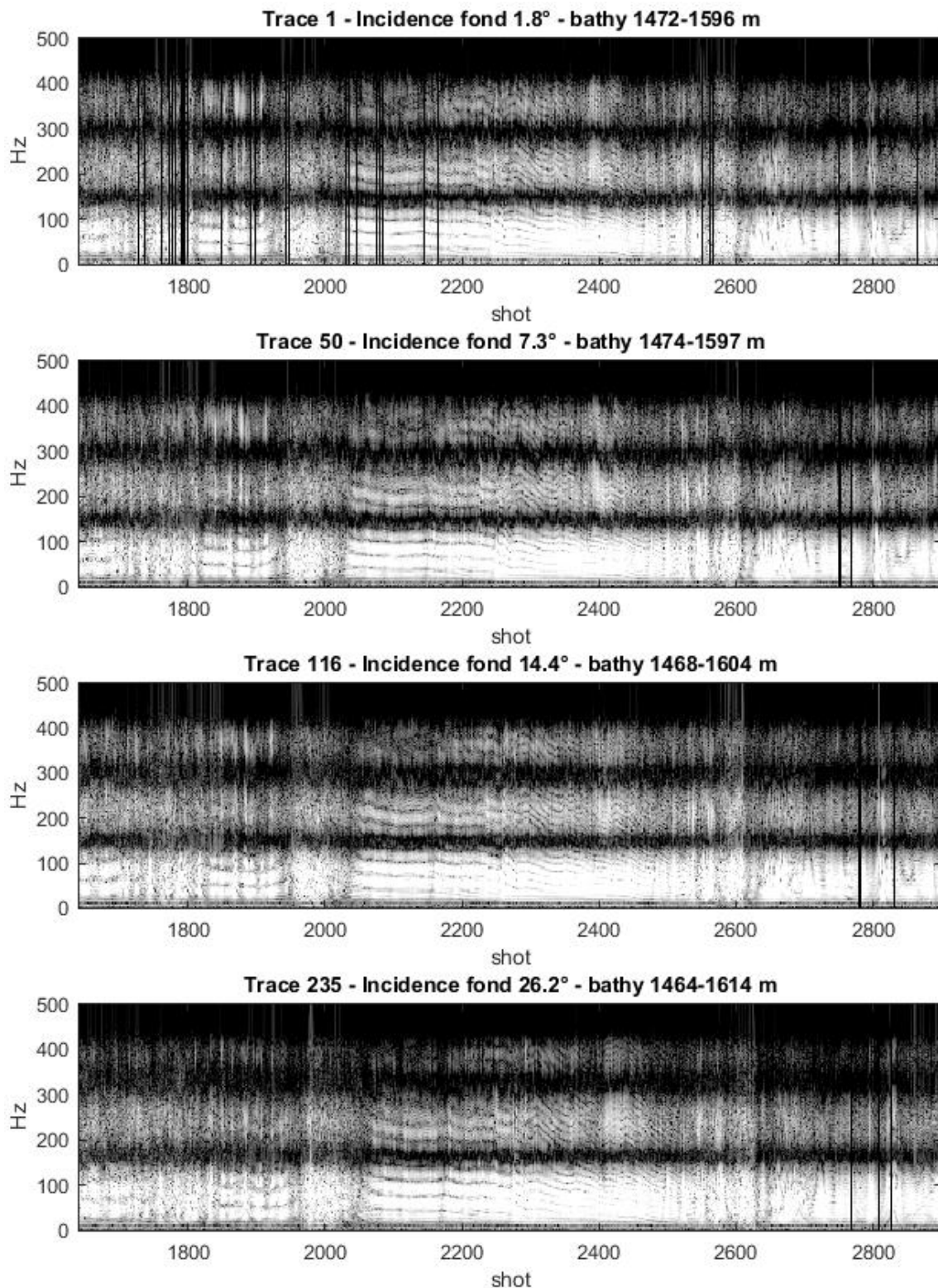


Figure 63. Profil 45 Tirs 1640-2901 – Analyse spectrale à partir du fond de l’eau sur une fenêtre de 250 ms pour les traces 1, 50, 116 et 235 montrant en noir la fréquence de coupure associée à l’interférence avec le réfléchi surface, représentative des variations d’immersion des traces pour les tirs considérés. La fréquence de coupure est très stable autour de 150 Hz ; valeur attendue pour une immersion de 50 m. Angle d’incidence maximum sur le fond de l’eau fonction de la trace considérée : de 2 à 26°. Trace 1 située 5 m derrière le 1^{er} avion, Trace 50 située entre les avions 2 et 3, Trace 116 située au niveau de l’avion 4, Trace 235 située entre les avions 6 et 7. Spectres calculés sur une portion du profil à fond plat.

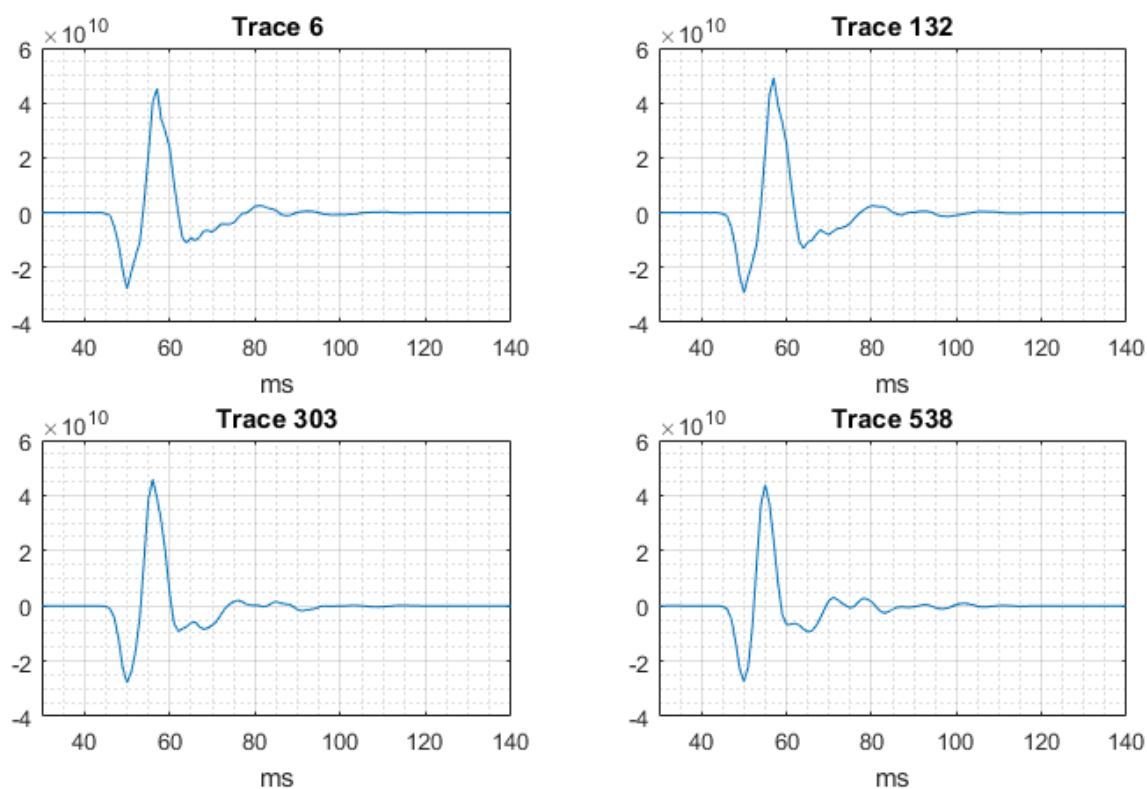


Figure 64. Signatures sismiques estimées à partir de la réflexion fond de l'eau – Profil SIS1 n°46 – Moyenne calculée par trace (6, 132, 303, 538) sur 280 tirs pour lesquels le fond de l'eau est plat, correspondant à des angles d'incidence de 2°, 15°, 30° et 45°. Filtre passe-bande appliqué : 5-300 Hz, correction de divergence sphérique appliquée.

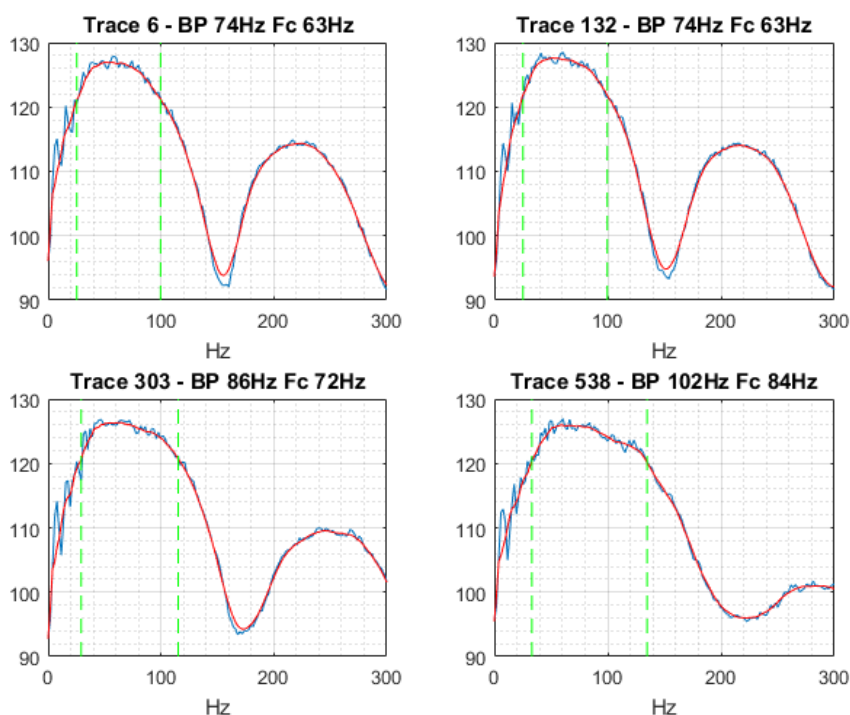


Figure 65. Profil SIS1 n°46 – Analyse spectrale à partir du fond de l’eau sur une fenêtre de 500 ms. Moyenne calculée par trace (6, 132, 303, 538) sur 280 tirs (190-470) pour lesquels le fond de l’eau est plat (≈ 1720 m de bathymétrie), correspondant à des angles d’incidence de 2°, 15°, 30° et 45°. Filtre passe-bande appliqué : 5-300 Hz, correction de divergence sphérique appliquée.

Les traces ont un contenu fréquentiel homogène. La bande passante à -6dB s’étend de 25 à 100 Hz avec une fréquence centrale de l’ordre de 75 Hz. Le contenu fréquentiel est plus haute fréquence pour les plus grandes incidences du fait d’un délai *ghost* réduit.

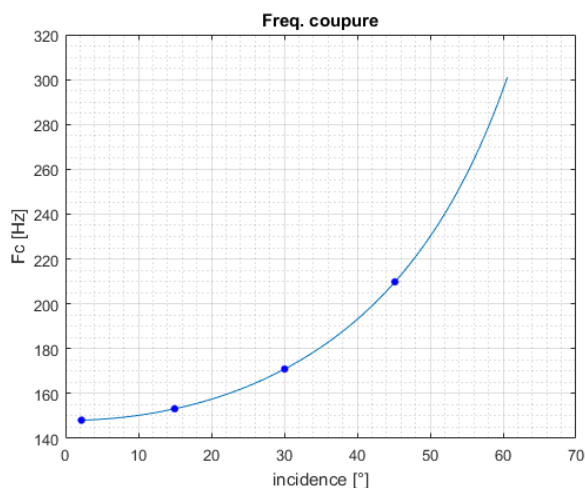


Figure 66. Modélisation de la fréquence de coupure due à l’interférence avec le réfléchi surface du récepteur (*ghost*) pour une bathymétrie de 1720 m, une immersion streamer de 5 m, et des offsets variant de 100 à 6094 m (960 traces @ 6.25 m), correspondant aux paramètres de la figure précédente. Les points bleus correspondent aux traces (6, 132, 303, 538)

4.8. Analyse de vitesse RMS et sommation – sismique SIS1

Cette première phase d'analyse de vitesse est exhaustive : analyse de l'ensemble des profils avec un pointé de vitesse non horizon consistant à pas de 500 mètres (20 bins @ 25 m). Elle a pour but de fournir un premier jeu de données « basse fréquence » traitées et un premier modèle de vitesse qui pourra être utile aux phases d'imagerie suivantes. Elle doit également améliorer la profondeur de pénétration, objectif principal de ces données.

- **Calcul des panneaux de semblance**

Les panneaux de semblance servant au pointé de vitesse RMS sont calculés à partir de *supergathers* (2 bins de part et d'autre du bin d'analyse) tous les 20 bins (500 mètres) avec un pas de 2.5 m/s pour une gamme de vitesse RMS variable :

- de 1350 m/s à 2600 m/s pour les profils 46 et 47 ;
- de 1400 à 2300 m/s pour les profils 45 et 49 ;
- de 1450 à 2300 m/s pour les autres.

Le mute anti-stretch est fixé à 150 % (1.5 fois la période). Le filtre passe-bande appliqué est 10-170 Hz ; un gain de type AGC est appliqué sur une fenêtre de 50 ms.

De même que pour les données de sismique HR, plusieurs matrices de semblance sont calculées pour chaque *supergather* en considérant des longueurs réduites du streamer. Cela permet de prendre compte la dérive parfois importante du streamer et les fortes variations latérales de la morphologie des structures géologiques.

- **Pointé de vitesse**

Le pointé, non horizon consistant, est réalisé sur les panneaux de semblance à l'aide de l'interface Matlab *vel_analysis*. La section traitée à vitesse constante est utilisée comme guide. Les semblances ont été calculées à pas de 500 mètres, correspondant au pas d'analyse des vitesses.

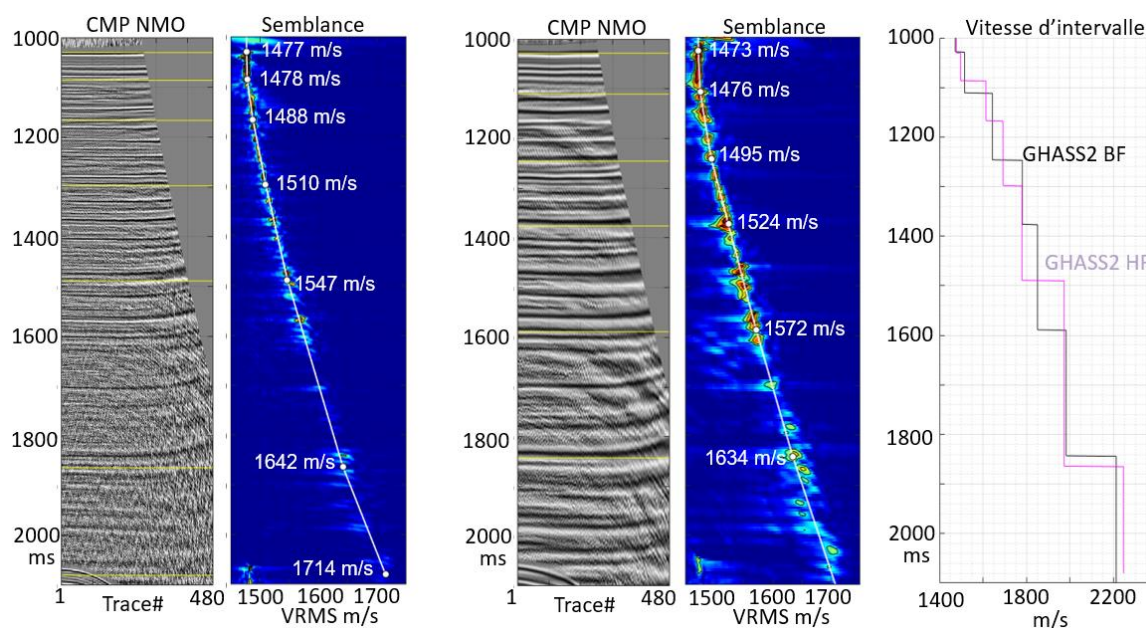


Figure 67. Exemple de pointé de vitesse RMS sur les données de sismique SIS1 BF et HR. Comparaison entre les données HR de la campagne GHASS2 (streamer de 3000 m, fréquence centrale de 150 Hz) et les données SIS1 BF GHASS2 (streamer de 6000 m, fréquence centrale de 55 Hz) sur le même point géographique (zone de la crête). Figure de gauche : collection CMP et panneau de semblance extraits du profil HR n°23 ; figure centrale : collection CMP (zoom sur les 480 premières traces) et panneau de semblance extraits du BF n°50 ; figure de droite : comparaison des vitesse d'intervalle issues des deux lois Vrms pointées sur les semblances.

- **Sommation**

Le programme de sommation utilise le *binning* à 25 m calculé précédemment. Le modèle de vitesse RMS est celui pointé à pas de 500 mètres. Il est interpolé linéairement entre deux points d'analyse.

Les données sismiques sont lues dans les fichiers SEGY collections point de tir. Un filtre passe-bande 5-170 Hz est appliqué. Le résultat de l'édition des traces bruitées est également appliqué. Un mute anti-stretch fixé à 150% est appliqué aux données lors de la correction NMO avant sommation.

Le mute anti-stretch de 150% est plus conservateur que celui appliqué sur les données HR (116 %). Le signal des données SIS1 étant basse fréquence, la correction NMO affecte moins le contenu fréquentiel des traces aux grands offsets ; le contenu fréquentiel reste homogène après correction NMO jusqu'à 45° d'angle d'incidence (limite atteinte pour un mute de 150%). Cela permet de conserver un ordre de couverture élevé qui doit aider à améliorer le rapport signal à bruit.

La couverture après mute anti-stretch est estimée sur le fond de l'eau ; pour cela, le temps d'arrivée du fond de l'eau a été pointé au préalable sur les sections imagées à vitesse constante. La couverture sur le fond de l'eau après mute est par exemple de l'ordre de 280 pour le profil 50 sur la zone d'intérêt centrale.

- **Migration**

La section sommée est importée sur la station de traitement Promax afin de réaliser la migration post-stack temps utilisant le modèle de vitesse pointé (migration de type Kirchhoff).

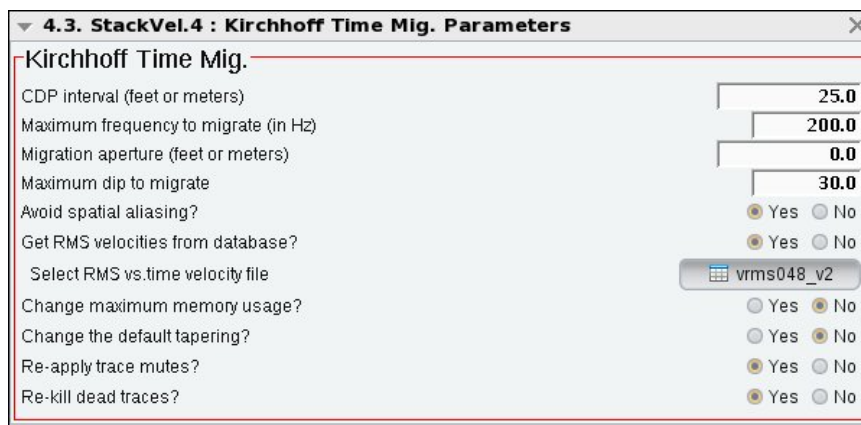


Figure 68. Paramètres de migration (Promax) appliqués sur les sections sommées de sismique BF

4.9. Traitement anti-multiple – sismique SIS1

L'objectif principal des acquisitions basses fréquences de la sismique SIS1 est l'imagerie des réflecteurs et structures profondes. Cela nécessite un traitement visant à atténuer les multiples réfléchis sur la surface de l'eau. La méthode employée (Surface Related Multiple Elimination) n'utilise que les données sismiques acquises pour estimer les multiples et les soustraire. Elle est néanmoins coûteuse en temps calcul et dans la pratique impossible à mettre en œuvre sur le volume de données SIS1 (960 traces échantillonnées à 1 ms) avec les moyens de calculs disponibles (station de travail Promax). Les données SIS1 sont donc au préalable ré-échantillonnées en temps et en espace (trace).

- **Ré-échantillonnage**

Le contenu fréquentiel relativement basse fréquence de la source opérée avec la sismique SIS1 permet de ré-échantillonner les données BF sans les dégrader :

- ré-échantillonnage en temps : 1 ms \rightarrow 2 ms ;
- sommation des traces deux à deux : inter-trace 6.25 m \rightarrow 12.5 m, 960 traces \rightarrow 480 traces ;

Le gain en volume est donc un facteur 4. Le gain en temps calcul pour la séquence SRME sur Promax est très largement supérieur. On passe de plus de 30 heures de calcul pour traiter 500 tirs (pour tester les paramètres) à moins de 3 heures. Cela est probablement dû à une limitation de gestion de la mémoire pour de gros volumes de données : allocation mémoire trop importante et swap mémoire en décollant.

Le positionnement (source, récepteur) traité initialement est toujours utilisé ; le centre des traces sommées est le barycentre des deux traces sommées ; les offsets sont également mis à jour. Les centres de bins restent inchangés mais le binning doit être recalculé afin de trier correctement les nouvelles traces. La taille des bins reste inchangée égale à 25 mètres.

Ce ré-échantillonnage permet de n'exporter plus qu'un seul fichier SEG Y par profil (pas de découpage en plusieurs fichiers de 10 Go), ce qui facilite l'importation des données ré-échantillonnées collections points de tir sur Promax.

Le flag des traces éditées (anomalie de bruit) est également mis à jour : lorsqu'une des deux traces à sommer est flaguée, la trace sommée est flaguée. Ce choix conservateur n'augmente pas de façon notable le pourcentage de traces flaguées.

Un mute de la colonne d'eau est également appliqué. Il a pour but de supprimer l'arrivée directe qui peut poser problème lors de l'estimation du modèle de multiple dans la séquence SRME. Le temps d'arrivée du fond de l'eau sur chaque trace est estimé à l'aide d'un pointé du fond réalisé sur une première section sommée et du positionnement (Source, Récepteur, Bin).

La séquence de traitement du signal est appliquée par point de tir : lecture des 960 traces, filtre passe-bas à 5 Hz (indispensable avant sommation 2 à 2), décimation en temps des 960 traces, sommation des traces deux à deux et mute au-dessus du fond de l'eau.

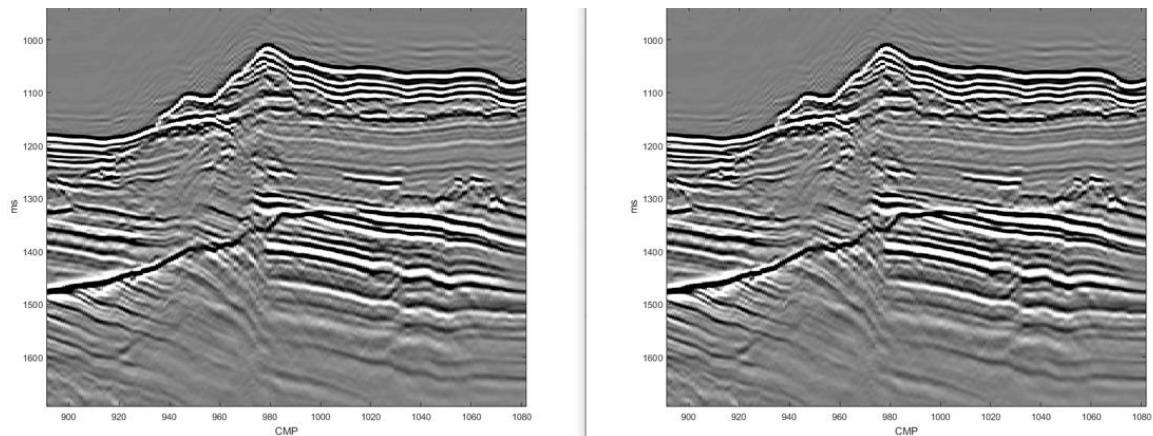


Figure 69. Test d'imagerie sismique SIS1 avec ré-échantillonnage des traces (figure de droite, 480 traces @12.5m et 2ms) et sans (figure de gauche, 960 traces @6.25 m et 1 ms). Portion du profil SIS1 n°50 ; séquence d'imagerie identique : binning à 25 m, sommation avec un modèle de vitesse RMS identique et mute anti-stretch de 150%, migration temps post-stack. Le ré-échantillonnage des traces n'affecte pas le résultat de l'imagerie.

- **Séquence de traitement anti-multiple**

La méthode SRME (Surface-Related Multiple Elimination, Verschuur *et al.*, 1992) permet d'estimer le modèle des multiples de la surface de l'eau à l'aide de la seule redondance des données multi-traces. Ce modèle de multiples est estimé par auto-convolution des données, puis il est soustrait aux données après une étape d'adaptation des amplitudes des multiples modélisés. La modélisation nécessite des données échantillonnées spatialement de façon régulière. Nous utilisons pour cela une séquence de traitement mise en œuvre sur Promax.

Etapes du traitement SRME 2D sur le logiciel Promax (voir les détails en annexe) :

- Import des données collections points de tir ré-échantillonnées ;
- Régularisation spatiale des données : ré-échantillonnage à un pas d'offset régulier et extrapolation jusqu'à l'offset nul ; cette étape nécessite un modèle de vitesse RMS ;
- Estimation du modèle de multiples (SRME Macro)
- Calcul du modèle de multiples pour la géométrie originale des traces (Un-Regularization) en utilisant le même modèle de vitesse RMS ;
- Match Filter : ajustement du modèle de multiples aux amplitudes des données en estimant un filtre unique pour l'ensemble des données ;
- Adaptative Substraction : ajustement du modèle de multiple trace par trace avant soustraction ;

L'ensemble de ces modules nécessite de tester de nombreux paramètres dont certains affecteront directement la capacité à atténuer les multiples et à préserver les réflexions primaires sous les multiples (voir détails en annexe). La documentation Promax n'est pas toujours très explicite sur la nature exacte de certains paramètres. Ces tests étant coûteux en temps calcul, ils ont tout d'abord été réalisés sur quelques centaines de tirs. La validité de ces tests est donc également limitée (bathymétrie variable, zones présentant des arrivées d'échos latéraux, natures et réflexions sur le fond et les couches très variables...). La première partie de la séquence

(estimation du modèle de multiple) est la plus coûteuse en temps calcul : de l'ordre de 3 jours de calcul par profil, comparé à l'étape de soustraction adaptée qui se réalise en une heure environ.

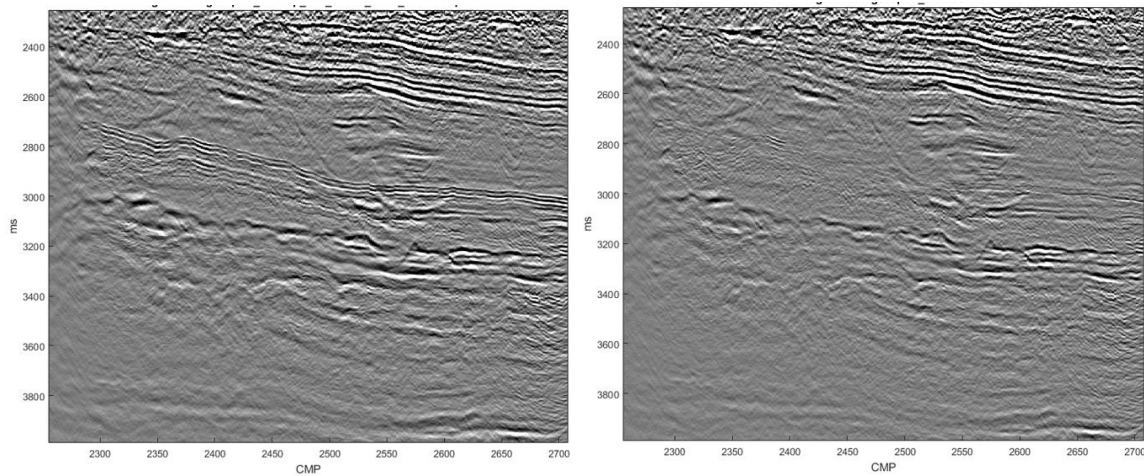


Figure 70. Exemple de test anti-multiple avec la méthode SRME sur une portion du profil SIS1 n°50. Sections sommées et migrées après analyse de vitesse RMS ; bin de 25 m ; les données ont été ré-échantillonnées au préalable. Figure de gauche : sans traitement SRME ; figure de droite : après soustraction du modèle de multiple.

Référence : Verschuur, D. J; Berkhout, A. J; Wapenaar, C. P. A (1992). "Adaptive surface related multiple elimination". Geophysics 57 (9): 1166-1177. doi:10.1190/1.1443330

- **Résultats**

Le traitement anti-multiple étant réalisé sur le logiciel Promax, la finalisation de l'imagerie est réalisée également sur Promax, notamment la sommation (toutes les autres sommations ont été réalisées à l'aide de codes Matlab). Les modèles de vitesse pointés précédemment sur les données BF non ré-échantillonnées sont toujours valides : positions et numérotation des bins identiques avant et après ré-échantillonnage. A noter que pour conserver un mute anti-stretch à 150% lors de la correction NMO, le paramètre Promax à renseigner est 150% et non 50% (contrairement au code Matlab : `mute=50` ; ➔ `smute=1+mute/100 = 1.5` qui correspond bien à 150%).

Sur les zones relativement planes (en-dehors des canyons), les multiples sont bien atténués et les réflecteurs sous-jacents, lorsqu'ils existent, ressortent bien mieux. Sur les zones à forte pente (typiquement la zone de la crête), le multiple n'est pas atténué. Sur les zones où le gaz est très présent, l'atténuation du multiple permet difficilement de faire ressortir la continuité des réflecteurs sous-jacents qui sont de faible amplitude. Il est difficile de prolonger les failles et autres structures en profondeur même après l'application de l'anti-multiple du fait de la forte atténuation (amplitudes faibles et signal résiduel basse-fréquence).

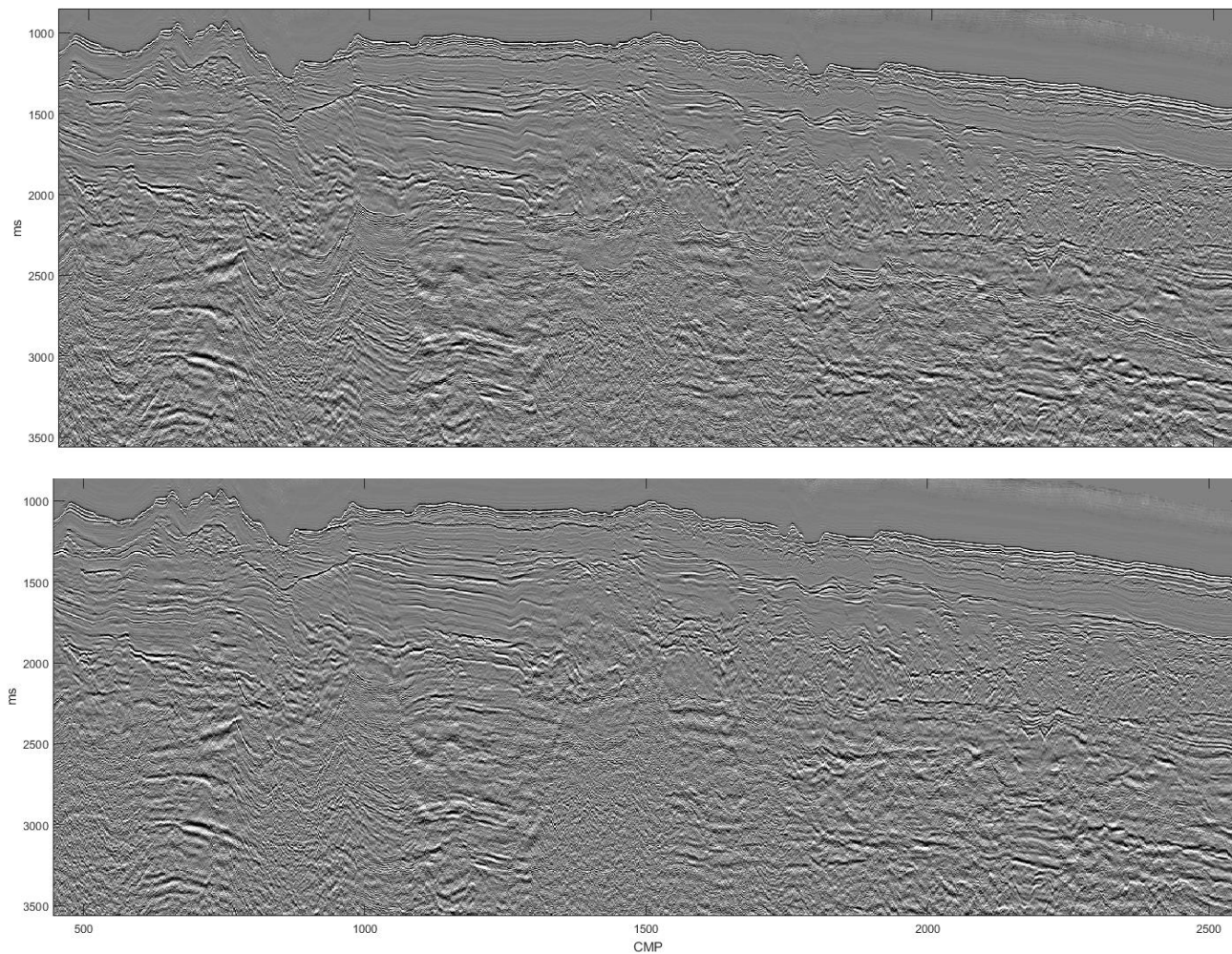


Figure 71. Comparaison des sections traitées sur le profil050 (vue partielle) avec traitement anti-multiple SRME (figure du bas) et sans (figure du haut). Séquence d'imagerie identique : données ré-échantillonnées (2ms, 480 traces @12.5 m), modèle de vitesse RMS identique, NMO (anti-stretch 150%), migration de Kirchhoff en temps.

5. Résultats et perspectives

5.1. Imagerie Haute Résolution

- **Rappel des paramètres de traitement HR**

Echantillonnage en temps 0.5 ms, 480 traces @6.25 m (traces originales) ;

Binning à pas de 6.25 m ;

Modèles de vitesse – pointé de vitesse RMS non horizon consistant :

Pas d'analyse rapide : Δ CMP 160 (1000 m) ; localement plus resserré ;

Pas d'analyse fin : Δ CMP 40 (250 m) ;

Sommation des 480 traces avec un mute anti-stretch fixé à 116% (code Matlab) ;

Migration de Kirchhoff (code Promax)

| Profil | Nb bins | Pas d'analyse | Commentaires |
|--------|---------|---------------|---|
| 22 | 7754 | fin | |
| 23 | 7290 | fin | |
| 24a | 5031 | rapide | parallèle à la pente ; Δ CMP moyen du pointé : 102 |
| 24b | 3964 | rapide | parallèle à la pente |
| 25 | 1885 | rapide | profil plateau court |
| 26 | 8165 | rapide | profil plateau |
| 27 | 11650 | rapide | long profil transverse à l'Ouest ; Δ CMP moyen du pointé : 110 |
| 28 | 11757 | rapide | long profil transverse à l'Ouest ; Δ CMP moyen du pointé : 121 |
| 29 | 3844 | rapide | profil court sur plateau et pente ; Δ CMP moyen du pointé : 95 |
| 30 | 4445 | fin | |
| 31 | 4750 | fin | |
| 32 | 5241 | fin | passé par la loupe d'arrachement et zone double BSR |
| 33 | 2642 | Fin partiel | profil plateau court ; Δ CMP moyen du pointé : 58 |
| 34 | 9778 | Fin partiel | pointé détaillé : bins 200-5080 |
| 35 | 2165 | rapide | profil bassin court |
| 36 | 15475 | Fin partiel | pointé détaillé : bins 5840-11440 |
| 37 | 11390 | rapide | grand profil transverse Est zone ; Δ CMP moyen du pointé : 107 |
| 38 | 7710 | fin | profil bassin |
| 39 | 10499 | rapide | profil bassin |
| 40 | 9918 | Fin partiel | pointé détaillé : bins 2040-7160 |
| 41 | 10828 | fin | |
| 42 | 6682 | rapide | profil transverse, Ouest zone, volcan de boue |

Tableau 4. Liste des profils HR traités et information sur le pas d'analyse des vitesses RMS

- **Traitement HR - Perspectives**

- Importer les sections migrées et les modèles de vitesse d'intervalle sur le projet GHASS Kingdom ; identifier sur les sections migrées les zones d'intérêt : BSR, double BSR, volcan de boue, zones à gaz, zones planes sans gaz (« référence ») ; étudier l'intérêt et la possibilité de raffiner les analyses de vitesse sur ces zones d'intérêt ;
- Sur les profils analysés finement : lissage du modèle de vitesse pour réaliser une imagerie post-stack profondeur (cf. codes développés pour GHASS et jobs Promax) ;
- Tester les corrections NMO d'ordres supérieurs à deux pour améliorer la focalisation des réflexions aux grands offsets ; développer une nouvelle méthode de calcul de panneaux de semblance et de pointé de vitesse avec correction des grands offsets (commencer par des tests sur synthétiques) ;

Note – les traitements anti-multiples (SRME) sont non pertinents pour la sismique HR :

- temps de traitement irréaliste avec les moyens de calcul actuels (station Promax) ;
- pénétration sous le multiple quasi inexistante ;
- pas l'objet de la sismique HR en terme de cible (plutôt celui de la sismique BF) ;

5.2. Imagerie SIS1 BF

- **Rappel des paramètres de traitement SIS1 BF**

Ré-échantillonnage en temps 2 ms ;

Sommation des traces originales 2 par 2 : 480 traces @12.5 m ;

Binning à pas de 25 m ;

Modèles de vitesse – pointé de vitesse RMS non horizon consistant :

Pas d'analyse: DCMP 20 (500 m) ;

Atténuation des multiples (SRME Promax) ;

Sommation des 480 traces avec un mute anti-stretch fixé à 150% (Promax) ;

Migration de Kirchhoff (code Promax)

| Profil | Nb bins | Commentaires |
|--------|---------|---|
| 43 | 1427 | |
| 44 | 1509 | commun avec le profil HR032 (loupe d'arrachement) |
| 45 | 2883 | |
| 46 | 2623 | |
| 47 | 2201 | |
| 48 | 1717 | passé par le volcan de boue |
| 49 | 2633 | passé par le volcan de boue |
| 50 | 2727 | commun avec le profil HR023 (passé par la crête) |
| 51 | 1995 | |

Tableau 5. Liste des profils SIS1 traités

- **Traitement SIS1 BF - perspectives**

- Importer les sections migrées et les modèles de vitesse d'intervalle sur le projet GHASS Kingdom ; identifier sur les sections migrées les zones d'intérêt : BSR, double BSR, volcan de boue, zones à gaz, zones planes sans gaz (« référence ») ; étudier la possibilité de raffiner les analyses de vitesse sur ces zones d'intérêt ;
- La SRME semble moins efficace sur certaines zones d'intérêt ; approfondir les tests des paramètres des différentes étapes sur Promax ;
- Essayer également de compléter l'anti-multiple SRME avec un mute interne avant sommation ;
- Exporter les collections points de tir après SRME depuis Promax ; calculer de nouveaux panneaux de semblance et mettre à jour si nécessaire et si possible les modèles de vitesse sous le multiple ;
- Comme pour la sismique HR, tester les corrections NMO d'ordres supérieurs pour améliorer la focalisation des réflexions aux grands offsets ; développer une nouvelle méthode de calcul de panneaux de semblance et de pointé de vitesse avec correction des grands offsets ;

5.3. Illustrations et discussions

- **Rappel des principaux objectifs des acquisitions de sismique réflexion de la campagne GHASS2**
 - Sismique HR : détermination précise de la profondeur du BSR et des anomalies de vitesse ;
 - Sismique Basse Fréquence : identification des réservoirs de gaz profonds et des chemins de migration ; imagerie de l'ensemble de la "plomberie" ;

- **Bilan imagerie / caractérisation HR**
 - La séquence de traitement appliquée aboutit à une résolution de très bonne qualité au-dessus du BSR ;
 - La mise en œuvre de longs offsets (3000 m contre 600 m en 2015 lors de la première campagne GHASS) améliore grandement la capacité de caractérisation du système gaz / hydrates de gaz : précision sur les pointés de vitesse RMS et extension en profondeur ; ces analyses montrent notamment que le "réservoir" de gaz sous le BSR est de relative faible épaisseur ;
 - La pleine exploitation des capacités de caractérisation des vitesses avec les grands offsets nécessite encore le développement de méthodes et d'outils adaptés : correction d'obliquité aux grands offsets, détermination des incertitudes sur les vitesses ;
 - La séquence de traitement HR pour les quelques profils acquis sur le plateau serait à adapter (limitation des offsets, traitement anti-multiple) même si souvent la pénétration est fortement limitée par la présence de gaz ;

- **Bilan imagerie / caractérisation SIS1 BF**
 - Les lois de vitesse pointées sur la sismique HR et sur la sismique BF au niveau des quelques profils acquis avec les deux équipements sont cohérentes ;
 - Le niveau d'émission de la source SIS1 plus élevé et son contenu plus basse fréquence que la sismique HR permettent de prolonger l'analyse de vitesse un peu plus en profondeur et de confirmer que la couche à relative forte concentration en gaz sous le BSR est de relative faible épaisseur ;
 - Cette dernière observation doit cependant être pondérée au niveau des zones faillées et très structurées (exemple de la zone de crête) : les pointés de vitesse sont tout aussi délicats qu'avec les données HR. Cela tient en grande partie à la limitation de l'hypothèse 2D ;
 - Le gain en pénétration avec la sismique BF est notable hors des zones à forte concentration en gaz. Cependant, la présence de gaz atténue rapidement le signal et notamment les « hautes » fréquences. Le rapport signal / bruit et la résolution ainsi sont largement dégradés limitant les capacités d'imagerie des structures profondes ;

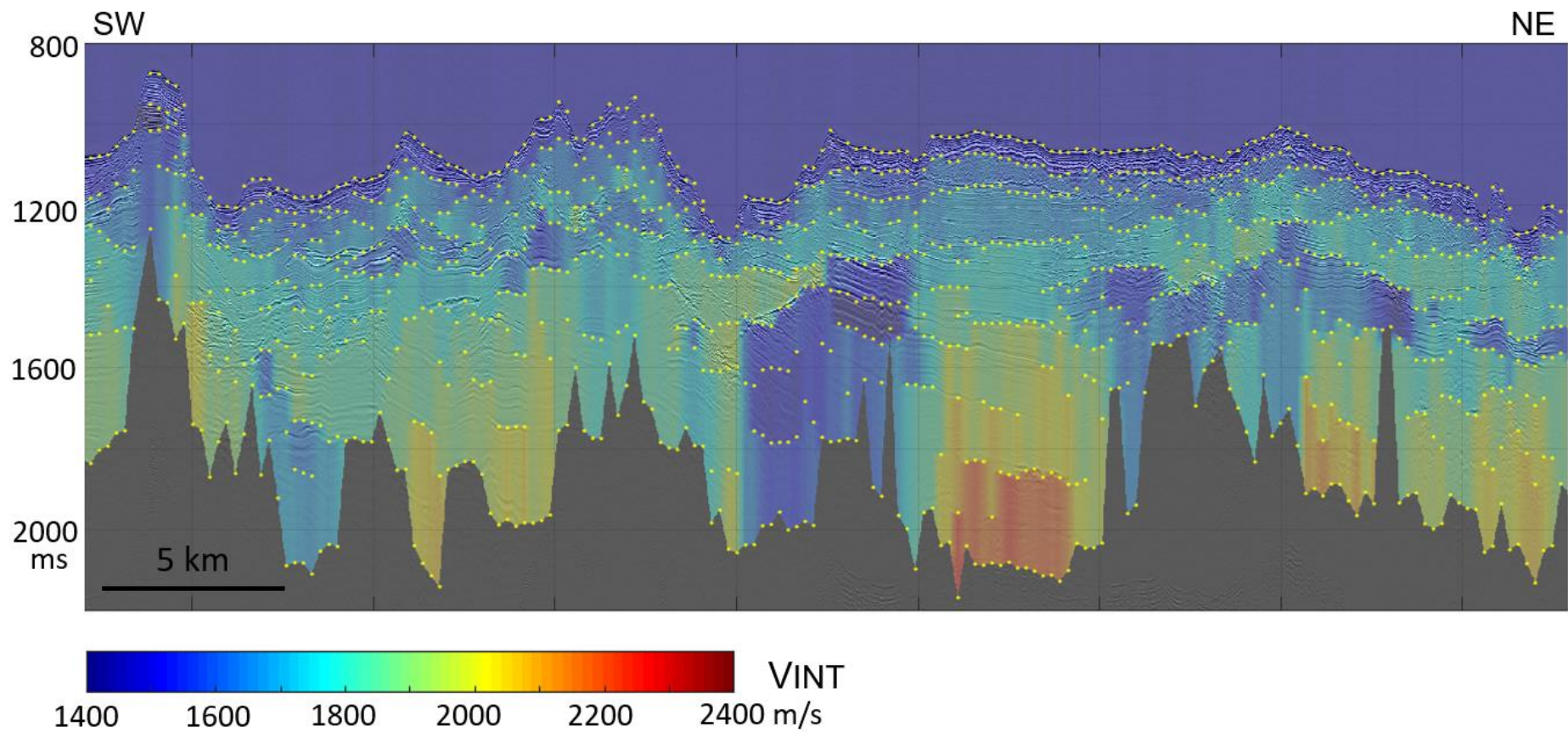


Figure 72. Section sismique HR n°23 (GHASS2), sommation et migration post-stack temps. Surimposition du modèle de vitesse d'intervalle issu de l'analyse VRMS à pas de 250 m

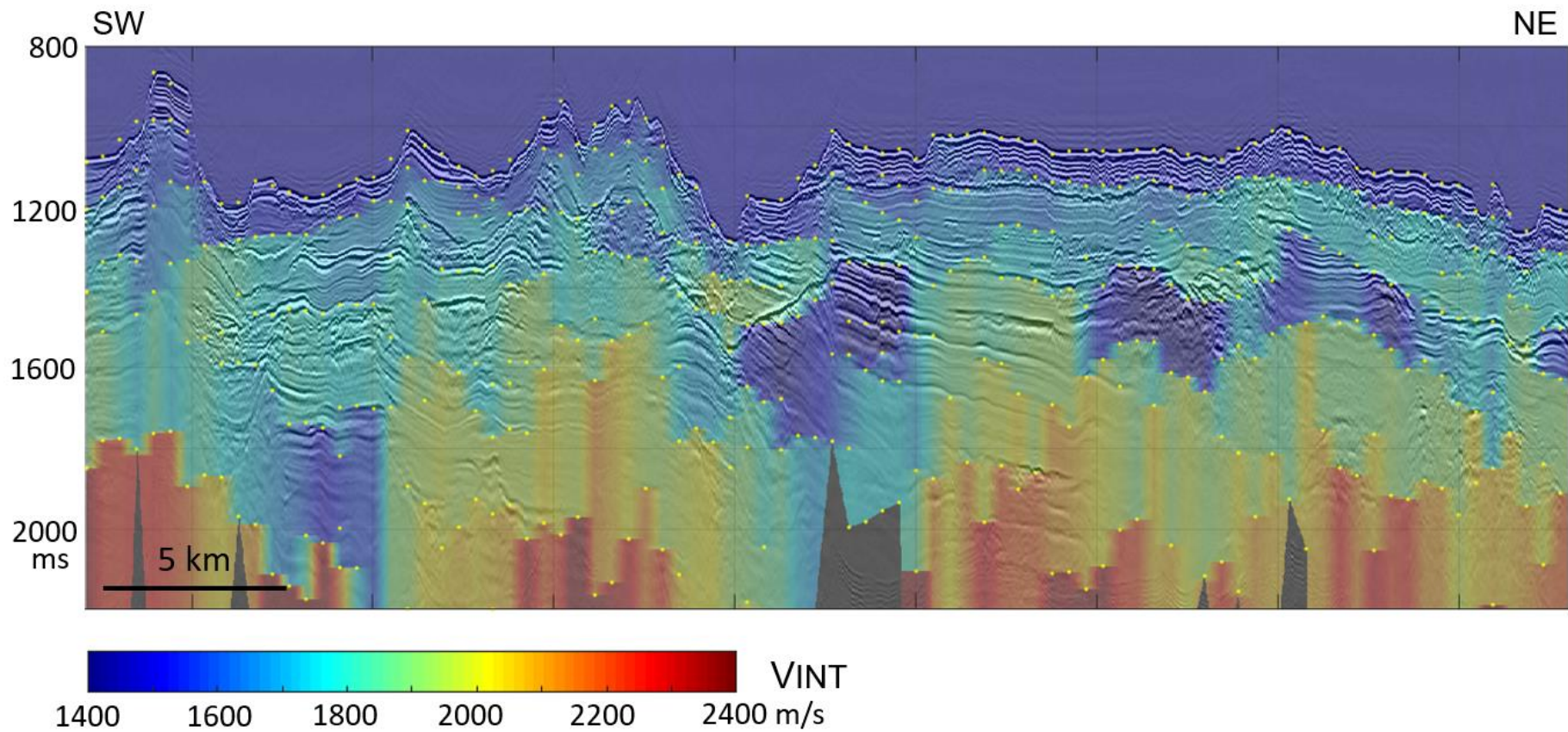


Figure 73. Section sismique SIS1 BF n°50 (GHASS2), sommation et migration post-stack temps. Surimposition du modèle de vitesse d'intervalle issu de l'analyse VRMS à pas de 500 m

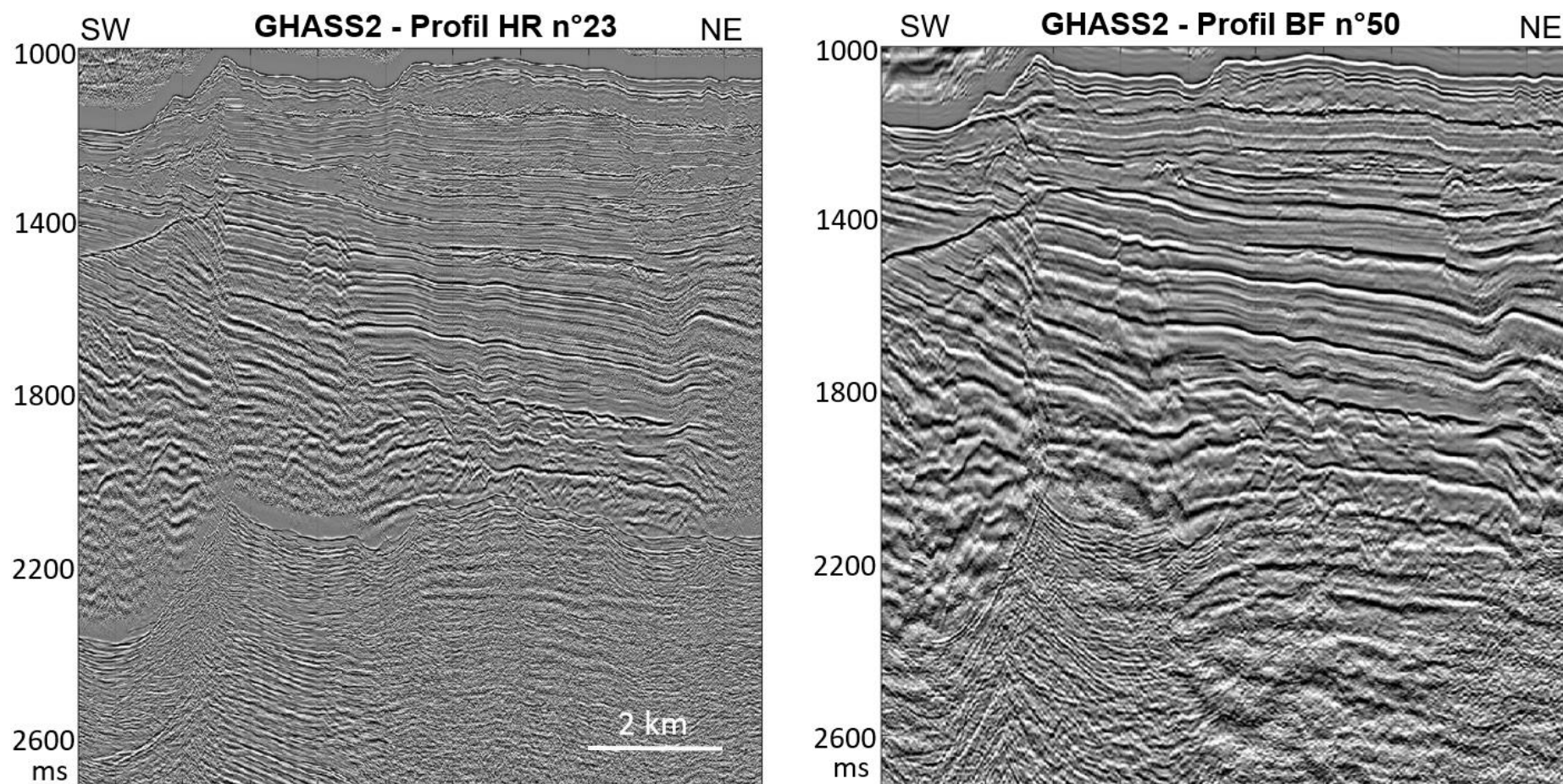


Figure 74. Comparaison des sections traitées HR (profil 23 à gauche) et BF (profil 50 à droite) de la campagne GHASS2 au niveau de la zone de la crête. Traitement anti-multiple (SRME) appliqué à la section BF. Application dans les deux cas d'un gain de type AGC.

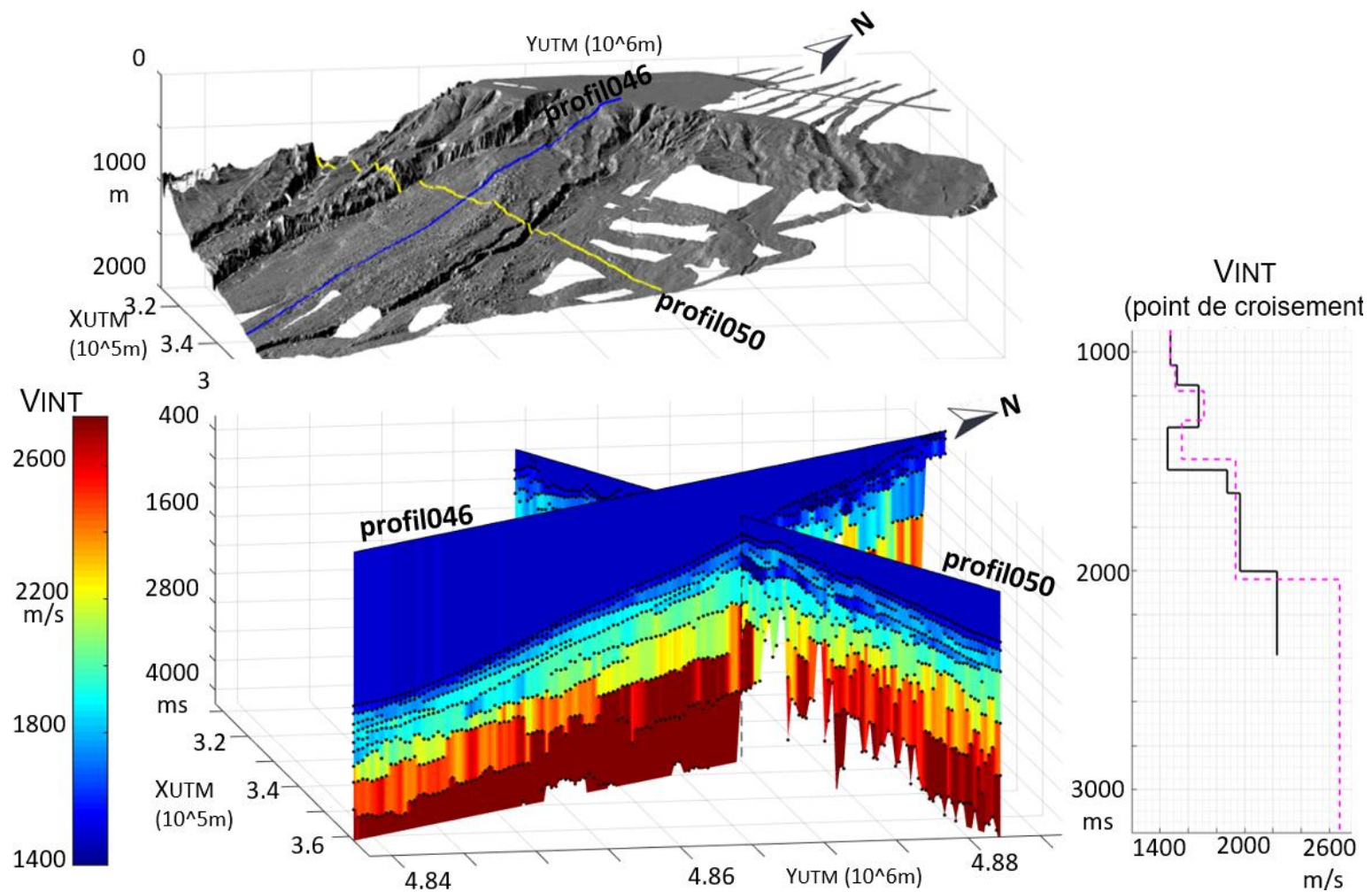
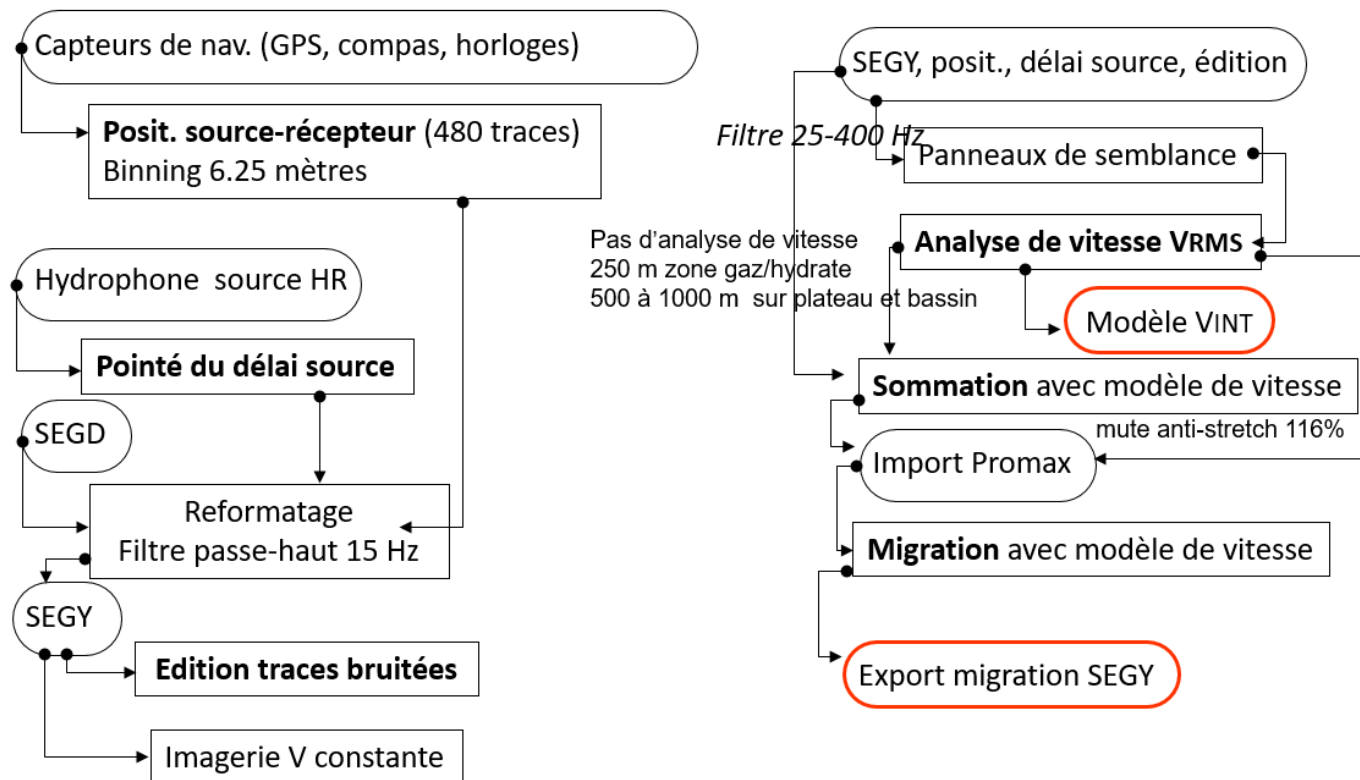


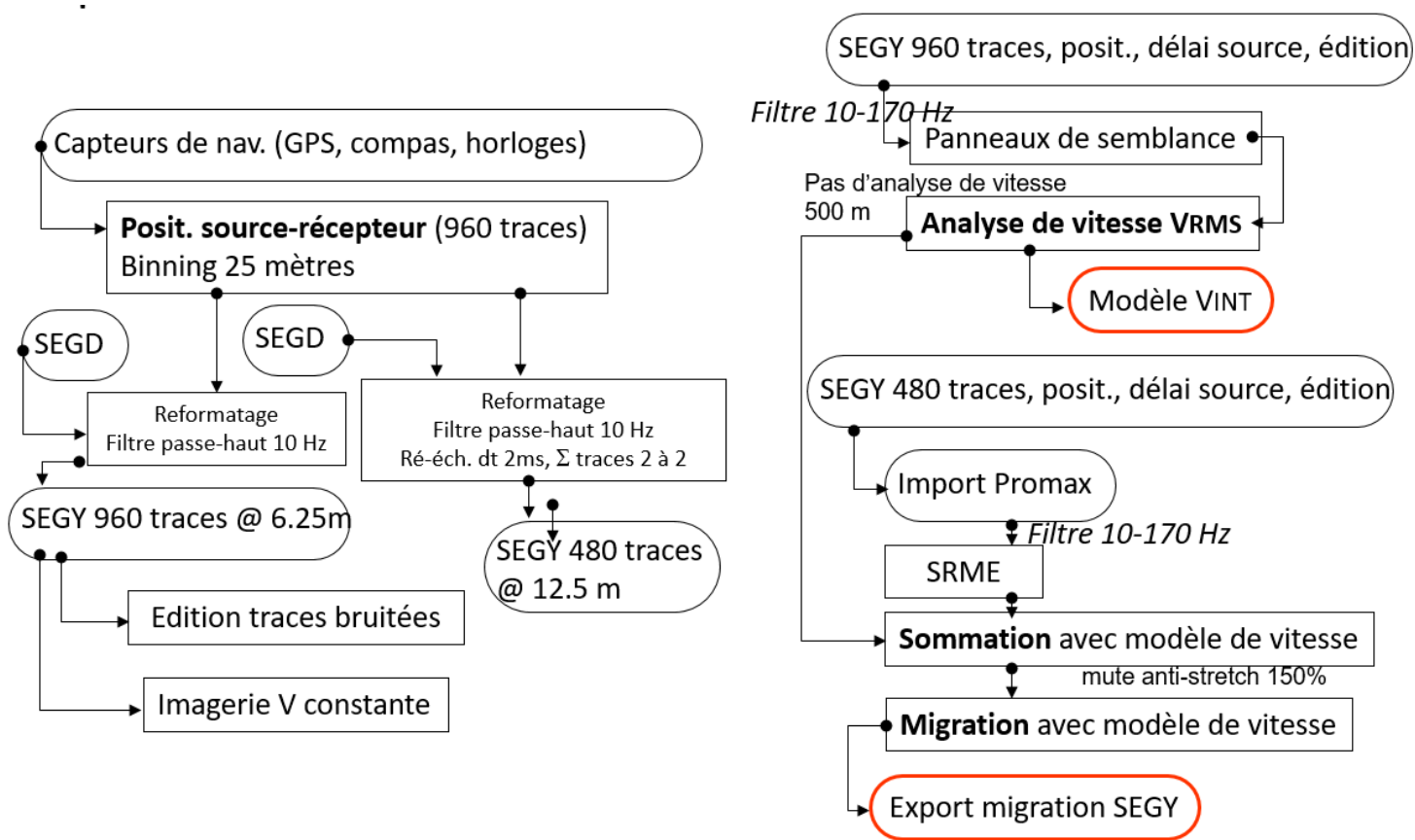
Figure 75. Au centre, modèles de vitesse d'intervalle déterminés pour deux profils BF se recoupant (profils 46 et 50). Figure du haut : localisation des deux profils (bathymétrie GHASS1+GHASS2, traitement GEOOCEAN/ANTIPOD). Figure de droite : logs des vitesses d'intervalle au point de croisement des deux profils.

Annexe 1 – Séquences de traitement

Séquence de traitement HR



Séquence de traitement SIS1 BF

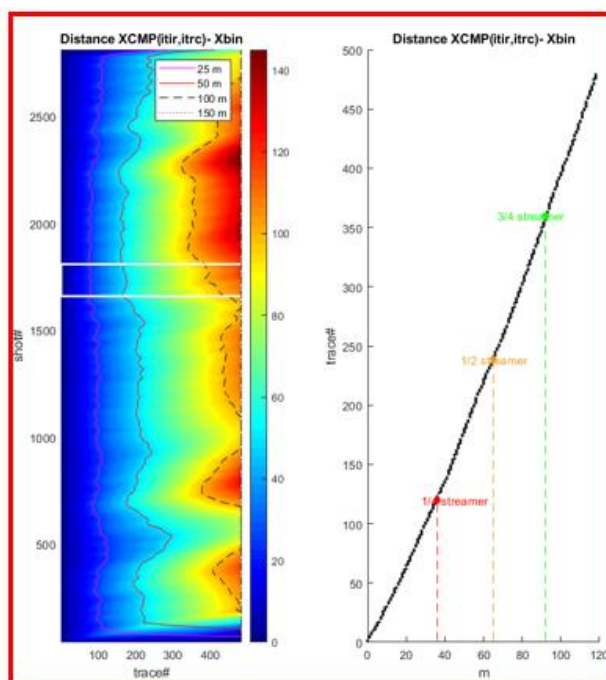


Annexe 2 - Adaptations du logiciel d'analyse de vitesse

Les données ont été acquises dans des conditions variables de profondeur, de dérive et d'environnement (2D/3D). La longueur du dispositif est un avantage pour la précision de la caractérisation en profondeur, mais elle peut également poser problème en cas de dérive et conduire à imager simultanément des structures différentes. Afin d'en tenir compte, l'outil d'analyse de vitesse a évolué de manière à prendre en compte une longueur variable de flûte en fonction de la dérive. De fait les panneaux de semblance sont ainsi calculés, pour chaque CMP analysé, pour 4 longueurs de flûte :

- flûte complète soit 480 traces,
- $\frac{3}{4}$ de flûte soit 360 traces,
- $\frac{1}{2}$ flûte soit 240 traces,
- $\frac{1}{4}$ de flûte soit 120 traces.

Une visualisation de l'étalement des CMPs par rapport au centre du bin a également été ajoutée de manière à permettre l'estimation de la dérive sur le bin en cours et pouvoir limiter les traces considérées en fonction de celle-ci.



VRMS ANALYSIS

Data: SELECT LINE Profile: pro0031 20 375 Hz LOAD VEL
 # bin: 40 : 40 : 4680 << 2880 >> 1 LOAD HRZ DISPLAY VEL EXPORT VEL
 Semblance choice: Full streamer 115 m **SPREAD**

PICK VRMS: MANU view next view previous MAX 2800 Current HRZ DEL

Display migration: LOAD agc 20 DISPLAY clip 3 V HRZ

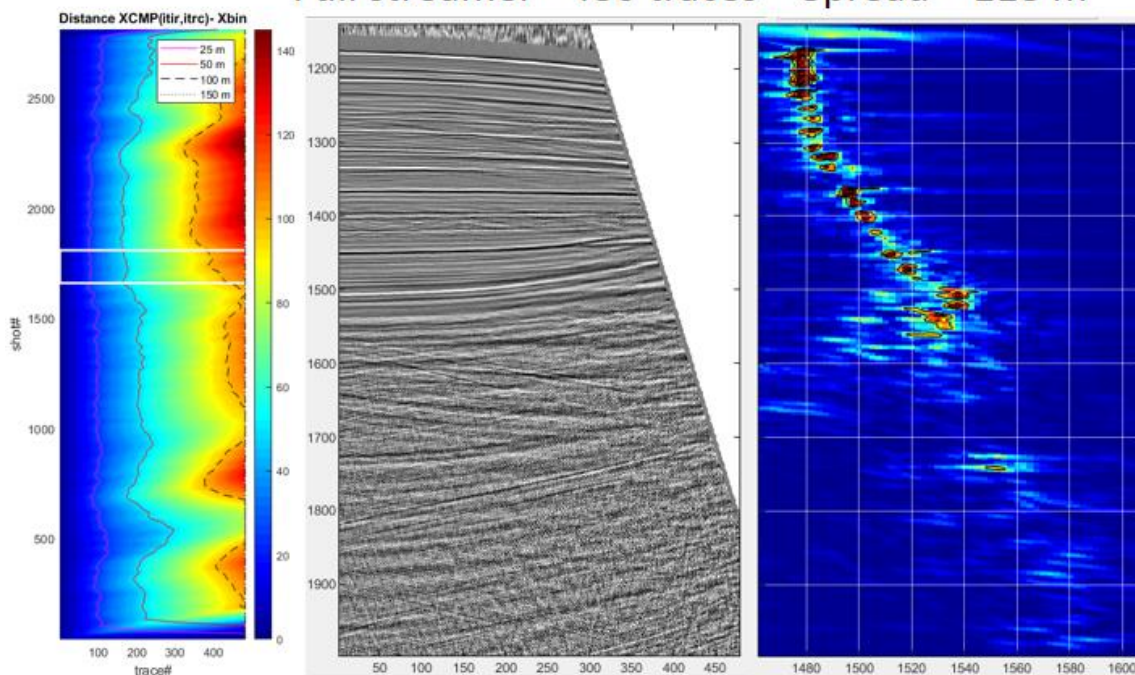
Vrms Vint

CMP: clip 3 agc 20 ZOOM RESET ZOOM apply MMO CHECK VRMS

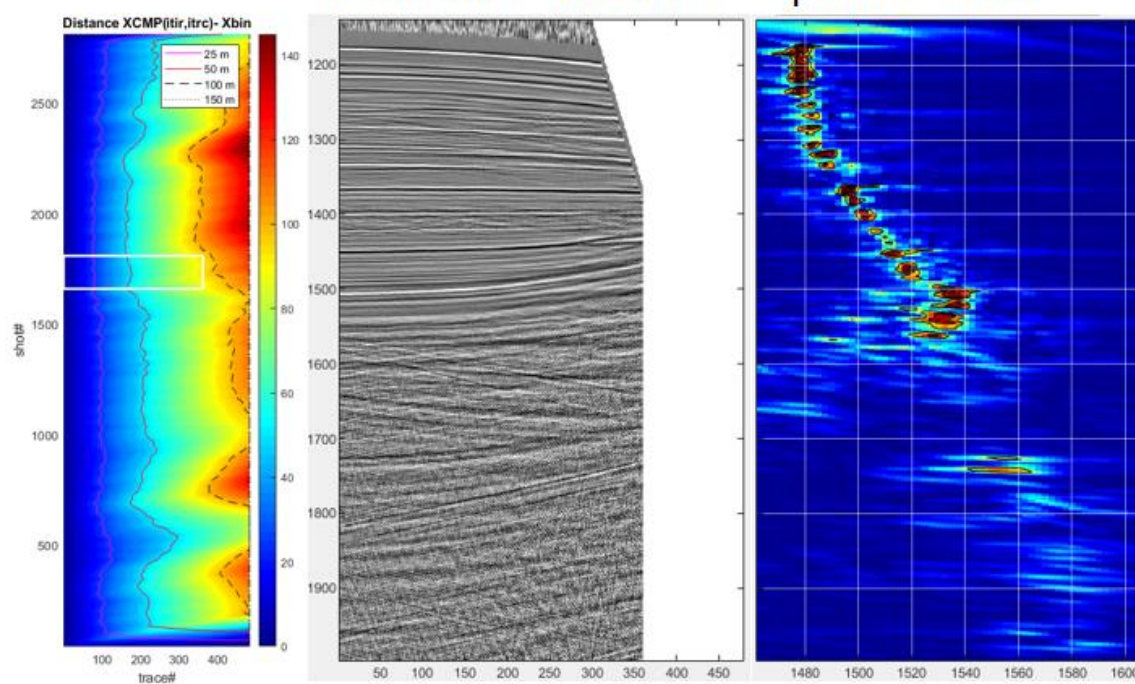
Semblance: Vrms 1450 - 2000 m/s dv 2.5 m/s RESET ZOOM ZOOM stretch 1.5 dt ratio 5 power 1 Scale 0 0.7 jet CLOSE

Interface de pointé de vitesse RMS (bas). Les évolutions sont encadrées en rouge : choix de la semblance en fonction de la longueur de flûte considérée, affichage de l'étalement maximum (en m) pour la longueur de flûte sélectionnée, bouton « SPREAD » pour visualisation de la distance des CMPs par rapport au centre du bin (en haut à gauche). Le cadre blanc correspond aux traces contributrices au bin considéré. En haut à droite, visualisation de la distance maximum entre les CMPs et le centre du bin en fonction des traces prises en compte.

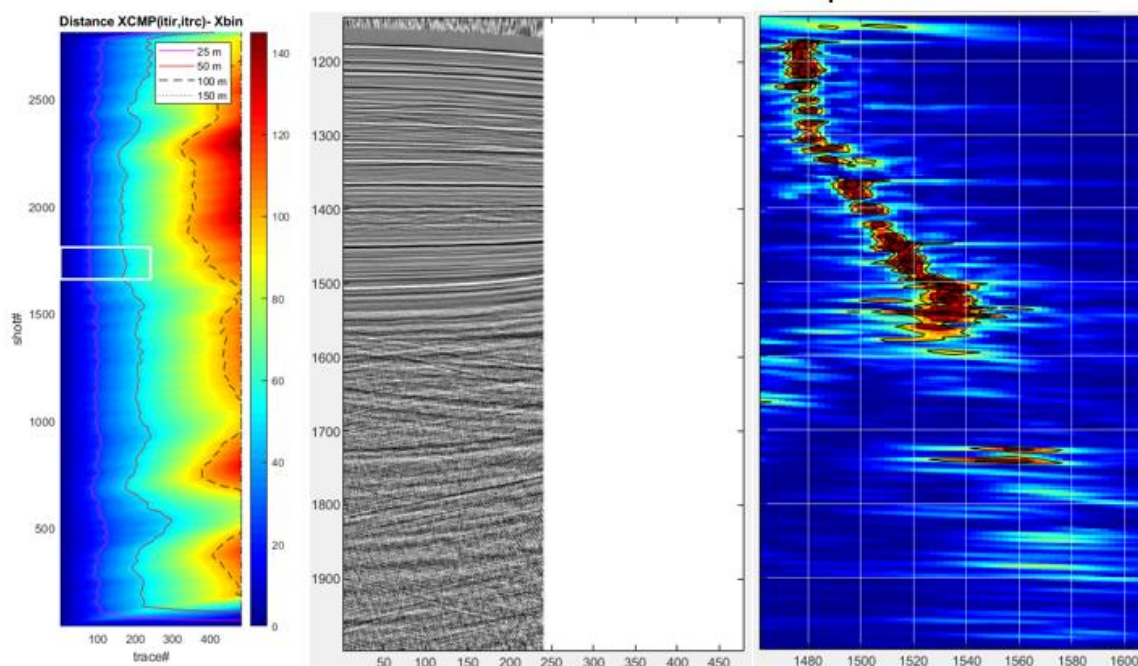
Full streamer - 480 traces – Spread = 118 m



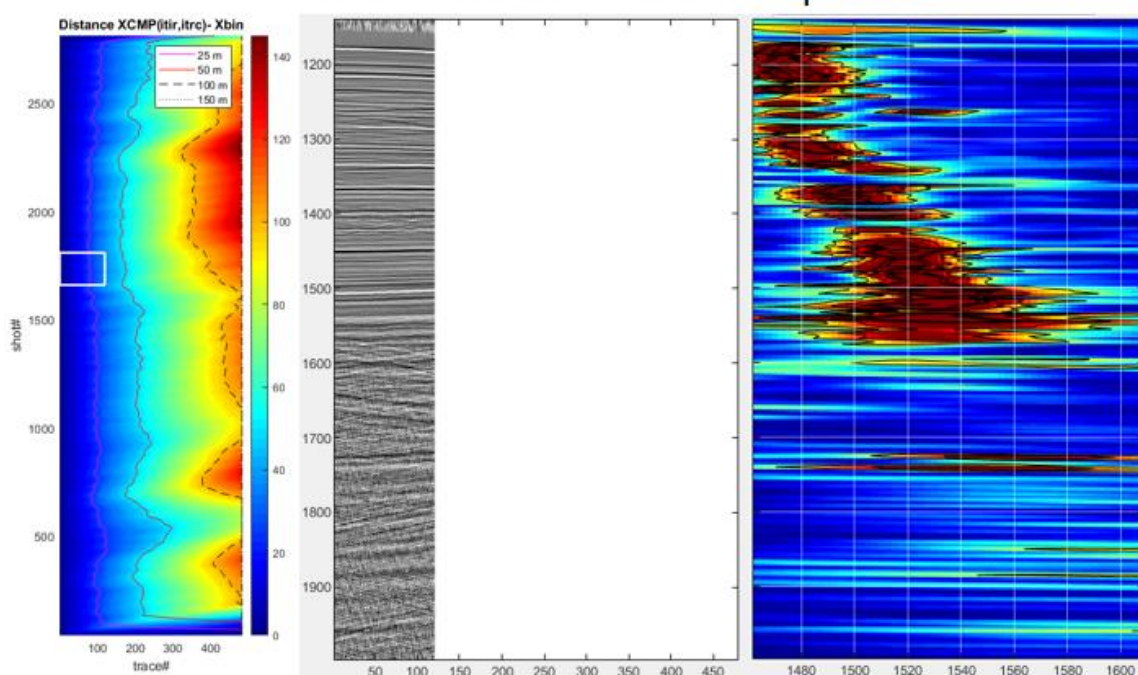
¾ streamer 360 traces – Spread = 95 m



½ streamer - 240 traces – Spread = 69 m



¼ streamer 120 traces – Spread = 38 m



Visualisation de l'étalement des CMPs, du bin et de la semblance en fonction de la longueur de flûte considérée pour le bin 2880 du profil031. On note clairement la perte de résolution avec la diminution du nombre de traces considérées.

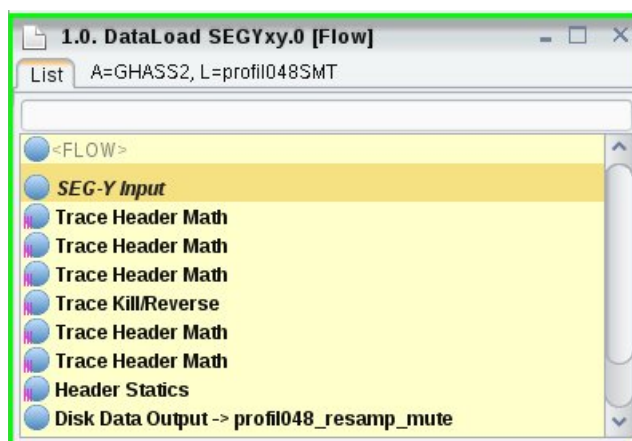
Sur le plateau, par faible bathymétrie, le stretch est prépondérant et le choix de la longueur de flûte considérée n'a pas ou peu d'influence.

Annexe 3 – Traitement anti-multiple SRME – Sismique SIS1 BF

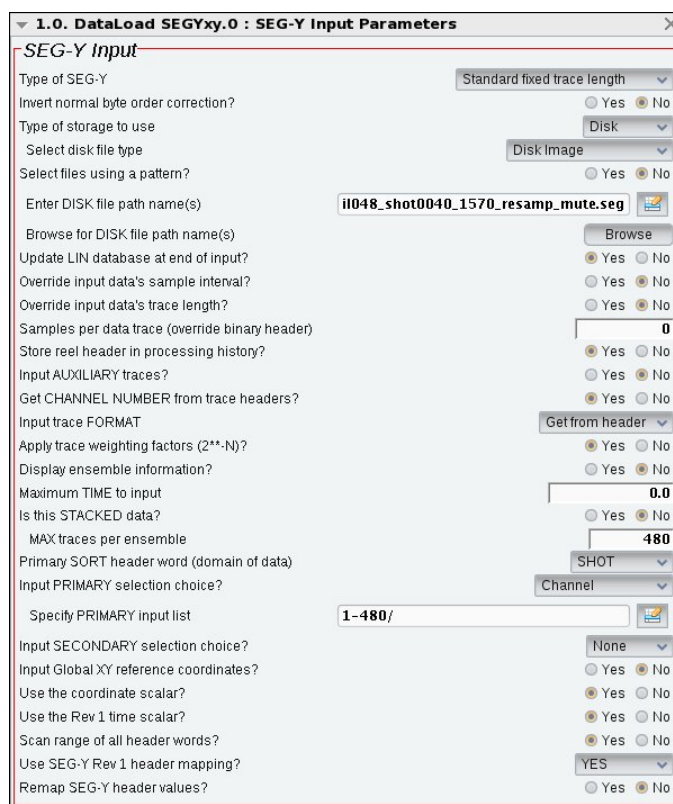
Présentation détaillée de la séquence développée sur Promax pour atténuer les multiples du fond de l'eau et des principaux paramètres appliqués aux données sismiques BF ré-échantillonnées.

- **Importation des données**

Les données collections points de tirs ré-échantillonnées (480 traces @12.5m et 2 ms) sont importées à partir d'un fichier SEG-Y unique.



Séquence d'importation des données prétraitées collections point de tir



Module d'importation du fichier SEG-Y collections point de tir

Un certain nombre d'informations de géométrie doivent être mises à jour à l'aide du module [Trace Header Math] et des entêtes de traces du fichier SEG Y au sein de la base de donnée associée au profil importé :

$SOU_SLOC = FFID$

$OFFSET = -\sqrt{(SOU_X-REC_X)^2 + (SOU_Y-REC_Y)^2}$

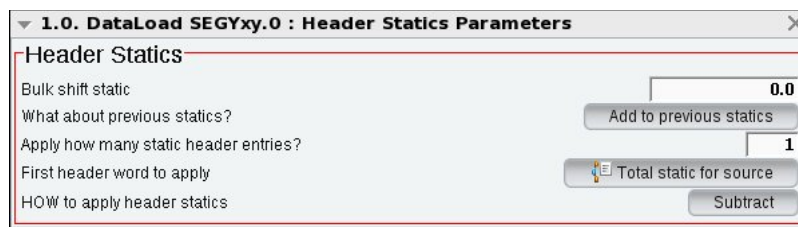
$AOFFSET = \sqrt{(SOU_X-REC_X)^2 + (SOU_Y-REC_Y)^2}$

$SOU_STAT = SOU_STAT/10000$

$TOT_STAT = TOT_STAT/10000$

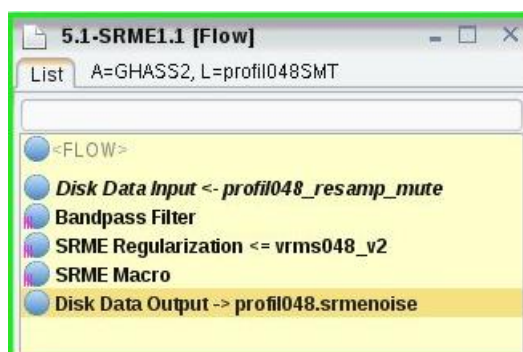
Les traces *flaguées* (le flag a été mis à jour dans le fichier SEG Y) lors de l'édition de bruit doivent être mises à zéro avec le module [Trace Kill/Reverse] : Kill Zero Traces ;

La correction du délai source est appliquée à l'aide du module [Header Statics Parameters] : on peut à la fois appliquer une valeur statique constante (*Bulk shift*) et la valeur lue dans les entêtes des traces SEG Y (stockées ensuite dans la base de données, variable *Total Static for source*). Dans le cas des données SIS1, le délai source est nul.



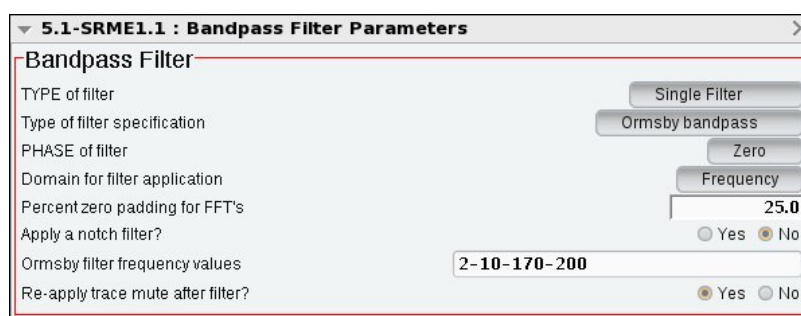
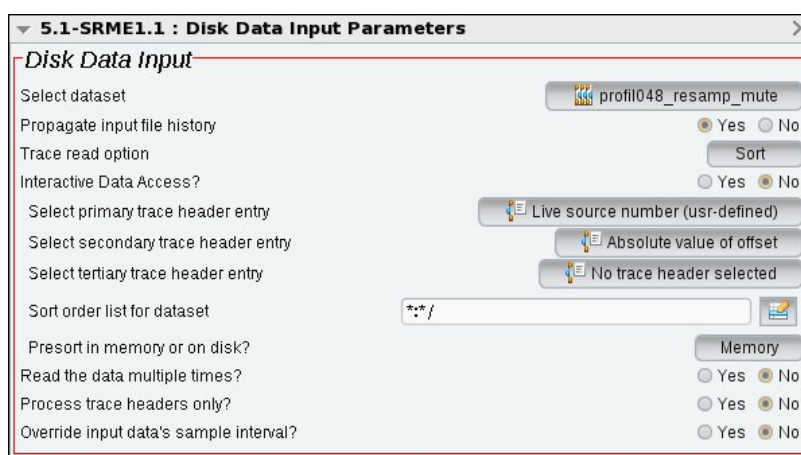
Module de correction statique en temps

- Régularisation spatiale et estimation du modèle de multiples (SRME Macro)



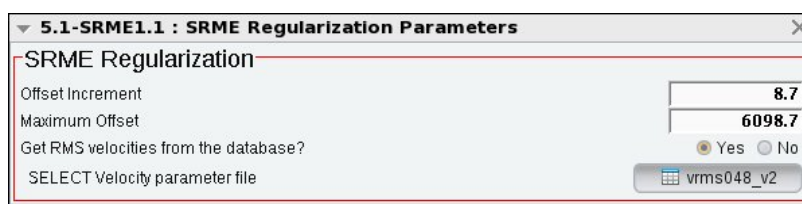
Séquence d'estimation du modèle de multiples

Les données sont lues en les triant comme suit : *Live source number* (primary trace header entry) puis *Absolute value of offset* (secondary entry). Un filtre passe-bande adapté aux données SIS1 BF est appliqué : [2-10-170-200] Hz.



Modules de lecture des données importées et application du filtre passe-bande

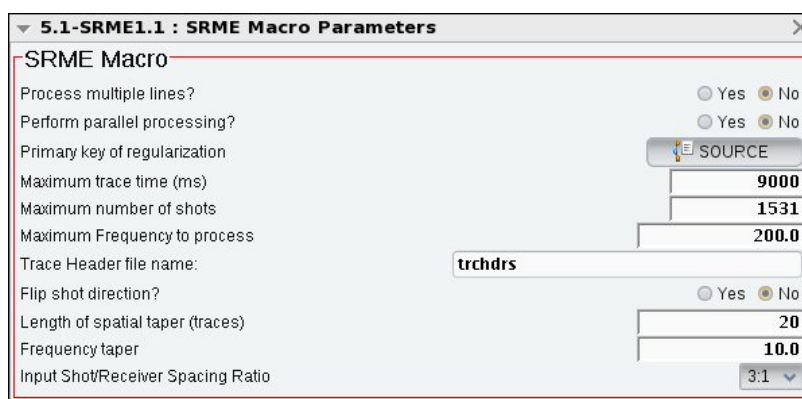
La première partie de la séquence SRME correspond au ré-échantillonnage des données suivant la dimension des offsets.



Modules de régularisation des données suivant la dimension des offsets

Le paramètre *offset increment* est choisi de façon à obtenir un ratio 3:1 entre la distance inter-tir moyenne estimée pour chaque profil (26.11 m pour le cas du profil illustré n°48) et le pas d'offset régularisé qui doit être également inférieur à l'inter-trace de 12.5 m (valeur d'inter-trace après sommation des traces deux à deux en amont de la séquence Promax, lors du pré-traitement et de la création du fichier SEG Y sur Matlab). L'offset maximum est le multiple de ce pas de régularisation juste au-dessus de la valeur d'offset maximum réel. La régularisation nécessite d'entrer un premier modèle de vitesse RMS (inutile à ce stade de fournir un modèle précis) précédemment pointé sur les données avant traitement anti-multiple.

Le module [SRME Macro] estime ensuite le modèle de multiple à partir des données régularisées.

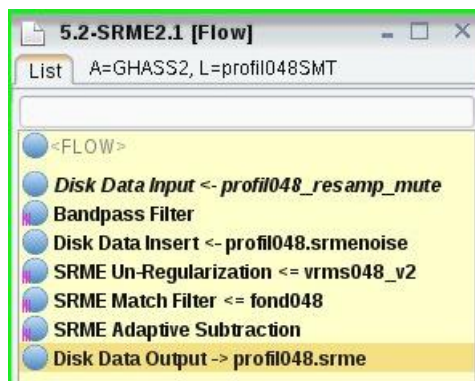


Les paramètres *Maximum trace time*, *Maximum number of shots* et *Maximum Frequency to process* sont ajustés en fonction des données en entrée et du filtre passe-bande appliqué.

Les paramètres à éventuellement tester sont ceux des fenêtres d'apodisation (*taper*) : en nombre de traces et en pourcentage de la fréquence maximale. Ils ont été fixés d'après les exemples de *workflow* proposé sur Promax et correspondent à des valeurs « habituelles » pour des données « BF ».

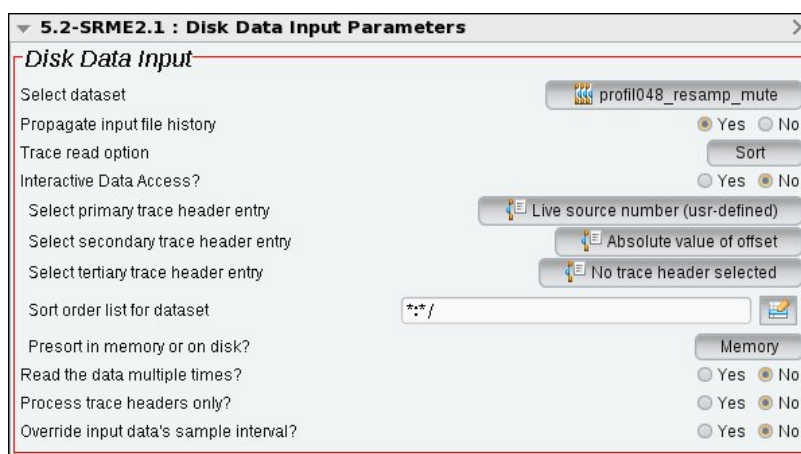
Le ratio *Shot/Receiver Spacing* indique l'interpolation nécessaire pour obtenir un échantillonnage des tirs équivalent à celui des offsets régularisés. Il dépend donc de la phase précédente de régularisation des offsets ; il suppose également que la distance inter-tir d'acquisition est constante. Dans le cas de fortes variations de la distance inter-tir (i.e. tir en temps et variation de la vitesse fond du navire), cette hypothèse de ratio constant est prise en défaut. Une cadence de tir à distance constante serait donc plus adaptée pour ce module anti-multiple.

- **Un-Regularization - Match Filter - Adaptive Subtraction**

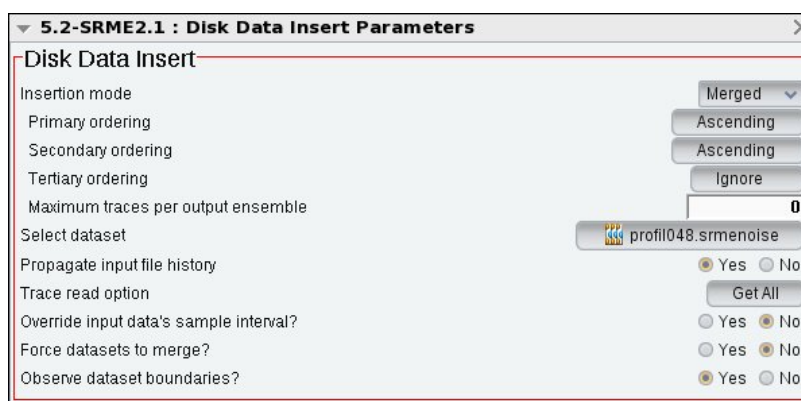


Séquence d'adaptation des amplitudes du modèle de multiples et soustraction au données

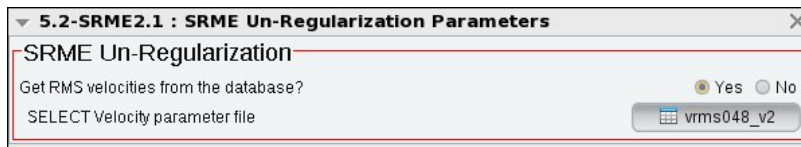
Les données points de tirs d'origine ainsi que le modèle de multiple estimé doivent être fusionnées. Ce dernier doit être également recalculé pour les offsets réels : module [SRME Un-Regularization].



Modules de lecture des données



Modules de lecture du modèle de multiples



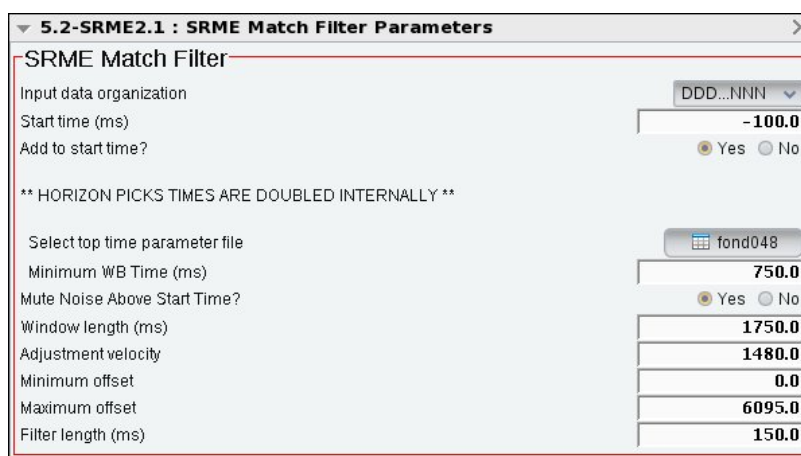
Modules de calcul des multiples sur la géométrie originale

Le modèle de bruit estimé est ensuite ajusté aux données d'origine par l'intermédiaire d'un filtre unique (*match filter*) calculé sur une fenêtre de temps et d'offsets définie par l'utilisateur. La fenêtre temps d'ajustement du filtre est en général celle contenant le premier multiple du fond de l'eau. Cette étape de *Match Filter* affecte probablement de façon importante le résultat de l'atténuation des multiples (i.e. plusieurs paramètres à tester).

Les paramètres *Start time* et *Add start time* permettent de définir le début de la fenêtre temps du multiple du fond de l'eau. Pour cela, le fond de l'eau doit être pointé manuellement sur une première section sommée (fichier de paramètre HOR, pointé à l'aide du module Trace Display de Promax). La fenêtre d'ajustement du filtre commencera alors 100 ms (*Start time* = -100 ms) au-dessus du multiple du fond. Le paramètre Minimum WB Time est le temps minimum au-dessus duquel la trace ne sera pas prise en compte pour le calcul du filtre ; il est fixé pour chaque profil en fonction du temps pointé sur le fond de l'eau (temps minimum d'arrivée du fond de l'eau).

Les paramètres suivants sont plus difficiles à fixer (peu d'information sur la documentation et certainement les plus importants à tester) :

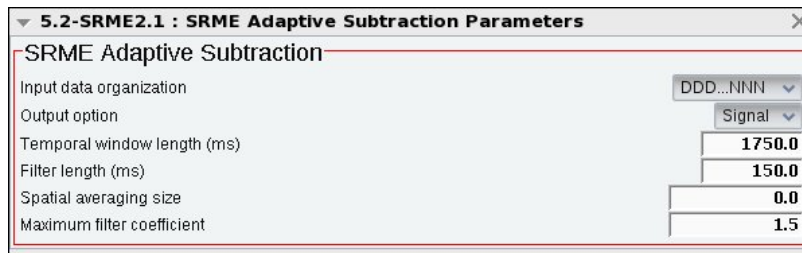
- **Window length** : "Design window length (ms). This length should be at least 5 times the filter length". Doit couvrir globalement la fenêtre temps des multiples à atténuer. Pour le traitement des données, nous l'avons cependant fixée au temps d'arrivée maximum du fond de l'eau (en supposant qu'elle correspond à la période maximum d'arrivées des multiples) ; les tests en prenant une fenêtre plus longue (celle couvrant les temps d'arrivée du multiple) ne semblaient pas améliorer les résultats ;
- **Adjustment velocity** : "Velocity used to adjust start time with offset. 0 implies no adjustment". Fixée à la vitesse de la colonne d'eau ;
- **Minimum offset / Maximum offset** : "offset for filter design. Correlations for the Match filter are within this min/max offset". Eventuellement limiter les offsets servant au calcul du filtre (les offsets longs pouvant être moins bien modélisés) ; non testé ;
- **Filter length** : "Match filter length (ms). This should not exceed 20% of the window length". A priori, il y aurait peu de gain à prendre une durée supérieure à 200 ms ;



Modules de calcul du filtre d'adaptation du modèle de multiples

La dernière étape consiste à adapter trace par trace le modèle de multiple pour le soustraire aux traces des données. A nouveau certains paramètres peuvent affecter de façon notable le résultat. Le principe consiste à calculer des filtres temporels pouvant varier en temps et spatialement et minimisant l'énergie du signal résultant après soustraction. Des fenêtres glissantes et avec recouvrements sont utilisés pour les calculs d'adaptation des multiples modélisés. Des paramètres non optimaux peuvent également atténuer les réflexions primaires au sein des arrivées multiples du fait de la méthode de minimisation de l'énergie utilisée. L'idéal est de tester les paramètres afin de réduire le bruit (multiple) tout en préservant le signal. Principaux paramètres :

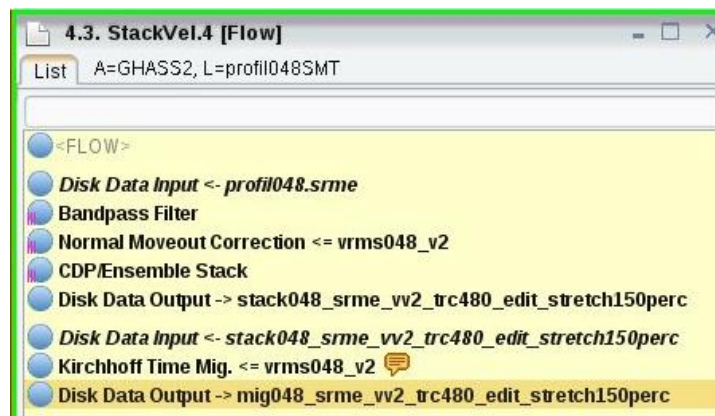
- **Temporal window length** (ms) : « Length of the temporal design window (ms). This should be at least 5 times the chosen filter length.” Ne devrait pas excéder la période du multiple. Et si elle est trop courte, on risque aussi d'adapter l'énergie du modèle de multiple au signal à préserver, détruisant ainsi les réflecteurs. A tester de façon poussée... Nous l'avons fixé égal au paramètre « Windows length » du module SRME Match Filter (temps d'arrivée maximum du fond de l'eau) ;
- **Filter length (ms)** : “Length of the adaptive filter (ms). This should be less that 20% of the temporal window length”. Pour des données “standard”, une valeur supérieure à 100 ms peut dégrader les résultats ; on l'a fixé à la valeur du paramètre « Filter Length » du module SRME Match Filter, soit supérieure à 100 ms...
- **Spatial averaging size** : “Radius of circle (in ft or m) over which to average in filter design (0 means no spatial averaging)”. Permet de mixer / moyenner entre les traces adjacentes (corrélacion spatiale) pour le calcul du filtre, ce qui peut aider à obtenir des résultats plus stables, notamment dans le cas de données très bruitées ou avec amplitudes variables. Fixé à 0 (no spatial averaging) ; non testé ;
- **Maximum filter coefficient** : “Specify maximum coefficient in filter (0 means no restriction)”. Nous l'avons fixé à 1.5. Cela permet de stabiliser le résultat du calcul du filtre dans le cas de données très bruitées ou avec amplitudes variables (restriction de la magnitude des coefficients du filtre) ;



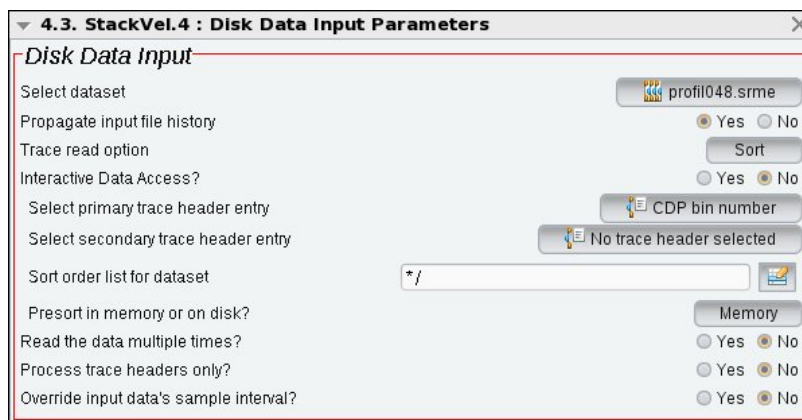
Modules de soustraction des multiples avec adaptation locale du signal soustrait

- **Sommation et migration**

La suite de la séquence de traitement est identique à celle sans traitement anti-multiple. Elle est donnée avec les paramètres adaptés à la sismique BF.



Séquence d'imagerie après atténuation des multiples



Module de lecture des données collections points de tir dont les multiples ont été atténués

4.3. StackVel.4 : Normal Moveout Correction Parameters

Normal Moveout Correction

Direction for NMO application: FORWARD

Stretch mute percentage: 150.0

Apply any remaining static during NMO? Yes No

Disable check for previously applied NMO? Yes No

Get 3D dip velocities? Yes No

Apply partial NMO? Yes No

Apply P-Sv converted-wave NMO? Yes No

Long offset correction? NONE | ALCHALABI | CASTLE | HARLAN | TSVANKIN

Get velocities from the database? Yes No

SELECT Velocity parameter file: vrms048_v2

Module de correction NMO (mute anti-stretch fixé à 150%)

4.3. StackVel.4 : CDP/Ensemble Stack Parameters

CDP/Ensemble Stack

Sort order of input ensembles: CDP

METHOD for trace summing: Mean

Root power scalar for stack normalization: 0.5

Apply final datum statics after stack? Yes No

Has NMO been applied? Yes No

Module de sommation

4.3. StackVel.4 : Kirchhoff Time Mig. Parameters

Kirchhoff Time Mig.

CDP interval (feet or meters): 25.0

Maximum frequency to migrate (in Hz): 200.0

Migration aperture (feet or meters): 0.0

Maximum dip to migrate: 30.0

Avoid spatial aliasing? Yes No

Get RMS velocities from database? Yes No

Select RMS vs.time velocity file: vrms048_v2

Change maximum memory usage? Yes No

Change the default tapering? Yes No

Re-apply trace mutes? Yes No

Re-kill dead traces? Yes No

Module de migration post-stack temps

Annexe 4 – Livrables et archives

Données traitées de sismique HR

- Sections migrées : migra0XXvv2_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg
Fichiers SEGY-révision 1, big endian, codage des amplitudes : 4-byte IEEE Float
Distance entre bins : 6.25 m
Pas d'échantillonnage : 0.5 ms
Zéro délai

- Modèles de vitesse d'intervalle : vel0XX.seg
Fichiers SEGY-révision 1, big endian,
codage des amplitudes (vitesses en m/s) : 4-byte IEEE Float
Distance entre bins : 6.25 m
Pas d'échantillonnage : 0.5 ms
Délai constant par profil (variable d'un profil à un autre) ; valeur du délai en [ms] stocké dans les bytes 109-110 des entêtes de trace ;

- Positionnement des bins : bin_pos0XX.asc
Les fichiers migrés et modèles de vitesse ont le même nombre de bins avec les mêmes positions.
 - Format : texte, sans entête de colonnes
 - Colonnes :
 - #1 : n° de bin
 - #2 : longitude WGS84 en degrés décimaux
 - #3 : latitude WGS84 en degrés décimaux
 - #4 : couverture de sommation

| Profil | Fichier | Nom du fichier | Taille (Ko) |
|--------|----------------|--|-------------|
| 22 | Positionnement | bin_pos022.asc | 288 |
| | Migration | migra022vv2_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 213875 |
| | Vitesse Vint | vel022.seg | 92719 |
| 23 | Positionnement | bin_pos023.asc | 271 |
| | Migration | migra023vv2_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 201077 |
| | Vitesse Vint | vel023.seg | 81475 |
| 24a | Positionnement | bin_pos124.asc | 187 |
| | Migration | migra124vv_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 138769 |
| | Vitesse Vint | vel124.seg | 56229 |
| 24b | Positionnement | bin_pos224.asc | 148 |
| | Migration | migra224vv_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 109339 |
| | Vitesse Vint | vel224.seg | 25724 |
| 25 | Positionnement | bin_pos025.asc | 70 |
| | Migration | migra025vv_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 40951 |
| | Vitesse Vint | vel025.seg | 12234 |
| 26 | Positionnement | bin_pos026.asc | 303 |
| | Migration | migra026vv_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 177370 |
| | Vitesse Vint | vel026.seg | 21086 |
| 27 | Positionnement | bin_pos027.asc | 433 |
| | Migration | migra027vv_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 321335 |
| | Vitesse Vint | vel027.seg | 303132 |
| 28 | Positionnement | bin_pos028.asc | 437 |
| | Migration | migra028vv_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 361027 |
| | Vitesse Vint | vel028.seg | 333471 |
| 29 | Positionnement | bin_pos029.asc | 143 |
| | Migration | migra029vv_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 106029 |
| | Vitesse Vint | vel029.seg | 42964 |
| 30 | Positionnement | bin_pos030.asc | 165 |
| | Migration | migra030vv2_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 122606 |
| | Vitesse Vint | vel030.seg | 73989 |
| 31 | Positionnement | bin_pos031.asc | 177 |
| | Migration | migra031vv2_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 131019 |
| | Vitesse Vint | vel031.seg | 90198 |
| 32 | Positionnement | bin_pos032.asc | 195 |
| | Migration | migra032vv2_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 144561 |
| | Vitesse Vint | vel032.seg | 103616 |
| 33 | Positionnement | bin_pos033.asc | 99 |
| | Migration | migra033vv_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 57395 |
| | Vitesse Vint | vel033.seg | 8890 |
| 34 | Positionnement | bin_pos034.asc | 363 |
| | Migration | migra034vv2_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 300257 |
| | Vitesse Vint | vel034.seg | 246784 |
| 35 | Positionnement | bin_pos035.asc | 81 |
| | Migration | migra035vv_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 76633 |
| | Vitesse Vint | vel035.seg | 30965 |
| 36 | Positionnement | bin_pos036.asc | 575 |
| | Migration | migra036vv2_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 475195 |
| | Vitesse Vint | vel036.seg | 463105 |
| 37 | Positionnement | bin_pos037.asc | 423 |
| | Migration | migra037vv_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 314163 |
| | Vitesse Vint | vel037.seg | 251874 |
| 38 | Positionnement | bin_pos038.asc | 287 |
| | Migration | migra038vv2_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 272896 |
| | Vitesse Vint | vel038.seg | 158451 |

| | | | |
|-----------|----------------|--|--------|
| 39 | Positionnement | bin_pos039.asc | 390 |
| | Migration | migra039vv_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 322397 |
| | Vitesse Vint | vel039.seg | 199362 |
| 40 | Positionnement | bin_pos040.asc | 369 |
| | Migration | migra040vv2_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 304556 |
| | Vitesse Vint | vel040.seg | 165084 |
| 41 | Positionnement | bin_pos041.asc | 402 |
| | Migration | migra041vv2_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 298662 |
| | Vitesse Vint | vel041.seg | 154853 |
| 42 | Positionnement | bin_pos042.asc | 248 |
| | Migration | migra042vv_trc480_edite_stretch116perc_kir_promax.seg | 184307 |
| | Vitesse Vint | vel042.seg | 79901 |

Liste des fichiers sismiques HR issus du traitement et archivés - Volume total des données
HR traitées : 7.32 Go

Données traitées de sismique SIS1 BF

- Sections migrées : mig0XX_srme_vv2_trc480_edit_stretch150perc.seg
Fichiers SEGY-révision 1, big endian, codage des amplitudes : 4-byte IEEE Float
Distance entre bins : 25 m
Pas d'échantillonnage : 2 ms
Zéro délai

- Modèles de vitesse d'intervalle : vel0XX.seg
Fichiers SEGY-révision 1, big endian,
codage des amplitudes (vitesses en m/s) : 4-byte IEEE Float
Distance entre bins : 25 m
Pas d'échantillonnage : 2 ms
Délai constant par profil (variable d'un profil à un autre) ; valeur du délai en [ms] stocké dans les bytes 109-110 des entêtes de trace ;

- Positionnement des bins : bin_pos0XX.asc
Les fichiers migrés et modèles de vitesse ont le même nombre de bins avec les mêmes positions.
 - Format : texte, sans entête de colonnes
 - Colonnes :
 - #1 : n° de bin
 - #2 : longitude WGS84 en degrés décimaux
 - #3 : latitude WGS84 en degrés décimaux
 - #4 : couverture de sommation

| Profil | Fichier | Nom du fichier | Taille (Ko) |
|---------------|----------------|--|--------------------|
| 43 | Positionnement | bin_pos043.asc | 53 |
| | Migration | mig043_srme_vv2_trc480_edit_stretch150perc.seg | 25428 |
| | Vitesse Vint | vel045.seg | 12607 |
| 44 | Positionnement | bin_pos044.asc | 56 |
| | Migration | mig044_srme_vv2_trc480_edit_stretch150perc.seg | 26889 |
| | Vitesse Vint | vel044.seg | 13332 |
| 45 | Positionnement | bin_pos045.asc | 107 |
| | Migration | mig045_srme_vv2_trc480_edit_stretch150perc.seg | 51369 |
| | Vitesse Vint | vel045.seg | 29408 |
| 46 | Positionnement | bin_pos046.asc | 98 |
| | Migration | mig046_srme_vv2_trc480_edit_stretch150perc.seg | 46736 |
| | Vitesse Vint | vel046.seg | 26757 |
| 47 | Positionnement | bin_pos047.asc | 82 |
| | Migration | mig047_srme_vv2_trc480_edit_stretch150perc.seg | 39218 |
| | Vitesse Vint | vel047.seg | 22452 |
| 48 | Positionnement | bin_pos048.asc | 64 |
| | Migration | mig048_srme_vv2_trc480_edit_stretch150perc.seg | 30595 |
| | Vitesse Vint | vel048.seg | 14163 |
| 49 | Positionnement | bin_pos049.asc | 98 |
| | Migration | mig049_srme_vv2_trc480_edit_stretch150perc.seg | 46915 |
| | Vitesse Vint | vel049.seg | 18630 |
| 50 | Positionnement | bin_pos050.asc | 102 |
| | Migration | mig050_srme_vv2_trc480_edit_stretch150perc.seg | 48572 |
| | Vitesse Vint | vel050.seg | 20886 |
| 51 | Positionnement | bin_pos051.asc | 75 |
| | Migration | mig051_srme_vv2_trc480_edit_stretch150perc.seg | 35512 |
| | Vitesse Vint | vel051.seg | 13324 |

Liste des fichiers sismiques SIS1 BF issus du traitement et archivés - Volume total des données
SIS1 BF traitées : 511 Mo

Archives

Les données traitées de sismique HR et SIS1 BF issues des traitements développés dans ce rapport sont archivées dans le système d'archivage pérenne de l'IFREMER.

Archive No 20230905-ET01-GHASS2_HR_SMT_REJEU1

Auteur : ethereau@brest.ifremer.fr

Date : 07/09/2023

Taille : 8007 Mo

Contenu: Mission GHASS2 Leg1 - NO Pourquoi Pas - aout-septembre 2021

Données HR et SMT traitées phase 1 : imagerie

Fichier Readme_livrablesGHASS2_phase1.doc : fichier descriptif des données

Données HR traitées phase 1 :

- fichiers bin_posXXX.asc de positionnement des bins définitif au format ascii (binning à 6.25 m) ;
- fichiers migrés temps format SEG Y : dt 0.5 ms, édition des traces bruitées, analyse de vitesse non horizon consistant, sommation des 480 traces, mute anti-stretch à 116% via Matlab et migration temps Kirchhoff via Promax ;
- fichier vitesse velXXX.seg format segy : modèle de vitesse issu de l'analyse de vitesse RMS non horizon consistant (pas minimum de 160 CMPs soit 1000 m, localement plus resserré 40 CMPs soit 250m), interpolation tous les CMPs, dt 0.5 ms ;

Données BF SIS1 traitées phase 1 :

- fichiers bin_posXXX.asc de positionnement des bins définitif au format ascii (binning à 25 m) ;
- fichiers migrés temps format SEG Y : dt 2 ms, édition des traces bruitées, antimultiple (SRME), analyse de vitesse non horizon consistant, sommation 480 traces à 12.5 m (ré-échantillonnage), mute anti-stretch à 150% et migration temps Kirchhoff via Promax ;
- fichier vitesse velXXX.seg format segy : modèle de vitesse issu de l'analyse de vitesse NMO non horizon consistant (pas d'analyse minimum de 20 CMPs soit 500m), interpolation tous les CMPs, dt 2 ms ;

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1. Longueurs des éléments du streamer sismique Haute Résolution de GHASS2 – 3000 m de tronçons actifs..... | 9 |
| Figure 2. Géométrie d'une barre de source HR de 3 canons mini-GI. | 9 |
| Figure 3. Caractéristiques du signal source HR (modélisation Gundalf®) pour un canon mini-GI 24/24 ci immergé à 2 m, et une pression de 140 bars ; signature champs lointain à incidence normale, filtre passe-bas à 800 Hz. Graphe du haut: signal temporel (polarité : pic positif = augmentation de pression) ; graphe du bas : spectre d'amplitude..... | 10 |
| Figure 4. Géométrie d'acquisition théorique du dispositif de sismique Haute Résolution déployé pendant la campagne GHASS2 à bord du N/O Pourquoi Pas ?..... | 11 |
| Figure 5. Localisation des profils sismiques HR acquis lors du leg 1 de la campagne GHASS2 ; projection UTM zone 36T ; bathymétrie issue des campagnes GHASS (N/O Pourquoi Pas ?, 2015) et GHASS2 (N/O Pourquoi Pas ?, 2021), traitement GEOOCEAN/ANTIPOD..... | 12 |
| Figure 6. Longueurs des éléments du streamer sismique SIS1 de GHASS2 – 6000 m de tronçons actifs..... | 14 |
| Figure 7. Composition de la source de 480 ci ; les canons des clusters 3 et 4 sont actifs ; ceux des clusters 2 et 5 sont des rechanges ; le cluster 1 sert de lest ; les canons sont immergés à 5 m. Numéros des voies des données SEG D SEAL et GUNLINK associées aux capteurs source Gun Sensors et hydrophones Near Field..... | 15 |
| Figure 8. Géométrie de la source SIS1 480 ci..... | 15 |
| Figure 9. Caractéristiques du signal source 480 ci - modélisation Gundalf® pour une immersion de 5 m et une pression de 140 bars ; signature champs lointain à incidence normale, filtre passe-bas à 800 Hz . Graphe du haut : signal temporel (polarité : pic positif = augmentation de pression) ; graphe du bas : spectre d'amplitude. | 16 |
| Figure 10. Géométrie d'acquisition théorique du dispositif de sismique SIS1 480 ci déployé pendant la mission GHASS2 à bord du N/O Pourquoi Pas ?..... | 17 |
| Figure 11. Localisation des profils sismiques SIS1 480 ci (en noir) acquis lors du leg1 de la campagne GHASS2 ; projection UTM zone 36T ; bathymétrie issue des campagnes GHASS (N/O Pourquoi Pas ?, 2015) et GHASS2 (N/O Pourquoi Pas ?, 2021), traitement GEOOCEAN/ANTIPOD ; en mauve, les profils de sismique HR acquis pendant GHASS2..... | 18 |
| Figure 12. Exemple de pointé du maximum du signal Time Break du canon actif (profil41, tir 500). Le temps de déclenchement du canon est 1 ms avant le maximum d'amplitude. | 20 |
| Figure 13. Valeur moyenne par profil du délai source HR estimée par pointé du signal hydrophone TB. Les barres rouges indiquent les valeurs min et max du délai par profil. | 21 |
| Figure 14. Ecart moyen par profil entre la position du point de référence du navire estimée par ECOS (intégration temps réel) et le GPS « brut » traité en temps différé : en bleu écart moyen, en rouge écart maximal. L'écart maximal conséquent pour le profil 28 est la conséquence du problème de diffusion de la navigation bord par TECHSAS..... | 21 |
| Figure 15. Distance moyenne par profil entre le point de référence navire et la bouée de queue (positions issues du traitement des données GPS). En bleu, moyenne, en rouge plage de variation entre les valeurs minimum et maximum ; variations liées en partie à la dérive du streamer et aux fins de giration)..... | 22 |

Figure 16. Ecart type sur le bruit des mesures compas magnétiques des contrôleurs d’immersion. Les profils 124 et 224 sont représentés respectivement aux numéros 44 et 45. 23

Figure 17. Profil224 (sismique HR, 21 contrôleurs espacés de 150 mètres), caps avions bruts (en haut à gauche), après édition manuelle (en haut à droite), après filtrage 2D Savitzky-Golay (en bas). Le graphe du haut représente les variations du cap gyrocompas du navire..... 23

Figure 18. Mesures CTD réalisées tout au long de la campagne GHASS2, visualisation limitée à la couche 0-100m. La vitesse de propagation moyenne en surface est de 1517 m/s. 24

Figure 19. Comparaison des temps d’arrivée directe pointés (point rouge) et calculés à partir de la géométrie d’acquisition (croix bleue) : exemple du profil042. A gauche : avant correction de la géométrie. A droite : après prise en compte de la géométrie corrigée. Amplitudes normalisées. 25

Figure 20. Statistiques par profil de l’étalement latéral des CMPs (XCMPs – Xcentre bin). Points bleus : moyenne (taille du point fonction du nombre de bins, i.e. de la longueur du profil) ; barre rouge : écart type ; barre mauve : [minimum maximum] ; point noir : maximum..... 26

Figure 21. Exemple d’estimation de l’étalement latéral des CMPs (prise en compte des 480 traces) pour chaque bin du profil 27. 26

Figure 22. Exemple de bruit dû aux contrôleurs d’immersion observé sur une collection point de tir (profil 25, tir 142, filtre passe bande 20-400 Hz). Le niveau de bruit est relativement élevé à l’aplomb du contrôleur ; le bruit se propageant de part et d’autre est de niveau bien plus faible. 29

Figure 23. Exemples de signaux parasites dus aux tirs d’exploration pétrolière observés sur collections points de tir (figure du haut : profil 39, tir 3672 ; figure du bas : profil 27, tir 4326 ; filtre passe bande 20-400 Hz). 29

Figure 24. Exemple de bruit dû aux défauts électroniques observés sur collection point de tir après filtre passe-bande (profil 27, tir 3078, filtre passe bande 20-400 Hz). A noter la différence d’échelle d’amplitude entre la trace 94 (défaut électronique) et la trace 95 (aucun défaut). 30

Figure 25. Exemple de trace présentant un défaut (discontinuité du signal brut), profil 26, trace 91 ,tir 1600. La figure du bas représente la valeur absolue de la dérivée de la trace. Les courbes rouges correspondent au signal filtré passe-bas (10 Hz). Sur le graphe du bas, les variations d’amplitude liées aux réflexions et à la discontinuité sont du même ordre de grandeur avant filtre. Après filtre passe bas, seul le défaut lié à la discontinuité du signal reste prépondérant... 31

Figure 26. Exemple de valeurs de l’attribut $[\max(\text{abs}(\text{diff}(\text{signal}))) / \text{mean}(\text{abs}(\text{diff}(\text{signal})))]$ calculées pour le profil 26. Figure de gauche : pour toutes les traces du point de tir 1600 ; figure de droite : pour tous les tirs de la trace 91. Celle-ci apparaît en défaut (attribut supérieur au seuil) pour 7 tirs du profil. En pointillés verts, valeur moyenne de l’attribut sur l’ensemble du profil ; en pointillés rouges, seuil d’anomalie égal à 6 fois la valeur moyenne..... 31

Figure 27. Exemple de calcul de l’attribut distorsion sur un point de tir. Figure A) : point de tir filtré 20-400 Hz avec l’arrivée directe en bleu et la réflexion fond de l’eau estimée en rouge (profil 24b, tir 1554). Figure B) : attribut Amplitude calculé sur des fenêtres de 37.5 ms à partir du fond de l’eau. Figure C) : attribut distorsion calculé en considérant +-10 traces et +- 10 tirs.. 33

Figure 28. Distribution de type log normale calculées pour toutes les fenêtres temps, toutes les traces et tous les tirs du profil 24b. Seules 0.067 % des valeurs de distorsion sont supérieures à 5. 34

Figure 29. Application du critère d’édition (maximum de distorsion < 5) sur un point de tir (profil 24b, tir 1554) ; figure de gauche : valeur maximum de distorsion par trace (en vert le seuil fixé à 5 ; en rouge les traces éditées) ; figure de droite : point de tir édité (à comparer avec le point de tir sans édition de la figure précédente). 34

Figure 30. Résultat d'édition sur une portion des tirs du profil 24b à l'aide du seuil de distorsion fixé à 5. En noir les traces éditées. Sur l'ensemble du profil, 1.61% des traces sont éditées. Les traces au niveau des contrôleurs d'immersion apparaissent les plus bruitées (jusqu'à 79.6 % des tirs édités pour la trace 285 de ce profil)..... 35

Figure 31. Illustration de l'édition des traces présentant des défauts électroniques par la méthode de critère de seuil sur l'attribut distorsion ; profil 27, trace 94. 36

Figure 32. Pourcentage d'édition (critère de distorsion maximum) par trace sur l'ensemble des profils HR ; les croix rouges indiquent les positions des contrôleurs d'immersion. 37

Figure 33. Pourcentage d'édition (critère de distorsion maximum) par profil HR 37

Figure 34. Exemple d'analyse spectrale des 480 traces (profil 36, tir 750) montrant en noir la fréquence de coupure associée à l'interférence avec le réfléchi surface, comme un instantané du profil d'immersion du streamer. La fréquence de coupure varie entre 300 et 450 Hz, correspondant à une gamme d'immersion de 1.7 à 2.5 m tout le long du streamer. Angle d'incidence maximum sur le fond de l'eau de l'ordre de 42° pour la trace 480 de ce tir. 38

Figure 35. Contenu fréquentiel en fonction de l'angle d'incidence – Profil HR 41 – Analyse spectrale à partir du fond de l'eau sur une fenêtre de 250 ms pour 4 traces. Spectres moyens calculés sur 500 tirs (2400-2900) pour lesquels le fond de l'eau est plat (bathymétrie ≈730m), correspondant à des angles d'incidence de 4°, 15°, 30° et 45°. 39

Figure 36. Modélisation de la fréquence de coupure due à l'interférence avec le réfléchi surface du récepteur (ghost) pour une bathymétrie de 730 m, une immersion streamer de 2 m, et des offsets variant de 75 à 3070 m (480 traces @ 6.25 m), correspondant aux paramètres de la figure précédente. Les points bleus correspondent aux traces (6, 51, 122, 220)..... 39

Figure 37. Signature sismique estimée à partir de la réflexion fond de l'eau – Profil HR 41 – Moyenne calculée sur 500 tirs pour lesquels le fond de l'eau est plat, correspondant à des angles d'incidence de 4°, 15°, 30° et 45°. Filtre passe-bande appliqué : 25-400 Hz, correction de divergence sphérique appliquée..... 40

Figure 38. Exemple de pointé de vitesse RMS sur les données de sismique HR. Comparaison entre les données de la campagne GHASS (2015, streamer de 600 m) et celles de la campagne GHASS2 (2021, streamer de 3000 m) sur le même point géographique sur la zone de la crête. Figure de gauche : collection CMP et panneau de semblance profil 34a (GHASS) ; figure centrale : collection CMP et panneau de semblance profil 23 (GHASS2) ; figure de droite : comparaison des vitesse d'intervalle issues des deux lois V_{rms} pointées..... 42

Figure 39. Illustration du décalage en fréquence lié à la correction NMO (étirement du signal pour les grands offsets) – profil 41 – tirs 2400-2900 – traces 6, 122 et 220 correspondant à des incidences sur le fond de l'eau de respectivement 4°, 30° et 45°. Figures de gauche : sections récepteur commun ; figures centrales : sections après correction NMO ; figures de droite : spectres moyens calculés sur les sections après correction NMO (F_c = fréquence centrale)..... 43

Figure 40. Comparaison de sections migrées post-stack, profil 23. Graphes du haut : sommation limitée à 96 traces ; à gauche avec le premier modèle de vitesse RMS pointé rapidement, à droite après pointé fin ; on ne note pas d'impact des variations fines du modèle de vitesse sur l'imagerie. Graphes du bas : sommation des 480 traces, avec un mute anti-stretch fixé à 150% à droite et 116% à gauche ; on note une dégradation de la résolution en appliquant un mute pas suffisamment restrictif..... 44

Figure 41. Paramètres de migration (Promax) appliqués sur les sections sommées HR..... 45

Figure 42. Exemple de modèles de vitesse d'intervalle (m/s) issus du pointé de vitesse RMS sur la sismique HR. Profil 23. Figure du haut : analyse rapide à pas de 500-1000 m ; figure du bas : analyse « fine » à pas de 250 m. 46

Figure 43. Ecart en distance entre la position du point de référence navire ECOS (intégration temps réel) et le GPS « brut » traité en temps différé : en bleu l'écart moyen, en rouge l'écart maximal. L'écart maximal conséquent pour le profil 46 est la conséquence du test de câblage ayant entraîné un arrêt ponctuel du rafraichissement du message GPS « brut »..... 47

Figure 44. Distance (en m) entre le point de référence navire et la bouée de queue traités en temps différé. En bleu, moyenne, en rouge écart-type (variations liées en partie à la dérive du streamer et aux girations). On peut noter le changement de géométrie entre les profils 43 et 44 avec l'ajout d'une dizaine de mètres de câble de tête du streamer (lead-in). 48

Figure 45. Distance (en m) entre le point de référence navire et la position GPS « brute » de la source SIS1. En bleu, la moyenne, en rouge la plage de variations valeurs entre les minimum et maximum (variations liées en partie aux girations). On peut noter les écarts plus conséquents pour le profil 46 dus aux sauts du GPS source. 49

Figure 46. Ecart en distance entre le point de référence navire et la position ECOS (figure du haut), la position GPS source (figure du centre), et la position GPS de la bouée de queue (figure du bas) calculés pour le profil 46. On peut noter les problèmes de rafraichissement du message GPS navire et les sauts importants du GPS source..... 49

Figure 47. Comparaison entre la position source donnée par le GPS et la position source estimée par projection derrière le navire. A gauche : écart en X soit latéralement (perpendiculairement à l'avancée du navire). A droite : écart en Y soit longitudinalement (dans l'axe du navire). En bleu : écart moyen ; en noir : écart maximal ; en rouge : écart-type sur l'écart. 50

Figure 48. Comparaison entre positions GPS source et positions source obtenues par projection de la longueur filée du câble source derrière le navire pour le profil 46. Les tirs 600 à 1250 pour lesquels la position GPS source n'est pas utilisable ont été exclus. En haut : écart total ; au centre : écart longitudinal ; en bas : écart latéral. 50

Figure 49. Ecart type sur le bruit des mesures compas magnétiques des contrôleurs d'immersion. Figure du haut : moyenne par profil sur les 21 contrôleurs d'immersion. On peut noter le profil 43 plus bruyé, particulièrement en queue de flûte. 51

Figure 50. Profil 43, caps avions après édition manuelle (à gauche) et après filtrage 2D Savitzky-Golay (à droite). La courbe du haut représente les variations du cap gyrocompas du navire. 51

Figure 51. Profil051 - Comparaison des temps d'arrivée directes pointés (point rouge) et calculés à partir de la géométrie d'acquisition (croix bleue). A gauche : avant correction de la géométrie. A droite : après prise en compte de la géométrie corrigée (réduction de la longueur du câble lead-in du streamer). Amplitudes normalisées. 53

Figure 52. Statistiques par profil sur l'étalement latéral des CMPs (XCMPs – Xcentre bin). Points bleus : moyenne (taille du point fonction du nombre de bins, i.e. de la longueur du profil) ; barre rouge : écart type ; barre mauve : [minimum maximum] ; point noir : maximum..... 54

Figure 53. Illustration de l'étalement latéral des CMPs (prise en compte des 960 traces) le long du profil 49. 54

Figure 54. Couverture théorique sur les bins de 25 m - moyenne par profil en fonction de la limitation de l'étalement latéral. Le profil 47 est marqué par une dérive du streamer très faible d'où une couverture qui reste élevée (>400) même pour une limitation de l'étalement à 25 m. 55

Figure 55. Couverture nominale (sismique SIS1, 960 traces, bin de 25 m) moyenne par profil en fonction de la vitesse fond moyenne. 55

Figure 56. Exemple de trace présentant un défaut (discontinuité du signal brut), profil 48, trace 285, tir 287. La figure du bas représente la valeur absolue de la dérivée de la trace. Les courbes rouges correspondent au signal filtré passe-bas (10 Hz). Sur le graphe du bas, les variations d'amplitude liées aux réflexions et à la discontinuité sont du même ordre de grandeur avant filtre. Après filtre passe bas, seul le défaut lié à la discontinuité du signal reste prépondérant. ... 57

Figure 57. Pourcentage d'édition (critère de distorsion maximum) par trace sur l'ensemble des profils SIS1 ; les croix rouges indiquent les positions des contrôleurs d'immersion..... 58

Figure 58. Pourcentage d'édition (critère de distorsion maximum) par profil SIS1 58

Figure 59. Résultat d'édition sur une portion des tirs du profil 43 à l'aide du seuil de distorsion fixé à 5. En noir, les traces éditées. Graphe du haut : pourcentage moyen par tir ; graphe de droite : pourcentage moyen par trace. Sur l'ensemble du profil, 17.5% des traces sont éditées. Les traces au niveau des contrôleurs d'immersion apparaissent les plus bruitées (jusqu'à 71 % des tirs édités pour la trace 912 de ce profil). 59

Figure 60. Illustration de l'édition des traces par la méthode de critère de seuil sur l'attribut distorsion ; profil 43, trace 40 ; figure de gauche sans édition ; figure de droite après édition ; les traces éditées sont mises à zéro. 59

Figure 61. Illustration du gain obtenu en imagerie avec édition des traces bruitées : exemple du profil SIS1 n°43 ; sommation des 960 traces (binning à 25 m, mute anti-stretch fixé à 150 %) et migration à l'aide du modèle de vitesse RMS pointé. Figure de droite : sans édition ; figure de gauche : avec édition des traces bruitées. Après migration, le bruit apparaît sous la forme d'hyperboles qui masquent les réflecteurs profonds de faible amplitude..... 60

Figure 62. Profil 44 Tirs 41-400 – Analyse spectrale à partir du fond de l'eau sur une fenêtre de 250 ms pour les traces 1, 50, 116 et 235 montrant en noir la fréquence de coupure associée à l'interférence avec le réfléchi surface, représentative des variations d'immersion des traces pour les tirs considérés. La fréquence de coupure est globalement située autour de 150 Hz ; valeur attendue pour une immersion de 5 m, avec des variations très locales (10-20 tirs) comprises entre 120 et 250 Hz soit une gamme d'immersion de 3 à 6.25 m. Angle d'incidence maximum sur le fond de l'eau fonction de la trace considérée : de 2.5 à 34°. Trace 1 située 5 m derrière le 1^{er} avion, Trace 50 située entre les avions 2 et 3, Trace 116 située au niveau de l'avion 4, Trace 235 située entre les avions 6 et 7. Spectres calculés sur une portion du profil à fond plat..... 61

Figure 63. Profil 45 Tirs 1640-2901 – Analyse spectrale à partir du fond de l'eau sur une fenêtre de 250 ms pour les traces 1, 50, 116 et 235 montrant en noir la fréquence de coupure associée à l'interférence avec le réfléchi surface, représentative des variations d'immersion des traces pour les tirs considérés. La fréquence de coupure est très stable autour de 150 Hz ; valeur attendue pour une immersion de 50 m. Angle d'incidence maximum sur le fond de l'eau fonction de la trace considérée : de 2 à 26°. Trace 1 située 5 m derrière le 1^{er} avion, Trace 50 située entre les avions 2 et 3, Trace 116 située au niveau de l'avion 4, Trace 235 située entre les avions 6 et 7. Spectres calculés sur une portion du profil à fond plat. 62

Figure 64. Signatures sismiques estimées à partir de la réflexion fond de l'eau – Profil SIS1 n°46 – Moyenne calculée par trace (6, 132, 303, 538) sur 280 tirs pour lesquels le fond de l'eau est plat, correspondant à des angles d'incidence de 2°, 15°, 30° et 45°. Filtre passe-bande appliqué : 5-300 Hz, correction de divergence sphérique appliquée. 63

Figure 65. Profil SIS1 n°46 – Analyse spectrale à partir du fond de l'eau sur une fenêtre de 500 ms. Moyenne calculée par trace (6, 132, 303, 538) sur 280 tirs (190-470) pour lesquels le fond de l'eau est plat (≈1720 m de bathymétrie), correspondant à des angles d'incidence de 2°, 15°, 30° et 45°. Filtre passe-bande appliqué : 5-300 Hz, correction de divergence sphérique appliquée.. 64

Figure 66. Modélisation de la fréquence de coupure due à l'interférence avec le réfléchi surface du récepteur (ghost) pour une bathymétrie de 1720 m, une immersion streamer de 5 m, et des offsets variant de 100 à 6094 m (960 traces @ 6.25 m), correspondant aux paramètres de la figure précédente. Les points bleus correspondent aux traces (6, 132, 303, 538) 64

Figure 67. Exemple de pointé de vitesse RMS sur les données de sismique SIS1 BF et HR. Comparaison entre les données HR de la campagne GHASS2 (streamer de 3000 m, fréquence centrale de 150 Hz) et les données SIS1 BF GHASS2 (streamer de 6000 m, fréquence centrale de

55 Hz) sur le même point géographique (zone de la crête). Figure de gauche : collection CMP et panneau de semblance extraits du profil HR n°23 ; figure centrale : collection CMP (zoom sur les 480 premières traces) et panneau de semblance extraits du BF n°50 ; figure de droite : comparaison des vitesses d'intervalle issues des deux lois Vrms pointées sur les semblances. 66

Figure 68. Paramètres de migration (Promax) appliqués sur les sections sommées de sismique BF 67

Figure 69. Test d'imagerie sismique SIS1 avec ré-échantillonnage des traces (figure de droite, 480 traces @12.5m et 2ms) et sans (figure de gauche, 960 traces @6.25 m et 1 ms). Portion du profil SIS1 n°50 ; séquence d'imagerie identique : binning à 25 m, sommation avec un modèle de vitesse RMS identique et mute anti-stretch de 150%, migration temps post-stack. Le ré-échantillonnage des traces n'affecte pas le résultat de l'imagerie..... 69

Figure 70. Exemple de test anti-multiple avec la méthode SRME sur une portion du profil SIS1 n°50. Sections sommées et migrées après analyse de vitesse RMS ; bin de 25 m ; les données ont été ré-échantillonnées au préalable. Figure de gauche : sans traitement SRME ; figure de droite : après soustraction du modèle de multiple. 70

Figure 71. Comparaison des sections traitées sur le profil 050 (vue partielle) avec traitement anti-multiple SRME (figure du bas) et sans (figure du haut). Séquence d'imagerie identique : données ré-échantillonnées (2ms, 480 traces @12.5 m), modèle de vitesse RMS identique, NMO (anti-stretch 150%), migration de Kirchhoff en temps. 71

Figure 72. Section sismique HR n°23 (GHASS2), sommation et migration post-stack temps. Surimposition du modèle de vitesse d'intervalle issu de l'analyse VRMS à pas de 250 m 77

Figure 73. Section sismique SIS1 BF n°50 (GHASS2), sommation et migration post-stack temps. Surimposition du modèle de vitesse d'intervalle issu de l'analyse VRMS à pas de 500 m 78

Figure 74. Comparaison des sections traitées HR (profil 23 à gauche) et BF (profil 50 à droite) de la campagne GHASS2 au niveau de la zone de la crête. Traitement anti-multiple (SRME) appliqué à la section BF. Application dans les deux cas d'un gain de type AGC. 79

Figure 75. Au centre, modèles de vitesse d'intervalle déterminés pour deux profils BF se recoupant (profils 46 et 50). Figure du haut : localisation des deux profils (bathymétrie GHASS1+GHASS2, traitement GEOOCEAN/ANTIPOD). Figure de droite : logs des vitesses d'intervalle au point de croisement des deux profils..... 80

Tableau 1. Liste des profils de sismique Haute Résolution acquis pendant le leg1 de la campagne GHASS2 (N/O Pourquoi Pas ?) 13

Tableau 2. Liste des profils de sismique SIS1 480 ci acquis pendant le leg1 de la campagne GHASS2 (N/O Pourquoi Pas ?)..... 19

Tableau 3. Liste des profils de sismique HR analysés (vitesse RMS) à pas de 250 m 45

Tableau 4. Liste des profils HR traités et information sur le pas d'analyse des vitesses RMS 72

Tableau 5. Liste des profils SIS1 traités 74