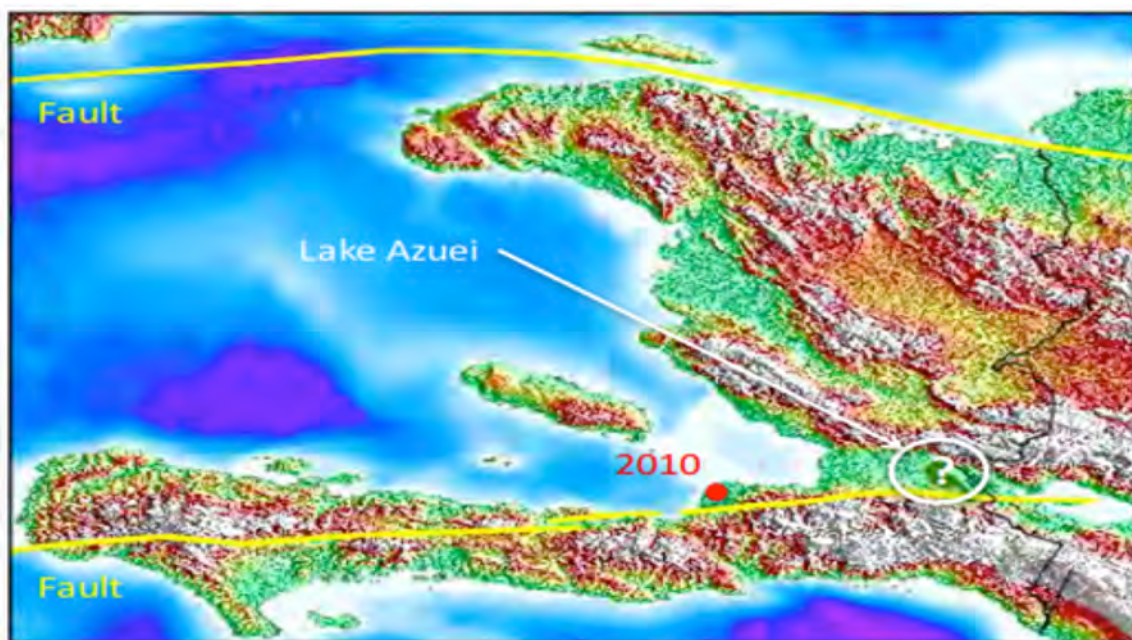


Master en géosciences appliquées aux géorisques

Rapport de stage de fin d'études

UNE CAMPAGNE DE SISMIQUE REFLEXION MULTITRACE SUR LE LAC AZUEI (HAÏTI) REVELE UN SYSTEME COMPLEXE DE STRUCTURES TRANSPRESSIVES ACTIVES LE LONG DE LA FRONTIERE DE PLAQUE NORD-AMERICAINE - CARAÏBE



Étudiant :

Nestor CHARLES

Encadrant:

Marie-Hélène CORMIER

Associate marine research scientist, Graduate
School of Oceanography, University of Rhode
Island



○ Remerciements

Ce stage de formation de trois mois à l'université de Rhode Island a été pour moi l'occasion de travailler pour la première fois sur un projet de recherche scientifique, surtout sur l'analyse et l'interprétation des données. Cette expérience extraordinaire n'aurait été possible sans la motivation et le soutien de certaines personnes que je tiens à remercier ici.

Je tiens en premier lieu à remercier mon tuteur de stage, Dr Marie-Hélène CORMIER non seulement pour avoir rendu ce stage possible mais aussi pour du temps que vous m'avez consacré et des conseils que vous m'avez prodigués.

Un grand merci également au professeur DOMINIQUE Boisson le responsable du programme de master qui a tous fait de son côté pour la réussite de ce stage.

La réussite de ce stage doit beaucoup aux supports, que dans l'analyse des données qu'aux interprétations des résultats, du Dr Christopher SORLIEN à qui j'adresse un grand merci.

Merci à toute l'équipe qui a contribué aux collectes des données lors de la campagne dans la Lac Azuei en 2017 : Heather Sloan, Nigel J Watrus, Kelly Guerrier, Casey K Hearn, John W King, Roberte Momplaisir, Steeve J Symithe, Sophia Marie Johanne Ulysse etc....

Ce stage a aussi été rendu possible grâce à la U.S. National Science Foundation qui a financé (transports, logement et nourritures) mon stage. Je voudrais également remercier les responsables du département d'océanographie de l'Université de Rhode Island en particulier les responsables du programme SURFO 2019 de m'avoir permis de réaliser ce stage dans de si bonnes conditions.

Merci aux développeurs de ces logiciels gratuits : OpendTect (<https://www.opendtect.org>) ; GMT (<https://www.soest.hawaii.edu/gmt/>) .Remerciement spécial a toute l'équipe Parallel Geoscience (SPW) qui a gracieusement accepté de convertir nos données de sismique réflexion multitrace en un projet de démonstration.

Enfin, ce stage n'aurait été possible sans le soutien de ma famille, de mes parents et de mes amis.

Merci !



○ Résumé

Les études menées à la suite du séisme M7.0 en 2010 à Haïti révèlent que la Faille Enriquillo Plantain-Garden (EPGFZ), l'une de deux failles senestres subparallèles marquant la frontière entre les Plaques Nord-Américaine et Caraïbe, correspond de fait à un système complexe de failles. Le lac Azuei, situé à 60 km à l'est de l'épicentre de 2010, s'étend sur environ 20 km dans une direction NO-SE, une orientation approximativement perpendiculaire à la direction de la convergence oblique le long de cette frontière de plaque. Deux modèles différents ont été proposés pour l'évolution de la géométrie de l'EPGFZ à l'est de l'épicentre du séisme de 2010. Le premier modèle propose que la rive sud du lac corresponde à deux failles parallèles, comprenant une faille purement décrochante (EPGFZ) ainsi qu'une faille de chevauchement (Faille de Jimani) avec un faible pendage vers le nord (Wang et al., 2018). Le deuxième modèle est étayé par trois études indépendantes et suggère que l'EPGFZ évolue d'un simple cisaillement à 30 km à l'ouest du lac vers une faille avec glissement oblique et à pendage vers le sud le long de la rive sud du lac. Ces autres études incluent la cartographie sur le terrain des failles inverses et des plis entre le lac et l'épicentre du séisme de 2010 (Saint Fleur et al., 2015 ; Saint Fleur et al., 2019), la modélisation des déformations en cours détectées par surveillance GPS (Symithe & Calais, 2016), et l'analyse de sismicité et des structures de vitesse sismique profonde (Possee et al., 2019). En 2017, 220 km de données de sismique réflexion multitrace (MCS) ont été acquises selon un quadrillage espacé de 1,2 km, avec une pénétration pouvant atteindre 300 m sous le fond du lac. Ces données révèlent une zone tectoniquement active de 1 à 2 km de large, de direction E-O à proximité de la rive sud du lac. Nous proposons que cette zone reflète l'activité d'une faille à glissement oblique à pendage vers le Sud sous le Massif de la Selle (modèle 2) plutôt que celui d'un système de faille décrochante senestre (modèle 1). En conformité avec cette interprétation, les données de profil de CHIRP acquises en même temps que les profils MCS, ne montrent aucune preuve de décalage stratigraphique ; au contraire, ils révèlent une série de plis qui déforme les turbidites les plus récentes. En particulier, un ensemble de plis en échelon s'aligne parallèlement à la rive sud du lac, avec une direction E-O au lieu de ONO-ESE, comme on pourrait s'y attendre dans le cas d'une faille coulissante senestre d'orientation EO. Les profils MCS révèlent également un large pli monoclinal de direction



nord-ouest s'étendant sur au moins 10 km dans la partie ouest du lac. Nous proposons que ce pli monoclinial reflète la présence d'une faille inverse « aveugle », avec pendage vers le S-O. L'augmentation progressive du pendage des horizons sismiques avec la profondeur indique que cette structure a été continuellement active pour au moins la durée nécessaire à la déposition de 300m de sédiments. Les profils CHIRP acquis à l'aplomb de ce pli monoclinique montrent qu'un jeune paléo-rivage est surélevé de 1-2 m, ainsi que des signes de liquéfaction. Ces deux observations pourraient être le résultat d'une rupture sismique sur la faille présumée inverse.

Mots clés : Haïti, Sismique réflexion multitraces, Tectonique active, Risque sismique,





Table des matières

○ Remerciements	0
○ Résumé	2
○ Introduction	97
○ Première partie : Contexte géomorphologique et tectonique de la zone d'étude	1311
• Contexte géomorphologique de la zone	1311
• Contexte tectonique de la zone	1412
○ Deuxième partie : Collecte et traitement des Données	1816
• Présentation des données	1816
• Collecte des données de sismiques réflexions multitraces	1917
• Traitement des données de sismiques réflexions multitrace	2018
Conversion du format des données MCS (SEG-Y) en format SPW	2220
Pré- traitements	2321
Filtrage	2422
Collection en Point Milieu Commun (« CMP », Common Mid-Point gather)	2522
Semblance	2623
Analyse de vitesse	2624
Correction dynamique (en anglais, "Normal Move-Out" correction, NMO)	2725
Somme des traces (en anglais, Stacking)	2826
Migration	2926
○ Troisième partie : Résultats et Discussions	3028
• Résultats	3230
• Interprétations et Discussions	3533
○ Conclusion	3836
○ Recommandations	4038
○ Références	4240
○ Annexe	4845



Figure 1.1 : En grand plan, la carte de la sismicité mondiale. Les épicentres sont issus du catalogue de l'United States Geological Survey, pour la période 1973 - 2008 et pour les séismes de magnitude supérieure à 5 et en bas à droite la carte de l'île Hispaniola (Mercier de Lepinay, 2010). Les traits pleins en rouge marquent les deux systèmes de failles senestres, le trait en plein en rouge avec les petits triangles marquent une zone de chevauchement, et les étoiles en rouges marquent quelques seimes historiques. _____ 10

Figure 1.2 : Le modèle proposé par Wang et al. (2018) pour l'EPGF au niveau de la Plaine du Cul de Sac. Suivant ce modèle, l'EPGF reste une faille de cisaillement pure couplée avec une autre faille inverse de pendage vers le nord (Faille Jimani) _____ 11

Figure 1.3: Le modèle proposé par Saint Fleur et al. (2015) pour l'EPGF au niveau de la Plaine du Cul de Sac. Suivant ce modèle, étayé par deux autres études indépendantes, il existerait une faille unique de glissement oblique à faible pendage vers le Sud (sous le Massif de la Selle). _____ 11

Figure 2.1 : La zone du Bassin versant de la plaine du Cul de Sac avec ces deux trous d'eaux et ces rivières. ____ 13

Figure 2. 2: Coupe lithologique dans la partie SSW-NNE d'Haïti. Les deux traits discontinus marquent les deux systèmes de failles senestres (EPGFZ et SOFZ) (d'après J. Corbeau) _____ 14

Figure 2.3 : Contexte tectonique de l'île Hispaniola avec ces deux grands systèmes de failles senestre et la Ceinture Trans-Haïtienne. Les flèches vertes indiquent les sens des déplacements sur les zones de failles. Les points oranges indiquent des séismes historique et l'étoile jaune indique la localité du séisme de 2010. Les chiffres en noirs indiquent la date des seimes et les chiffres en vert indiquent la valeur des vitesses de déplacements sur les failles (mm/an). Le rectangle en bas à droite indique la position de l'île Hispaniola par rapport aux plaques : GMP=Microplaque de Gonâve ; CAR= Plaque de caraïbe et NOAM= Plaque Nord-Américaine (d'après S. Leroy et al, 2015) _____ 16

Figure 2.4 : interprétation des plis mineurs dans la morphologie au niveau du bassin du Cul de Sac. L'EPGF est une faille de glissement verticale, associée à des plis de traînée mineurs en échelon (Mann et al., 1995) et accompagne d'une faille inverse à pendage N subparallèle à la faille EPG (Wang et al., 2018) _____ 17

Figure 2.5: interprétation des plis mineurs dans la morphologie au niveau du bassin du Cul de Sac. L'EPGF passe vers l'est en une faille à glissement oblique qui plonge vers le sud sous le Massif de la Selle (Saint Fleur et al., 2015 & 2019; Symithe & Calais, 2016 ; Possee et al., 2019) _____ 17

Figure 3.1 : Les profils de sismiques de réflexions multitraces acquis en 2017 (traits rouges). Les profils acquis par condition de vent fort étant de qualité médiocre, ils ont été acquis de nouveau ; ces secondes acquisitions sont montrées par des traits jaunes. Les numéros de profils sont indiqués en début de chaque profil. _____ 18

Figure 3.2 : Disposition des équipements d'acquisition des données de sismiques réflexions multitrace et de sonar « CHIRP » (Cormier et al 2017) _____ 20

Figure 3.3 : Schéma d'une opération de sismique réflexion multitrace (<https://www.researchgate.net>) _____ 20

Figure 3.4 : trajet de l'onde réfléchi entre la source et un récepteur _____ 21

Figure 3.5 : Les applications comportent le logiciel SPW (Seismic Processing Workshop) _____ 22

Figure 3.6 : Exemple de paramétrage de Seismic data reformat de I/O pour convertir le format SEG-Y du profil 501 en format SPW _____ 23

Figure 3.7 : Exemple de deux enregistrements par deux hydrophones (22 et 2) lors de collecte des données sur un même profil. On a un enregistrement avec beaucoup de bruits pour l'hydrophone 22 et une image avec moins de bruits pour l'hydrophone 2. _____ 24

Figure 3.8 : Ensemble (couple) sources et récepteurs qui imaginent un même point situé au milieu (CMP). ____ 25

Figure 3.9 : Calcul de stacking velocity pour le CMP 14817 pour le profil 802 _____ 27

Figure 3.10 : L'application de correction MNO pour rendre horizontale la trajectoire des réflexions _____ 28

Figure 4.1 : Carte de bathymétrie du fond du Lac Azuei compilée à partir des données de CHIRP acquises pour ce projet en 2017, ainsi que celle acquises en 2013 avec un "echosounder" (Moknatian et al., 2017) et en 2013 avec un CHIRP (Wang et al., 2018) _____ 30

Figure 4.2 : Carte montrant le temps aller-retour entre le fond du lac et le front de gaz, tel que mesure le long des profils CHIRP acquis en 2017 (Murray, 2018). Un front de gaz est détecté partout sauf dans la partie ouest du lac. _____ 31

- Figure 4.3 : Zone de déformation faiblement imagée sous le front de gaz dans la rive sud du Lac. L'image du profil de CHIRP 802 montre ces déformations affectent même les couches les plus jeunes. La forte réflexion à ~70 ms est le premier multiple du fond du lac, et est donc un artefact _____ 32
- Figure 4.4 : Large zone de déformation qui borde la rive sud du Lac. Les flèches blanches indiquent l'axe E-O d'une série de plis en échelon cartographiés par les données CHIRP (James et al., 2019 ; Cormier et al., 2019) 33
- Figure 4.5 : relation spatiale entre les profils sur la côte ouest du lac sur lesquels on observe le grand pli monoclinique. Les traits de couleurs différentes indiquent les horizons sismiques tracés avec OpendTect et corrélés de profil en profil, de rouge (le plus profond) à vert (le moins profond). _____ 34
- Figure 4.6 : Les horizons sismiques et la mise en évidence d'une faille verticale sur l'un des profils (402) sismique dans la partie ouest du Lac. _____ 34
- Figure 4.7 : les horizons sismiques numérisés sur le profil 201(non migre) situé dans la partie nord du lac. L'axe horizontal est annoté en mètre le long du profil. L'axe vertical indique le temps aller-retour en ms. Notez le pli aux environs de la distance 2800 m _____ 35
- Figure 4.8: Les points jaunes sur la carte indique la position d'un paléo-rivage détecté sur les profils CHIRP. Sa profondeur correspond en général avec le courbe de niveau de 11m (fin trait noir), sauf pour la partie ouest du lac. Le graphe montre les 91 relevés de profondeur de ce paléo-rivage ; l'axe horizontal correspond aux identifications faites en commençant au Nord du Lac et continuant dans le sens des aiguilles d'une montre (d'après Lucier, 2017 ; Sloan et al., 2017 ; Cormier et al., 2018). _____ 37



○ Introduction

Les séismes sont très fréquents, on en observe en effet chaque jour, et on en comptabilise jusqu'à environ cent milles par ans sur la surface de la terre. L'activité sismique n'est pas répartie de manière uniforme sur la surface terrestre ; en effet, les séismes sont surtout concentrés dans les régions qui séparent les plaques tectoniques. De ce fait, l'île Hispaniola étant située dans la frontière entre la plaque Nord-Américaine et Caraïbe est sujet à de grands séismes. La frontière entre ces deux plaques est très complexe, comprenant deux zones de failles décrochantes senestres d'orientation E-O (*figure_1.1*) : La faille Enriquillo Plantain Garden (EPGF) au sud d'Hispaniola, et la Faille Septentrionale-Orientale au nord

Le 12 janvier 2010, la capitale Port-au-Prince et ses zones avoisinantes ont été sévèrement frappées par un séisme de magnitude 7,1. Avec plus de 200 mille morts et environ 8 milliards dollars US de dégâts matériels [Calais et al., 2010], ce séisme est considéré comme l'un des événements naturels le plus meurtrier au monde. Vu la localisation de l'épicentre de ce séisme, on pensait initialement que c'était une section de l'EPGF qui avait relâchée une partie de son énergie élastique accumulée depuis quelques siècles. Cependant, les études qui ont été menées à la suite du séisme révèlent que le glissement a eu lieu sur une faille n'ayant pas de trace en surface (faille aveugle) que l'on appelle la faille de Léogane. La faille de Léogane est une faille inverse avec un pendage vers le nord [Calais et al., 2010 ; Mercier de Lepinay et al., 2011 ; Douilly et al., 2013]. Parce que ce séisme n'a pas eu lieu sur EPGF, il a de fait contribué à augmenter l'état de contrainte au niveau de l'EPGF [Symithe et al., 2013], ce qui entraîne une augmentation du niveau de risque que représente l'EPGF pour la population haïtienne.

De fait, les études effectuées après le séisme de 2010 révèlent que la faille Enriquillo Plantain Garden correspond à un système complexe de failles alors que celle-ci était considérée jusqu'alors comme étant une faille de cisaillement pure [Mann et al., 1995]. Si dans la partie ouest du pays cette zone de faille est très bien marquée dans la morphologie, son tracé est plus diffus à l'est de l'épicentre du séisme de 2010, là où elle intersecte le Bassin du Cul-de-Sac. Le séisme Mw7.0 du 12 janvier 2010 a mis en évidence une faille de chevauchement active (avec pendage vers le nord) qui est en contact direct avec l'EPGF



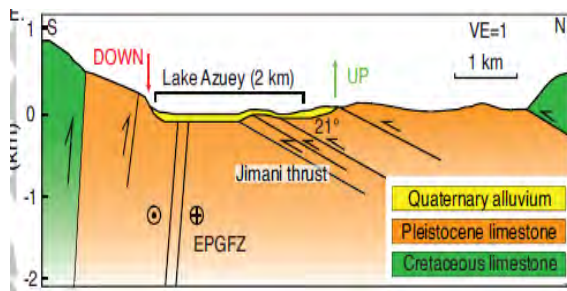


Figure 1.2 : Le modèle proposé par Wang et al. (2018) pour l'EPGF au niveau de la Plaine du Cul de Sac. Suivant ce modèle, l'EPGF reste une faille de cisaillement pure couplée avec une autre faille inverse de pendage vers le nord (Faille de Jimani)

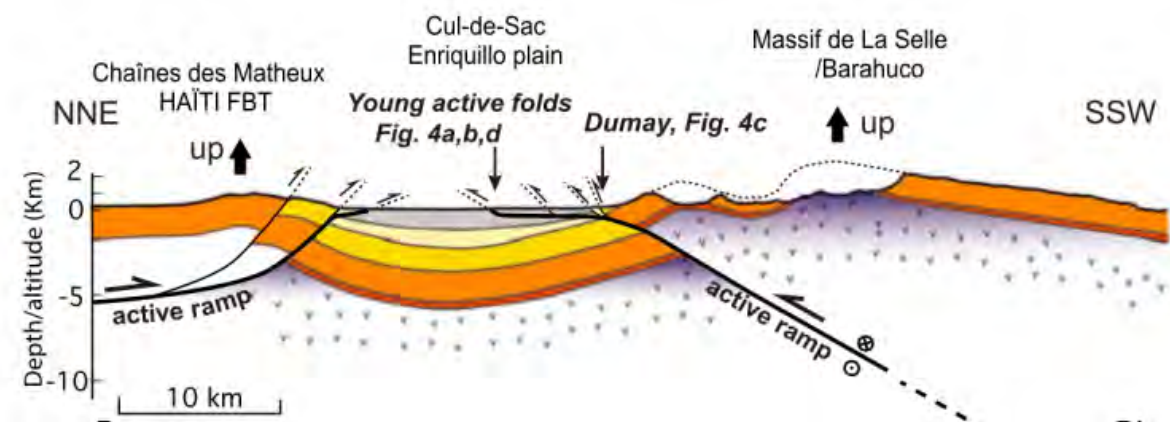


Figure 1.3: Le modèle proposé par Saint Fleur et al. (2015) pour l'EPGF au niveau de la Plaine du Cul de Sac. Suivant ce modèle, étayé par deux autres études indépendantes, il existerait une faille unique de glissement oblique à faible pendage vers le Sud (sous le Massif de la Selle).

En 2017, dans le cadre d'un projet qui consiste à développer une meilleure compréhension des structures tectoniques dans le Bassin du Cul-de-Sac, une campagne de collecte de données de sismique réflexion a été menée par une équipe constituée de chercheurs haïtiens et américains sur le Lac Azuéi. Au cours de cette campagne, ils ont collectés 12 km de profils de sismique monotraces, 220 km de profils de sismique de réflexion multitraces, 197 km de profils de sonar « CHIRP », et deux carottes sédimentaires (Cormier et al., 2017).

A partir de l'analyse et de l'interprétation des données de sismique de réflexion multitraces, je documente dans ce rapport plusieurs zones de déformations et/ou de

failles et discute les processus qui pourrait expliquer ces déformations. Ce document est organisé en quatre parties :

- Dans la première partie je présente brièvement le contexte géomorphologique et tectonique de la zone d'étude.
- Dans la deuxième partie je décris la procédure de collecte des données de sismique réflexion multitraces et la méthodologie de traitement utilisée
- dans la troisième partie je présente et discute les résultats
- et enfin, dans la quatrième partie je fais des recommandations pour des projets à venir



- **Première partie : Contexte géomorphologique et tectonique de la zone d'étude**

- **Contexte géomorphologique de la zone**

D'une superficie de 360 km² environ, le Bassin de la Plaine du Cul de Sac est borné au nord par la Chaîne des Matheux, au sud par le Massif de la Selle, à l'ouest par le Golfe de la Gonâve (Port-au-Prince) et à l'est par la frontière avec la République Dominicaine. Ce bassin est une zone de forte accumulation sédimentaire qui résulte de la convergence de nombreuses rivières et forme une structure encaissante qui renferme la plus grande nappe d'eau souterraine du pays (*figure 2.1*).

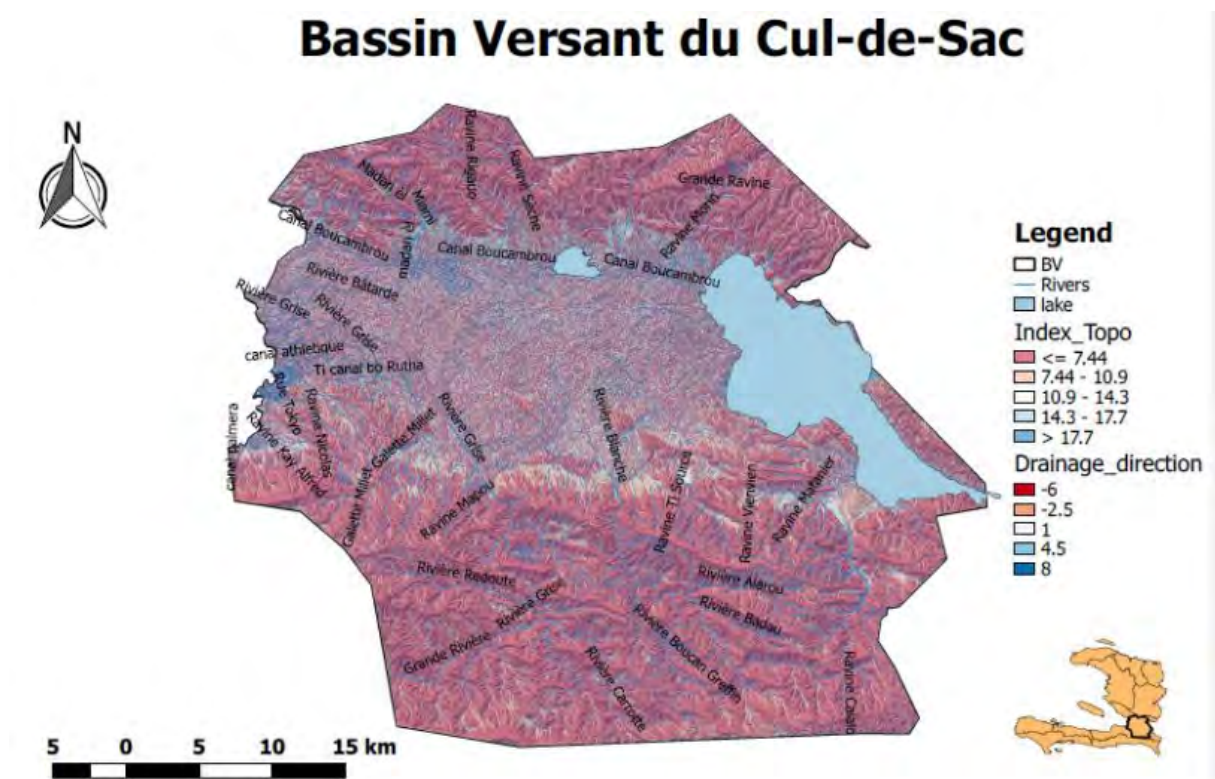


Figure 2.1 : La zone du Bassin versant de la plaine du Cul de Sac avec ces deux trous d’eaux et ces rivières.

Au niveau de la Plaine du Cul-de-Sac, à Haïti, également désigné par le terme de dépression du Cul-de-Sac (une dépression formée entre deux grands chevauchements) de direction est-ouest (*figure_2.2*), on retrouve deux points d'eau, le Lac Azuéli ou Étang Saumâtre, et le petit étang de Trou Caïman. Le Lac Azuei, situé à environ une trentaine de kilomètres à l'est de la capitale Port-au-Prince, a une superficie d'environ 170 km². Ce lac est alimenté par plusieurs cours d'eau, notamment par la rivière Blanche, et il est relié au lac de Trou Caïman par le Canal de Boucanbrou (*figure_2.1*). C'est un lac endoréique, n'ayant aucun drainage vers la mer ou un autre lac.

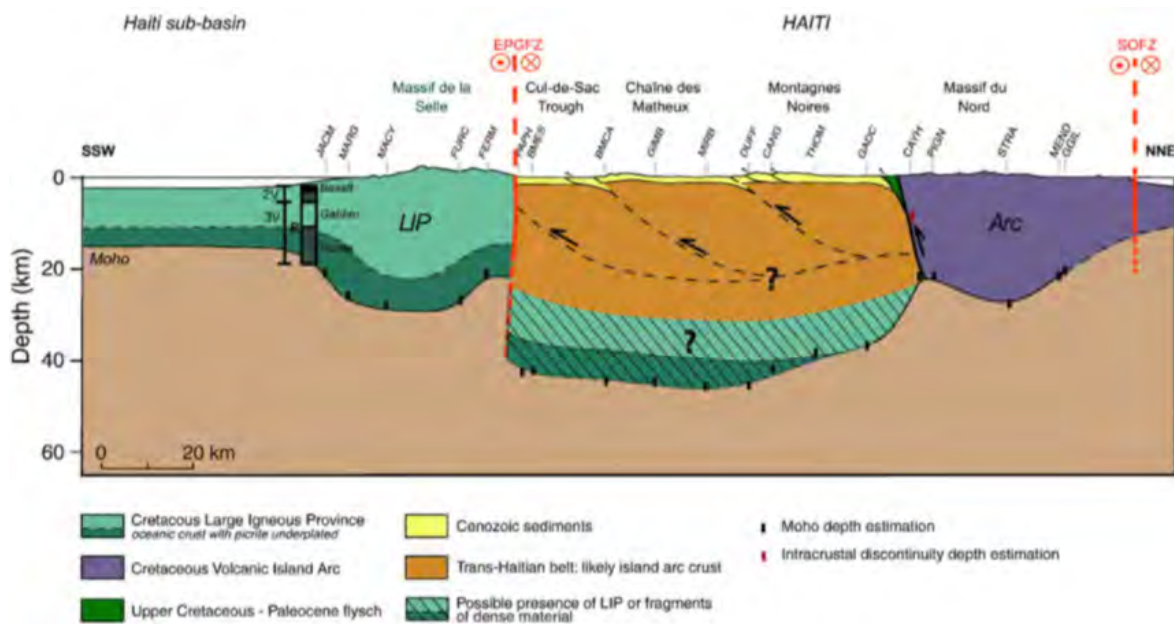


Figure 2. 2: Coupe lithologique dans la partie SSW-NNE d'Haïti. Les deux traits discontinus marquent les deux systèmes de failles senestres (EPGFZ et SOFZ) (d'après Corbeau)

- **Contexte tectonique de la zone**

L'île d'Hispaniola, constituée de la République Dominicaine à l'est et d'Haïti à l'ouest, est située sur la frontière entre la Plaque Caraïbe et la Plaque de l'Amérique du Nord. Ces deux plaques se déplacent de ~2cm/an de l'une par rapport à l'autre. Les déplacements entre ces deux plaques tectoniques génèrent des mouvements sismiques sur une large zone de déformation répartie entre les deux zones de failles actives, la faille septentrional (SOF) et la EPGF.

Pour tenir compte des déplacements horizontaux de ces deux systèmes de failles senestres on introduit la notion de la microplaque de Gonâve (Rosencranz & Mann, 1992) (figure 1.1). Cette microplaque s'étend de la Ride des Caïmans à l'ouest jusqu'au centre de l'île

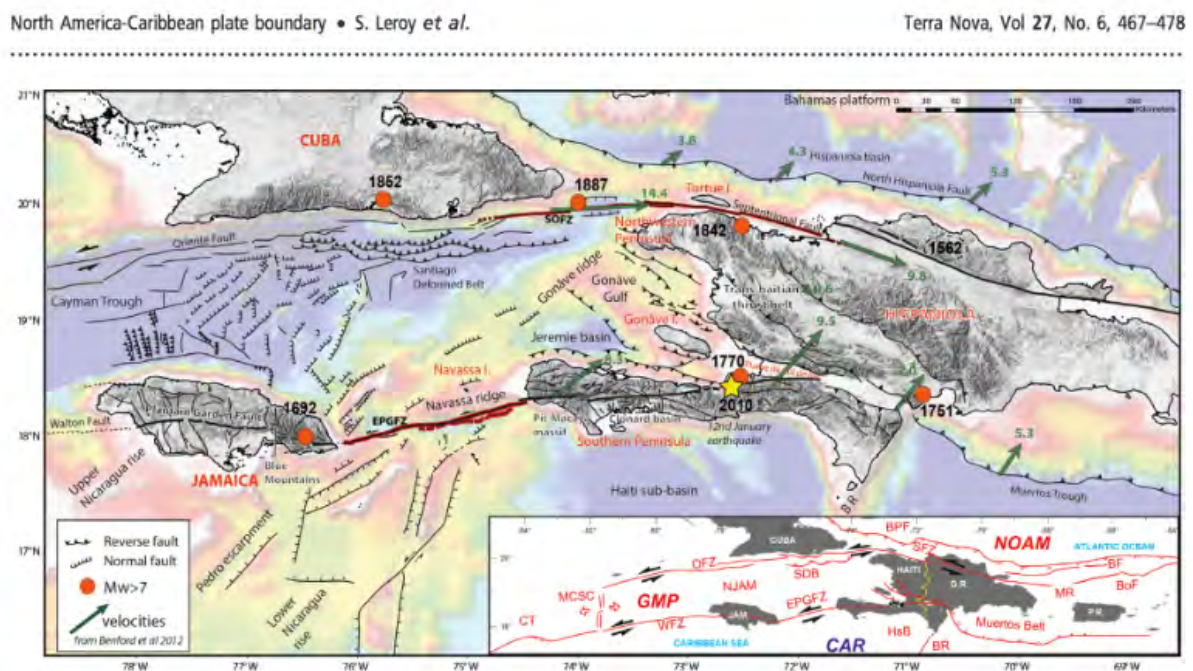
Hispaniola à l'est, où sa bordure orientale est diffuse et toujours mal définie. Elle est limitée au nord par la zone de Faille Septentrional-Orientale, au sud par une zone complexe de décrochement dans laquelle on retrouve de zone de Faille Enriquillo-Plantain Garden et à l'ouest par la Ride des Caïmans. L'existence de la microplaque de Gonâve a été confirmée par mesures GPS, qui montrent que le déplacement global entre les deux plaques principales (Nord-Américaine et Caraïbe) est divisé presque également entre les deux zones de failles transformantes qui délimitent la microplaque Gonâve.

La zone de Faille Septentrional-Orientale traverse la partie nord de la République Dominicaine, passe entre la ville du Cap Haïtien et l'Île de la Tortue et se prolonge à l'ouest au large de la côte sud de Cuba. C'est une faille décrochante senestre qui a été bien cartographiée au large [Calais & Mercier De Lépinay, 1995 ; Leroy et al., 2015 ; Rodríguez-Zurrutero et al., 2019] et qui accumule un déplacement latéral de $9(\pm 2)$ mm/an [Calais et al., 2008] (figure 1.3). Cette zone de faille a produit dans le passé plusieurs séismes majeurs (figure 1.2) par exemple celui de 1842 qui a détruit une bonne partie du grand nord du pays (Claude Prépetit, « Aléa et risque sismique en Haïti », BME).

La zone de faille Enriquillo-Plantain Garden, qu'on appelait autrefois « faille Petionville-Tiburón » [Duplan, 1975] ou encore « Décrochement Sénestre Sud Haïtien » [Calmus, 1983], est une faille décrochante sénestre [Mann et al, 1995] qui accumule un déplacement latéral de $6(\pm 2)$ mm/an [Calais et al. 2008 ; Symithe & Calais, 2016] (figure 2.3). Cette zone de faille traverse toute la presqu'île sud du pays et se prolonge vers l'est jusqu'à la République Dominicaine. Dans la région où son tracé est très bien marqué dans la morphologie, elle est sans doute définie comme étant une faille quasi verticale. Par exemple, dans la partie méridionale du pays où son tracé est à peu près linéaire avec des pompes et des tirants [Calmus, 1983 ; Momplaisir, 1986]. Néanmoins, là où son tracé n'est plus aussi bien défini, plusieurs failles semblent accommoder ensemble le mouvement de transpression. Comme pour la faille septentrionale-Orientale, cette zone de faille a produite plusieurs séismes majeurs dans le passé (Claude Prépetit, « Aléa et risque sismique en Haïti », BME), dont le plus récent est celui de 12 janvier 2010 qui est considéré comme le séisme le plus meurtrier (catastrophique) du nouveau monde.



Entre ces deux grands systèmes de failles senestres séparés d'environ 150 km, on retrouve un ensemble de plis et failles qui constituent ce qu'on appelle la Ceinture Trans-Haïtienne [Mann *et al.*, 1995 ; Symithe et Calais, 2016]. Cette ceinture est devenue active au Miocène / Pliocène, et définit la morphologie du territoire haïtien avec une série de montagnes et de vallées d'orientation généralement NO / SE [Pubellier *et al.*, 1991] et toute une série de failles de chevauchement d'orientation similaire - par exemple le système de Faille des Trois Baies dans le sud du pays [Momplaisir, 1986] (figure 2.3).



Au niveau de la Plaine de Cul-de-Sac, près de la zone de faille Enriquillo plantain Garden, on observe toute une série de plis mineurs dans la morphologie. Mann *et al.* (1995) et Wang *et al.* (2018) ont proposés que ces plis curvilignes en échelons indiquent le passage de l'EPGF et proposent que sa nature à l'est d'Haïti soit celle d'une faille transformante, un modèle qu'ils basent aussi sur les structures observées dans les profils sonar à haute fréquence (CHIRP) des lacs Azuei et Enriquillo (figure 2.4). Cependant, Saint Fleur *et al.* (2015) en utilisant des images satellitaires et la topographie LIDAR, proposent à la place que dans cette

zone, l'EPGF transitionne en une faille de glissement oblique avec pendage vers le sud. Dernièrement, *Symithe et Calais* (2016) en utilisant des données de GPS, ont également interprété ces plis comme des plis de propagations à l'avant d'une faille inverse avec pendage vers le sud sous le Massif de la Selle (figure 2.5), une faille qui combinerait un mouvement inverse de 9mm/an et un coulissement sénestre de 6mm/an.

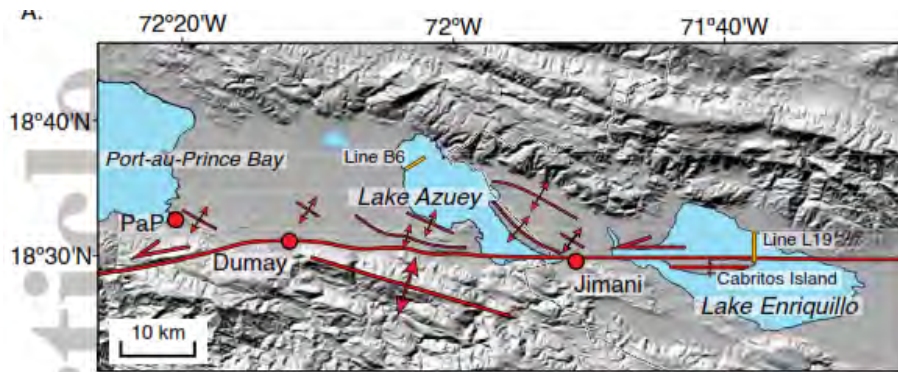


Figure 2.4 : interprétation des plis mineurs dans la morphologie au niveau du bassin du Cul de Sac. L'EPGF est une faille de glissement verticale, associée à des plis de traînée mineurs en échelon (*Mann et al.*, 1995) et accompagne d'une faille inverse à pendage N subparallèle à la faille EPG (*Wang et al.*, 2018)

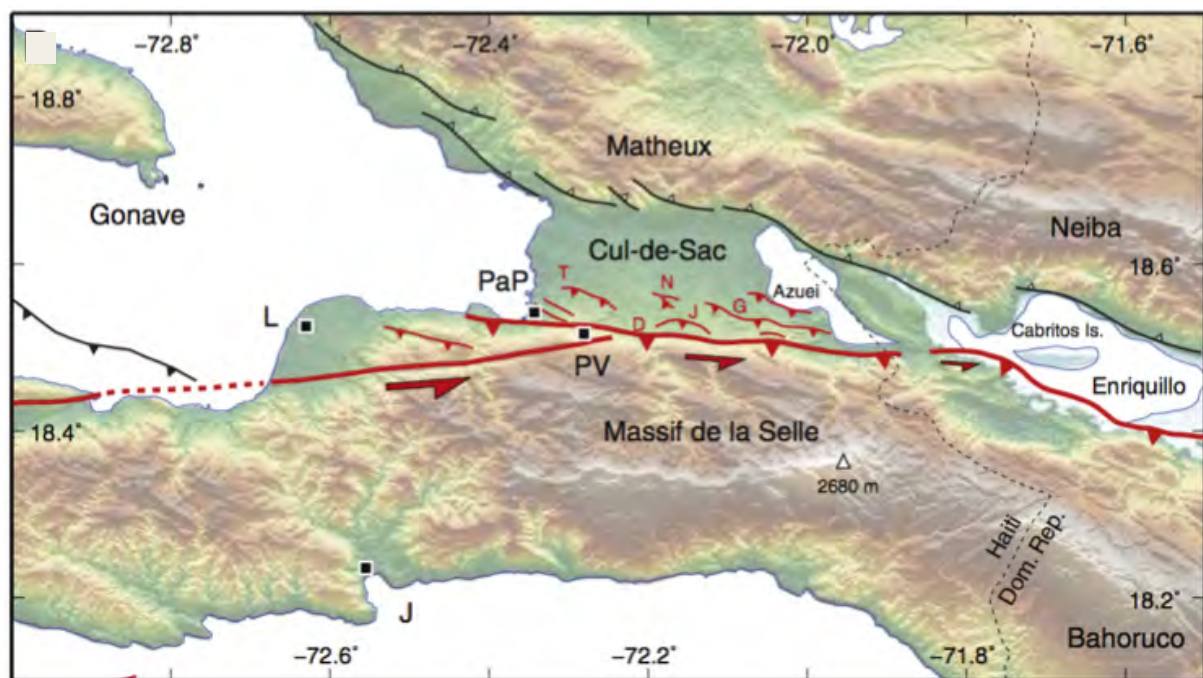


Figure 2.5: interprétation des plis mineurs dans la morphologie au niveau du bassin du Cul de Sac. L'EPGF passe vers l'est en une faille à glissement oblique qui plonge vers le sud sous le Massif de la Selle (*Saint Fleur et al.*, 2015 & 2019; *Symithe & Calais*, 2016 ; *Possee et al.*, 2019)

○ Deuxième partie : Collecte et traitement des Données

• Présentation des données

Les données de sismique réflexion multitrace qui m'ont été confiées proviennent d'une campagne de terrain qui a été menée, sur une période de deux semaines, par une équipe constituée de chercheurs de l'université d'état d'Haïti et des universités américaines. Tous les détails relatifs à l'acquisition des données durant cette campagne sont décrits dans un rapport disponible en ligne (Cormier et al., 2017). Ce projet avait pour objectif de mieux comprendre l'activité tectonique aux voisinages de la Faille Enriquillo Plantain-Garden dans le bassin de la Plaine du Cul-de-Sac.

Pendant cette campagne, 12 km de profils de sismique monotracer, 220 km de profil de sismique multitrace, et 197 km de profils de CHIRP, ont été acquis, et 3 carottes de sédiment ont été prélevées (figure 3.1.).

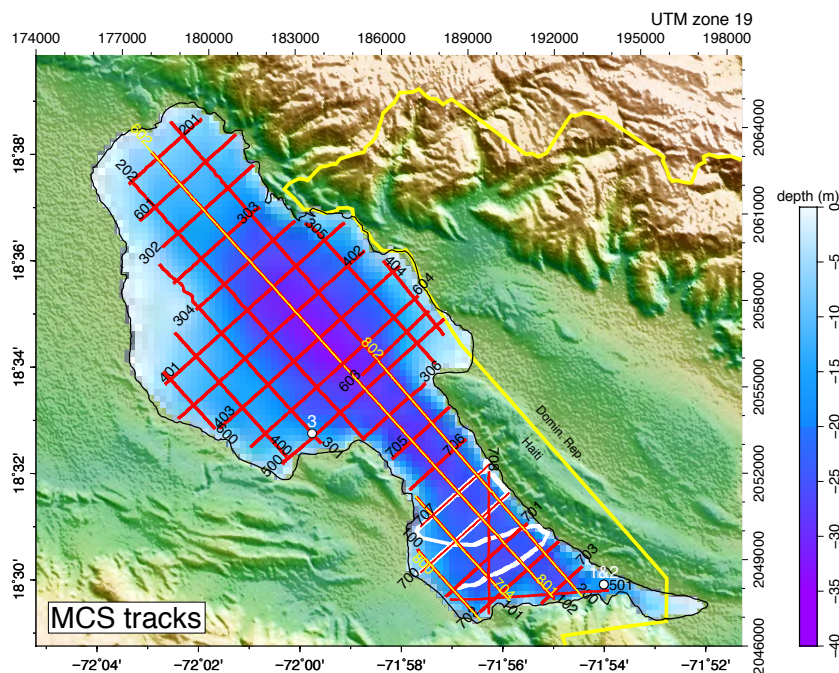


Figure 3.1 : Les profils de sismique réflexion multitrace acquis en 2017 (traits rouges). Les profils acquis par condition de vent fort étant de qualité médiocre, ils ont été acquis de nouveau; ces secondes acquisitions sont montrées par des traits jaunes. Les numéros de profils sont indiqués en début de chaque profil.

- **Collecte des données de sismique réflexion multitrace**

L'objectif de cette prospection sismique de haute résolution était d'obtenir des informations des caractères structuraux sous le lac grâce à l'étude de la propagation des ondes émises par une source sismique active. Pour y parvenir, les paramètres d'acquisitions doivent être choisis de manière judicieuse pour permettre de renforcer les réflexions et d'atténuer le bruit, améliorant ainsi la précision des résultats.

Pour cela, l'équipe a utilisé un bateau de 10 m et navigué à une vitesse variante entre 2.9 à 3.1 nœuds (1.45 à 1.55 m/s). La source sismique utilisée était un « Bubble-gun » maintenu à 0.9 m sous la surface du lac et tracté derrière le bateau. Cette source sismique émet un signal avec une bande de fréquence de 70 à 1900 Hz, un signal considéré de haute fréquence pour la méthode de sismique réflexion multitrace. Cette source sismique a émis un signal à intervalle de 1 seconde, laissant suffisamment de temps au front d'onde pour se propager dans plusieurs centaines de mètre d'épaisseur de sédiments sous le fond du lac, puis être réfléchi jusqu'au navire avant le prochain tir. Arrivée au fond du lac, une partie de l'onde est en effet réfléchi vers la surface, et l'autre partie est transmise dans le sous-sol (figure 3.3). Ce processus se répète à chaque fois que l'onde rencontre une interface entre des couches géologiques ayant des propriétés physiques (acoustiques) différentes. Ces ondes réfléchies sont ensuite captées en surface par une série de 24 hydrophones (avec une sensibilité aux ondes hydroacoustiques de 10 Hz à 10KHz). Ces hydrophones étaient espacés de 3.125 m et insérées dans un tube souple qu'on appelle une flute sismique. Cette flute sismique, longue de 75 m, était aussi tractée par le bateau et immergée à une profondeur de 90 cm, une profondeur maintenue plus ou moins constante le long de la flute sismique à l'aide des poids en plomb placés en différents points. Les hydrophones enregistrent le passage en temps et en amplitude des ondes réfléchies et la conversion de ces signaux hydroacoustiques en signaux électriques constituent les données de sismique multitrace. Le navire était équipé aussi d'une antenne GPS performante permettant d'enregistrer à tout moment la position du bateau, et donc de déterminer continuellement les positions de la source sismique et de chaque hydrophone (figure 3.2).

Pour mieux cadrer la zone d'étude en 3-dimensions, les profils de sismique multitrace ont été acquis dans la direction (NO-SE) parallèle à l'axe du lac, et dans la direction perpendiculaire à l'axe du lac (SO-SE), avec un espacement de 1.2 km. En plus de cette grille



régulière, des profils supplémentaires ont été acquis, tel que les profils 501, 603, 708 (figure 3.1).

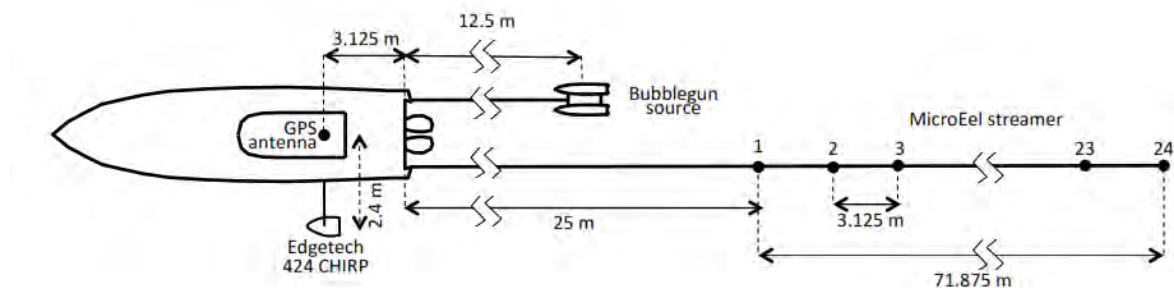


Figure 3.2 : Disposition des équipements d'acquisition des données de sismiques réflexions multitrace et de sonar « CHIRP » (Cormier et al 2017)

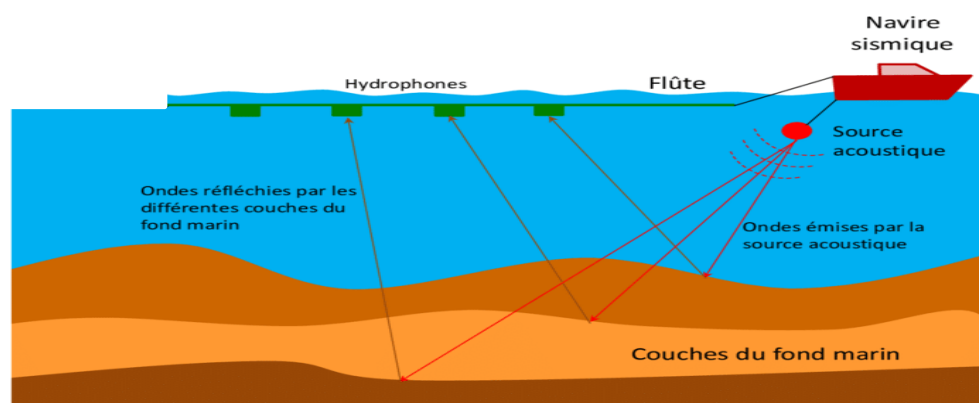


Figure 3.3 : Schéma d'une opération de sismique réflexion multitrace (<https://www.researchgate.net>)

- **Traitement des données de sismiques réflexions multitrace**

Le traitement des données sismiques multitraces (en anglais, MCS = MultiChannel Seismic) consiste à effectuer un ensemble d'étapes permettant d'extraire à partir des données brutes (c'est à dire, le signal enregistré par chacun des 24 hydrophones, et ce pour chaque tir de la source sismique) une image des structures géologiques présentes le long d'un profil. Au préalable, il est bon de décrire les équations gouvernant le temps aller-retour d'une onde sismique de réflexion. Le trajet de l'onde réfléchie entre la source et un récepteur (hydrophone), est une fonction hyperbolique de l'offset (la distance entre source et récepteur) (figure 3.4).

En effet, pour chaque trace, le temps aller-retour d'une onde réfléchie (t) satisfait l'équation suivante, qui est celle d'une hyperbole.

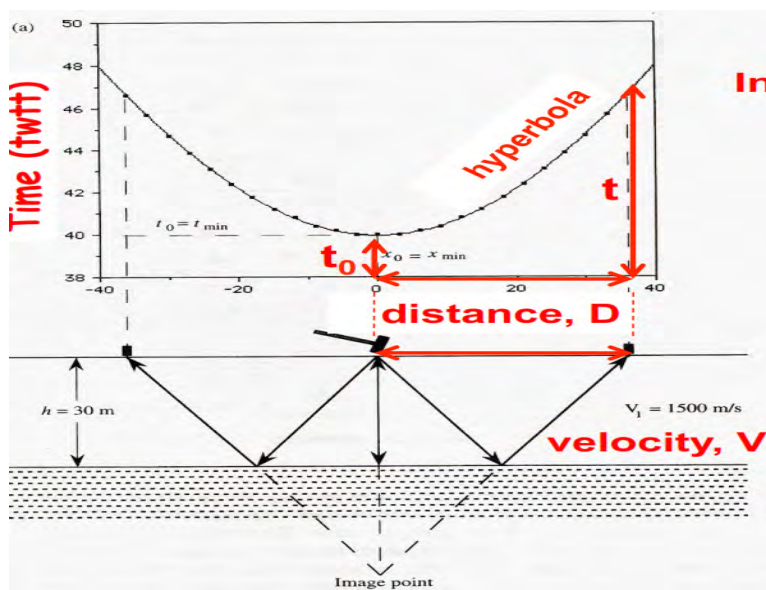


Figure 3.4 : trajet de l'onde réfléchie entre la source et un récepteur

$$t^2 = t_0^2 + \frac{D^2}{v_{rms}^2}$$

Avec : v_{rms} : vitesse moyenne quadratique (dans le cas d'une seule couche géologique d'épaisseur constante, v_{rms} est simplement la vitesse acoustique de cette couche)

t_0 : temps aller-retour de l'onde réfléchie à distance source-récepteur nulle ($D=0$) D : distance source/ récepteur

En pratique, dans le cas d'une onde qui est transmise au travers de plusieurs couches géologiques, puis finalement réfléchie par une couche profonde, l'équation devient trop compliquée pour être résolue paramétriquement et une approximation est faite, où V_{rms} correspond à la vitesse quadratique moyenne. Cette approximation est valide tant que les rayons sismiques sont proches de la verticale ($D/2 \ll H$). Bien que théoriquement cela ne soit pas vraiment le cas pour les couches qui sont peu profondes, dans la pratique, l'approximation marche bien quand même.

Pour notre traitement, nous avons utilisé le logiciel SPW (=Seismic Processing Workshop) écrit par Parallel Geoscience Corporation (parallelgeo.com/SPW). Le logiciel SPW est composé des applications suivantes : FlowChart (FC), SeisViewer (SV), I/O utility (IO), Velocity Calculator (VC), Job Manager (JM) (fig_2.5). Dans notre cas, on utilise que les trois premiers (FC, SV, IO) (fig_3.5).

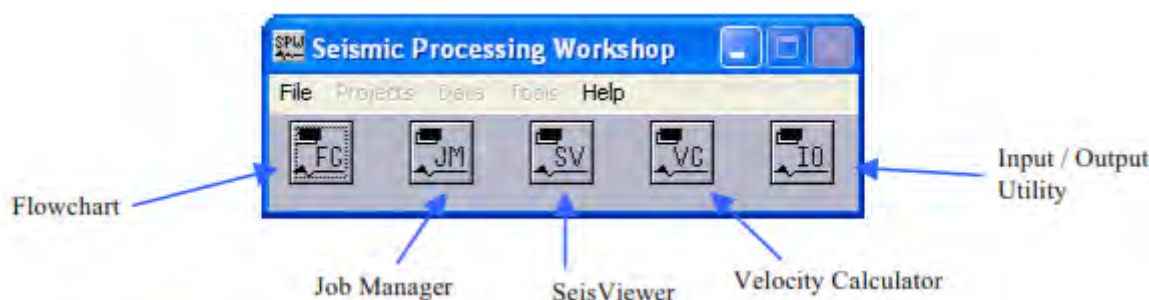


Figure 3.5 : Les applications comportent le logiciel SPW (Seismic Processing Workshop)

Ce logiciel est normalement accessible pour la recherche universitaire moyennant l'achat d'une License, mais Parallel Geoscience a gracieusement accepté de convertir les données MCS du Lac Azuei en un « projet de démonstration », de telle sorte que l'achat d'une License n'est plus nécessaire pour traiter des données liées à ce projet.

Conversion du format des données MCS (SEG-Y) en format SPW

Les données brutes de sismique multitrace collectées pendant la campagne de 2017 dans le lac ont été préalablement converties au format SEG-Y par le collaborateur Prof. Nigel Watrus, de l'Université du Minnesota. Ce format *SEG-Y* a été développé par la *Society of Exploration Geophysicists* (=SEG) et sert à stocker l'ensemble des données sismiques de façon efficace et universellement reconnue. Pour chaque profil, le fichier SEG-Y nous renseigne sur la navigation (c'est-à-dire les positions GPS du tir et de l'hydrophone pour chaque trace), la géométrie du dispositif déployé, mais aussi et surtout sur la réponse du sol

perçue par chaque hydrophone (c.à.d. les « traces » sismiques). L'amplitude de cette réponse est enregistrée sous forme de signaux électriques analogiques, numérisés à un pas d'échantillonnage défini lors de l'acquisition. Pour ce projet, l'échantillonnage a été fait à un intervalle de 0,25 ms, et le signal a été enregistré pendant 300 ms suivant chaque tir. Les fichiers SEG-Y contiennent aussi des informations relatives au nombre de traces enregistrées (24), au nombre d'échantillons par trace ou encore au délai entre l'émission du signal source et le début de l'enregistrement (offset), etc.. (Image en annexe des contenues d'un fichier SEG-Y)

Pour commencer avec le traitement des données, on utilise le programme I/O (Input/Output) du logiciel SPW pour convertir les fichiers de format SEG-Y en un format SPW qui est utilisé plus efficacement par ce logiciel (figure 3.6).

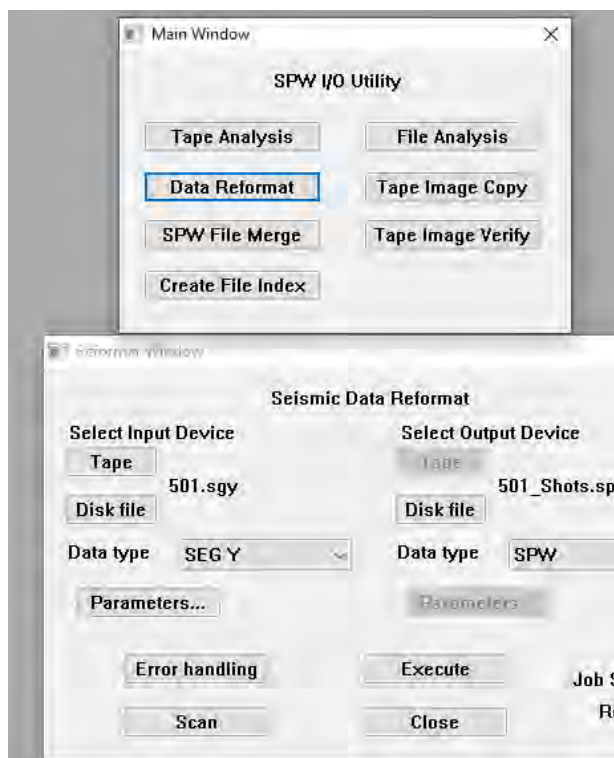
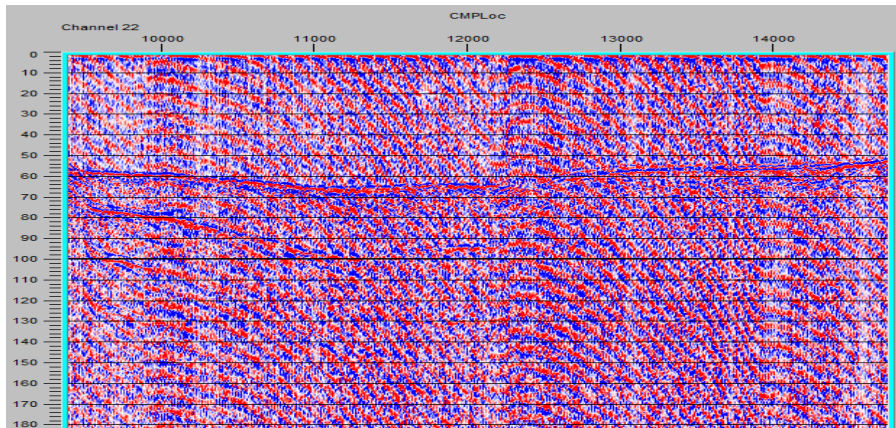


Figure 3.6 : Exemple de paramétrage de « Seismic data reformat » de I/O pour convertir le format SEG-Y du profil 501 en format SPW

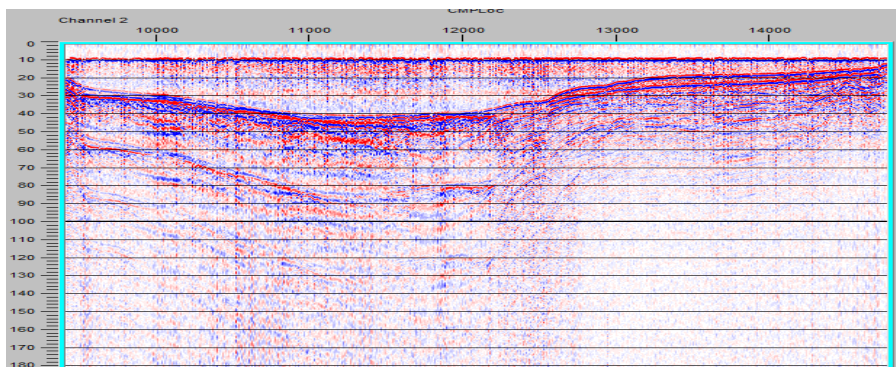
Pré- traitements

Après avoir terminé avec l'étape de conversion du fichier du format SEG-Y en format SPW, on visualise avec le programme SV (= Seismic Viewer) du logiciel SPW les traces sismiques enregistrées par les hydrophones, afin de déterminer, s'il y a lieu, les mauvaises traces d'enregistrements (c'est-à-dire, lorsqu'il y a trop de bruit dans l'enregistrement, ou si la

trace est quasiment absente) et on utilise l'option KILL TRACES dans **FC** pour enlever ces mauvais enregistrements (figure 3.7). (Voir en annexe le tableau présentant les profils et les traces défectueuses)



Les traces sismiques enregistrées par le 22^{ème} hydrophone lors de la collecte des données pour un profil



Les traces sismiques enregistrées par le 2^{ème} hydrophone lors de la collecte des données pour ce même profil

Figure 3.7 : Exemple de deux enregistrements par deux hydrophones (22 et 2) lors de collecte des données sur un même profil. On a un enregistrement avec beaucoup de bruits pour l'hydrophone 22 et une image avec moins de bruits pour l'hydrophone 2.

Filtrage

Après avoir enlevé les mauvaises traces dans un profil, on applique sur ce profil deux filtres : un filtre de **divergence sphérique** qui consiste à augmenter l'amplitude du signal avec la distance traversée par l'onde sismique (de fait, le temps aller-retour), et un filtre de **Butterworth** qui consiste à choisir la bande de fréquence qui réduira au mieux le bruit ambiant (par exemple, le bruit lié à la fréquence du signal électrique AC présent sur le bateau, 60 Hz). Pour ce projet nous avons opté, après plusieurs essais et erreurs, pour une bande de fréquence de 70 Hz à 700 Hz, et une pente de 18dB/octave.

Collection en Point Milieu Commun (« CMP », Common Mid-Point gather)

C'est une étape qui consiste à regrouper l'ensemble des traces associées à un couple point émetteur (source sismique) / et point récepteur (hydrophones) de telle sorte que le point miroir, situé à mi-distance entre les deux (émetteur/récepteur), soit géographiquement le même pour toutes ces traces (figure 3.8). Cette étape permettra de réduire le rapport signal/bruit de la trace sismique pour ce point particulier (le « CMP » = Common Mid Point) avec un traitement plus avancé (une sommation des traces inclus dans un CMP), comme décrit ci-dessous, après que la même procédure soit appliquée à d'autres positions espacées le long du profil.

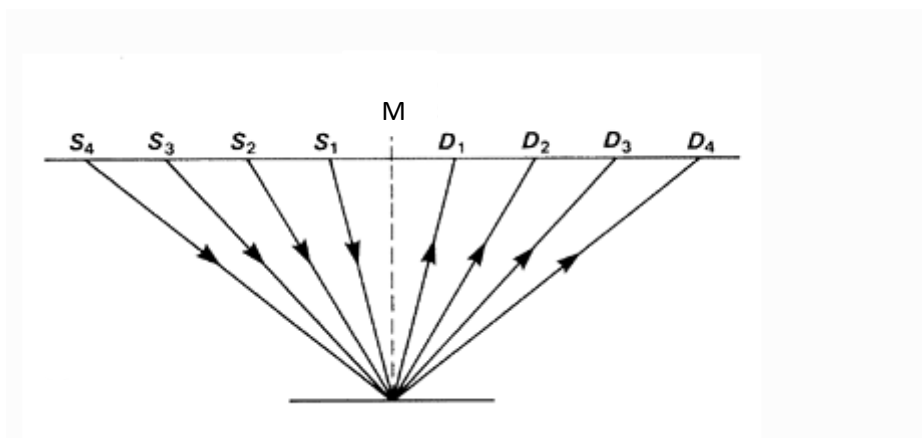


Figure 3.8 : Ensemble (couple) sources et récepteurs qui imaginent un même point situé au milieu (CMP).

On effectue cette collection en utilisant la fonction CMP SORT sur le programme FC. La vitesse du bateau (~ 1.5 m/s) et la fréquence des tirs (1 s) ont été sélectionnées en prenant en compte l'espacement des hydrophones (~ 3 m) de telle sorte que chaque collection de CMP (« CMP gather ») inclut 24 traces (appelé « fold » en anglais) ; c'est de fait le nombre optimal de traces pouvant être inclus dans un rassemblement de CMP (« CMP gather ») pour une flûte comprenant 24 hydrophones. Pour la suite du traitement, nous avons décidé d'analyser les collections de CMP tous les 25 ou 50 CMPs, et les résultats de ces analyses sont ensuite interpolés à tous les CMPs le long de ce profil.

Semblance

Après avoir regroupé les traces en CMPs, on effectue un calcul de semblance sur ce fichier. La Semblance est une mesure quantitative de la cohérence des données sismiques provenant de multiples canaux (hydrophones) pour un CMP. Le graphe de semblance est en quelque sorte un « spectre de vitesse » du CMP (figure 3.9, panneau de droite). Ce graphe est construit après avoir corrigé les temps aller-retour de chaque trace pour une vitesse sismique donnée (la vitesse V_{rms} dans l'équation ci-dessus, et indiquée le long de l'axe horizontal du graphe de semblance), puis en sommant les 24 traces du CMP corrigées pour cette même vitesse, et calculant la cohérence du signal résultant (si la vitesse ne correspondait pas du tout à celle des sédiments, une cohérence très faible, voire nulle, devrait être calculée). La vitesse sismique est incrémentée suivant un pas fixe et l'opération se répète de la même façon, jusqu'à ce que l'espace vitesse sismique / temps aller-retour soit complètement rempli par des valeurs de semblance. Pour un temps aller-retour donné, la valeur maximale de la semblance devrait correspondre à la vitesse sismique actuelle, V_{rms} . On utilise la fonction **Velocity semblance** dans le programme FC pour effectuer ce calcul de semblance.

Analyse de vitesse

Pour chaque CMP dans la collection de CMP (figure 3.9, panneau de gauche) pour un profil donné, on a en abscisse les valeurs de offsets (distance entre source et l'hydrophone) et en ordonnée on a le temps aller-retour (two-way travel time, TWTT). Dans ce graphe les signaux décrivent des hyperboles pour chaque interface géologique marquant des paramètres acoustiques différents (indice de réflexion) car le temps d'arrivée de l'onde augmente avec l'offset.

On utilise, avec le logiciel SV, la collection de CMP et le calcul de semblance correspondant pour effectuer l'analyse de vitesse. Cet analyse, conduite de façon interactive sur écran, consiste à choisir une vitesse (correspondant autant que possible à la valeur de semblance maximum visualisée par le calcul de semblance) telle que l'hyperbole définie par cette valeur vitesse soit aussi au plus près que possible de l'hyperbole définie par les signaux pour ce



CMP. On répète ce même processus à intervalle régulier le long du profil (tous les 25 ou 50 CMPs)

Donc, l'analyse de vitesse consiste à effectuer la sommation sur quelques CMPs, avec une série discrète de vitesses constantes tout en cherchant une cohérence maximale avec la trajectoire hyperbolique décrit par les réflexions (figure 3.9).

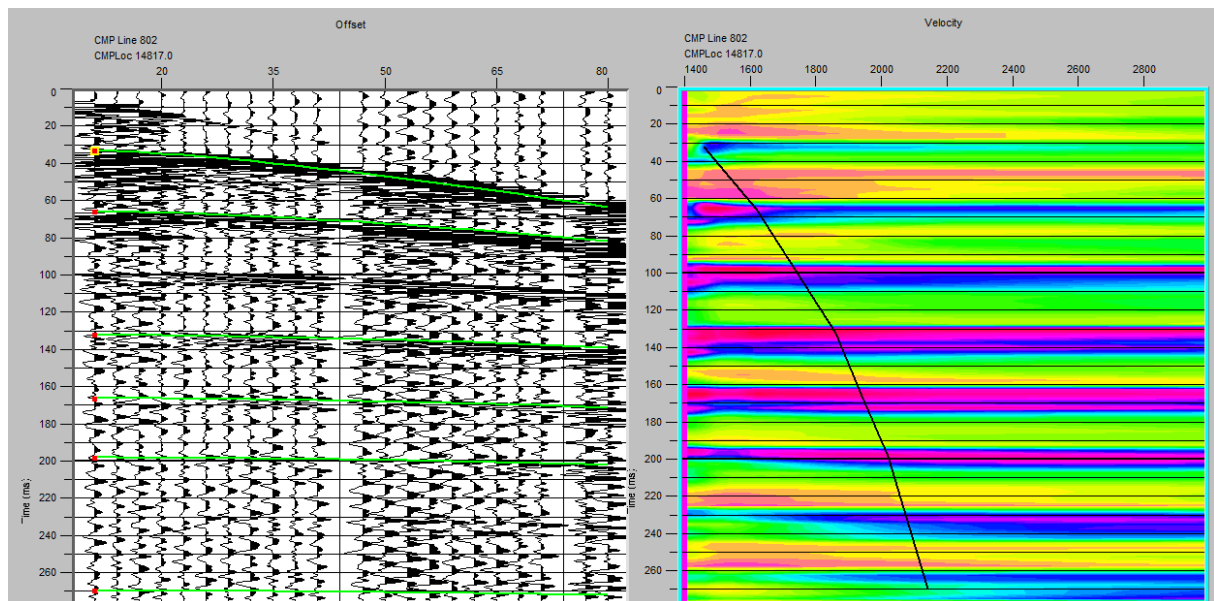


Figure 3.9 : Calcul de stacking velocity pour le CMP 14817 pour le profil 802

Le résultat de cette analyse est un tableau listant la vitesse sismique (V_{rms}) correspondant à toute une série de temps aller-retour de l'onde sismique.

Correction dynamique (en anglais, "Normal Move-Out" correction, NMO)

En faisant la collection en CMP, on considère que « t », le temps pris pour le trajet de la réflexion de la source aux récepteurs, est une fonction hyperbolique de l'offset (voir ci-dessus) :

$$t^2 = t_0^2 + \frac{D^2}{v_{rms}^2} \quad \text{Avec : } v_{rms} : \text{vitesse moyenne quadratique}$$

t_0 : temps aller-retour de l'onde réfléchiée à distance source-récepteur nulle ($D=0$)

D : distance source/ récepteur

La correction NMO qui sert à rendre horizontale la trajectoire des réflexions hyperboliques des réflexions (sources/ récepteurs) dans un CMP (figure 3.10). Après la sommation de ces traces corrigées, une seule trace sera obtenue avec un haut rapport signal/bruit. En effet, tout signal ne décrivant pas une hyperbole correspondant à la vitesse de sédiments ne pourra pas être sommé de façon cohérente.

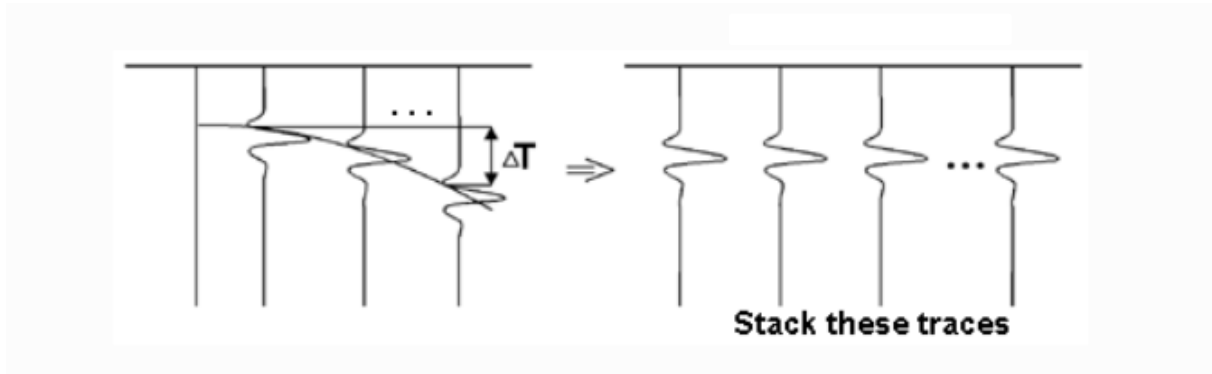


Figure 3.10 : L'application de correction NMO pour rendre horizontale la trajectoire des réflexions

Donc, une correction NMO est une correction qui utilise la vitesse moyenne quadratique pour réduire à zéro le Δt

$$\Delta t = t - t_0 = t_0 \sqrt{1 + \frac{D^2}{t_0^2 v_{rms}^2}} - t_0$$

t_0 et D sont mesurés directement dans les fichiers des tirs et la vitesse v_{rms} nécessaire pour la correction NMO est déterminée dans l'étape de l'analyse de vitesse, par examen du graphe de semblance.

Pour faire les corrections NMO sur nos CMPs, on utilise la commande « Apply Normal Moveout » dans le programme FC, une étape qui requiert l'utilisation du tableau de vitesse déterminé pendant l'analyse de vitesse.

Sommation des traces (en anglais, Stacking)

Après la correction NMO, on effectue l'étape de sommation des traces. Cette étape consiste à sommer toutes les traces d'un même CMP une fois corrigées pour le profil de vitesse, afin d'obtenir une seule trace avec moins de bruit, donnant des informations plus précises sur les couches enfouies sous le fond du lac.

Migration

L'hypothèse qui a été faite dans la collection de CMP est que lorsqu'une onde arrive sur un hydrophone il a imagé un point situé à mi-distance entre la source et l'hydrophone.

Cependant, si la surface réfléchissante n'est pas horizontale cette onde aura de fait imagé un point décalé vers les profondeurs moindre le long du profile. La migration consiste donc à calculer toutes les positions possibles d'un point imagé par un couple source-récepteur trace par trace, puis à sommer les résultats par constructions négatives et positives, les amplitudes s'annulant d'une trace à l'autre lorsque la correction n'est pas applicable, et laissant donc apparaître le réflecteur dans sa position réelle.

La migration sert donc à restaurer les pendages actuels, à augmenter la résolution latérale et aussi à focaliser les diffractions. Dans notre cas on utilise de méthode de migration de Kirchhoff avec la commande « Post-Stack Kirchhoff Time Migration » dans le programme FC, et on utilise l'équation de Dix pour terminer les vitesses par intervalle (voir en annexe le fichier FlowChart présentant les étapes de traitement des données pour les profils)



○ Troisième partie : Résultats et Discussions

Après le traitement de ces données, on se focalise sur la recherche des zones de failles et de déformations (plis) qui sont des témoins des activités sismiques et tectoniques. Afin de visualiser et d'interpréter de manière interactive les données de sismique réflexion multitrace traitées, on a utilisé le logiciel OpendTect (<https://www.opendtect.org>). Opendtect est un logiciel gratuit, permettant non seulement de visualiser des profils sismiques en 2D et 3D mais aussi de mettre en évidence les relations spatiales des profils les uns par rapport aux autres (figure 4.5). Avec ce logiciel, on peut aussi numériser les « horizons sismiques », ces réflexions de fortes amplitudes montrant une continuité latérale le long d'un profil et que l'on suppose correspondre à une interface entre deux couches géologiques avec des propriétés physiques bien contrastées. OpendTect permet de tracer visuellement ces horizons sismiques sur l'écran et de relever de façon numérique leurs coordonnées. Par exemple, on a utilisé ce logiciel pour numériser le fond du lac (figure 4.1) et on utilise le logiciel GMT (<https://www.soest.hawaii.edu/gmt/>) pour faire une représentation bathymétrique de l'horizon numérisé.

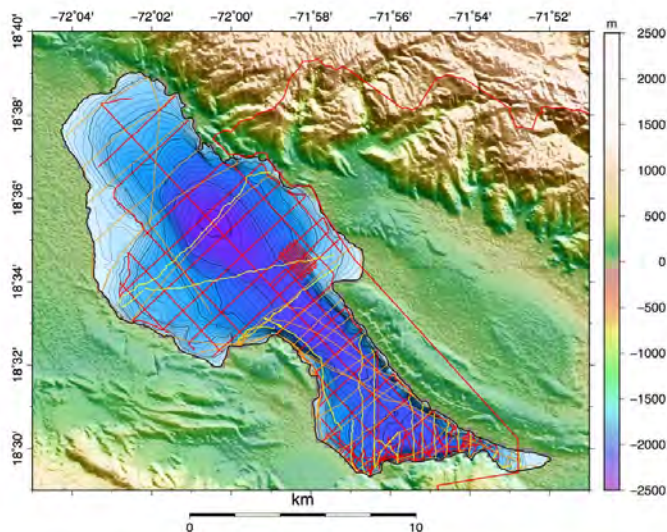


Figure 4.1 : Carte de bathymétrie du fond du Lac Azuei compilée à partir des données de CHIRP acquises pour ce projet en 2017 (lignes rouges), ainsi que celle acquises en 2013 avec un "echosounder" (lignes oranges, Moknatian et al., 2017) et en 2013 avec un CHIRP (lignes jaunes, Wang et al., 2018)

Les équipements et les paramètres d'acquisitions qui ont été utilisés pour la collecte des données de sismique réflexion multitrace devraient nous permettent d'imager jusqu'à 300 m de profondeur sur chaque profil. Cependant, on a remarqué que les signaux sismiques ont été fortement atténués dans certaines parties du lac à cause d'un front de gaz peu profond. Le gaz est présent de façon diffuse (sous forme de petites bulles) dans les sédiments superficiels, et cette présence est généralement interprété comme étant d'origine biogénique, produit par la décomposition bactériale des matières organiques qui s'accumulent naturellement au fond du lac (Hagen & Vogt, 1988). Là où il est présent, le front de gaz consiste de fait en un réflecteur sismique de forte amplitude et qui atténue très fortement l'énergie du signal sismique transmise vers les couches plus profondes (figure 4.2).

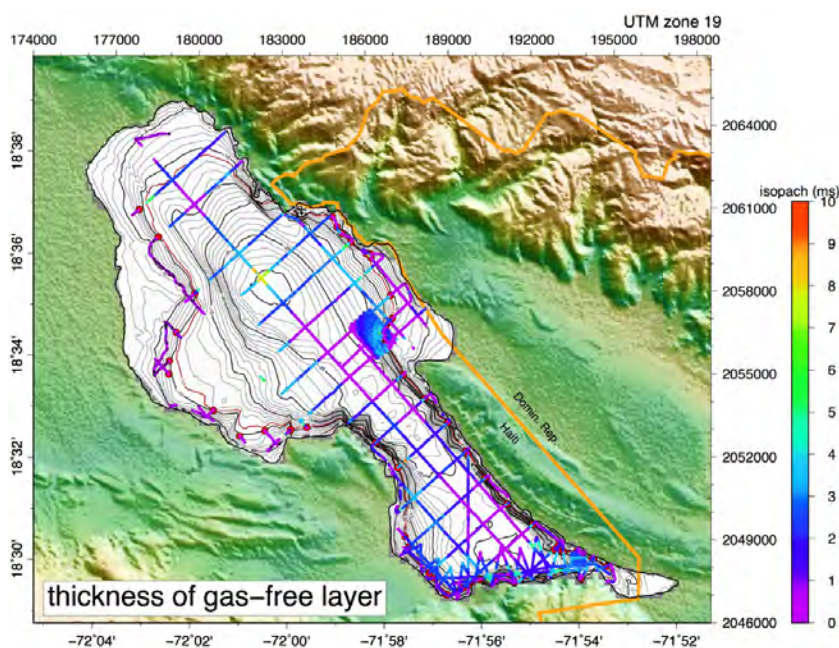


Figure 4.2 : Carte montrant le temps aller-retour entre le fond du lac et le front de gaz, tel que mesuré le long des profils CHIRP acquis en 2017 (Murray, 2018). Un front de gaz est détecté partout sauf dans la partie ouest du lac.

• Résultats

L'analyse partielle (car l'analyse des données est toujours en cours) de ces 220 km de données de sismique réflexion multitrace nous révèle plusieurs zones de déformation (plis et/ou des failles) au niveau du Lac Azuei :

- On retrouve une zone de déformation d'orientation E-O d'environ 1.5 à 3 km de large qui borde la rive sud du lac. Cette zone comprend une série de plis de propagation de direction Est-ouest, bien détectés dans la carte de la bathymétrie du fond du lac (figure 4.3). En dépit du front de gaz qui est peu profond dans cette zone, on arrive quand même à imager sur certains profils de CHIRP des déformations, en forme des plis en échelons, qui affectent même les couches des sédiments les plus jeunes (turbidites) (figure 4.4). Bien qu'on dispose des profils de sismique réflexion multitrace dans cette zone de déformation (figure 3.1) on n'arrive pas vraiment, à ce stade de traitement, à constater des décalages entre les couches (horizons) mettant en évidence la présence éventuelle de failles dans cette partie sud du lac.

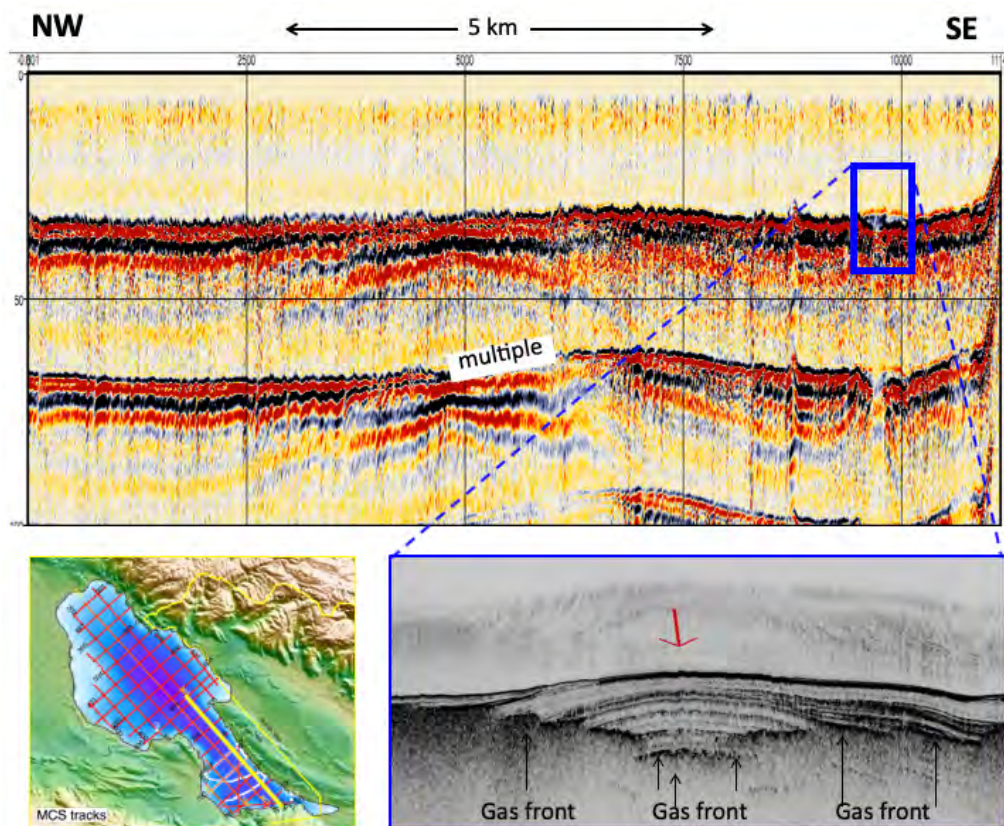


Figure 4.3 : Zone de déformation faiblement imagée sous le front de gaz dans la rive sud du Lac. L'image du profil de CHIRP 802 montre ces déformations affectent même les couches les plus jeunes. La forte réflexion à ~70 ms est le premier multiple du fond du lac, et est donc un artefact

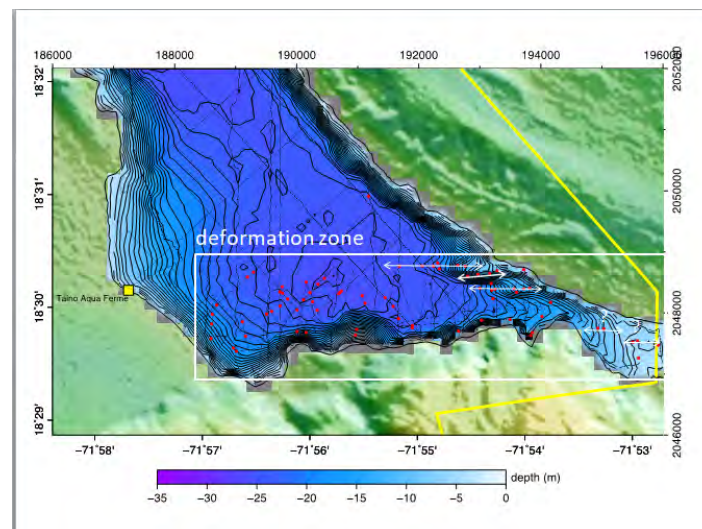


Figure 4.4 : Large zone de déformation qui borde la rive sud du Lac. Les flèches blanches indiquent l'axe E-O d'une série de plis en échelon cartographiés par les données CHIRP (James et al., 2019 ; Cormier et al., 2019)

- L'analyse de ces données sismiques révèle aussi un pli monoclinique dans la partie ouest du lac. Ce large pli monoclinique s'étend sur environ 12 km de longueur (figure 4.5) avec une direction nord-ouest. Cette structure, qu'on retrouve sur presque toute la côte ouest du lac, affecte l'ensemble des horizons sismiques et leurs pendages augmentent avec la profondeur. Certains de ces horizons sismiques semblent être très érodées, comme le suggère leurs formes irrégulières et leurs fortes amplitudes. Sur certains profils imageant ce pli monoclinique, on remarque aussi de forts décalages entre les horizons sismiques, mettant en évidence la présence de quelques zones de failles verticales (figure 4.6).

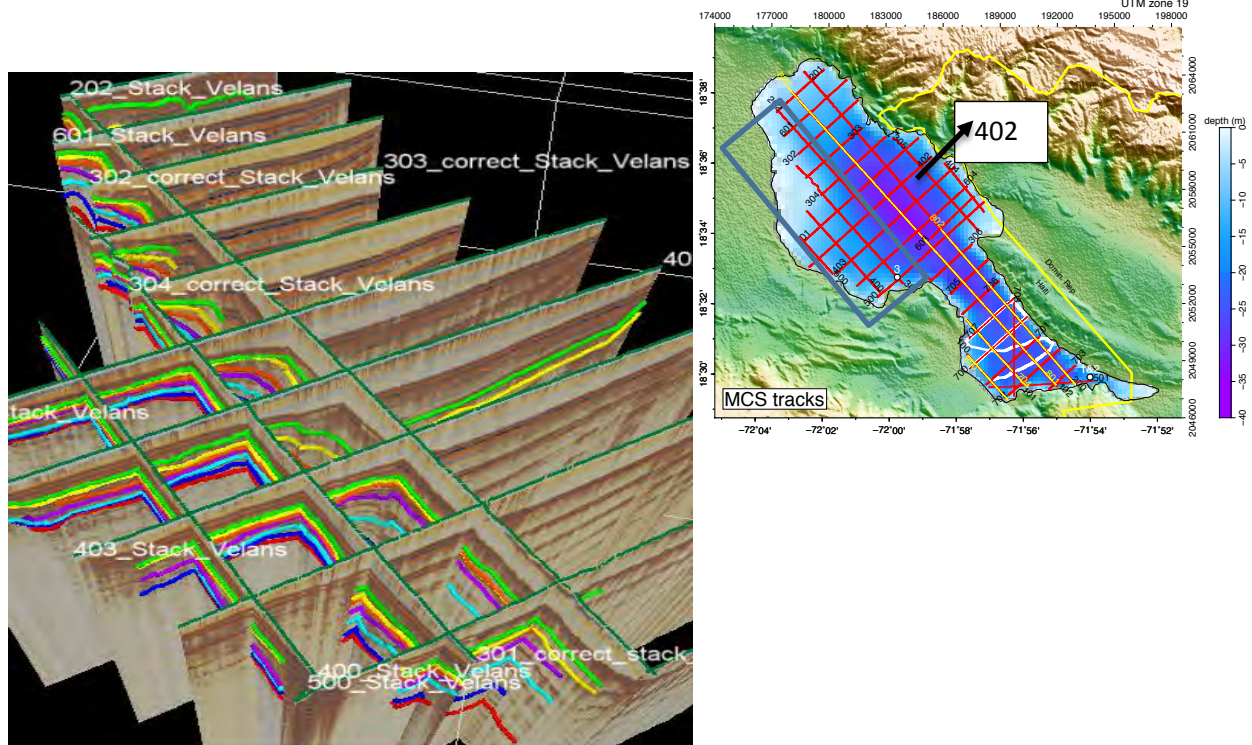


Figure 4.5 : relation spatiale entre les profils sur la côte ouest du lac sur lesquels on observe le grand pli monoclinique. Les traits de couleurs différentes indiquent les horizons sismiques tracés avec OpendTect et corrélés de profil en profil, de rouge (le plus profond) à vert (le moins profond).

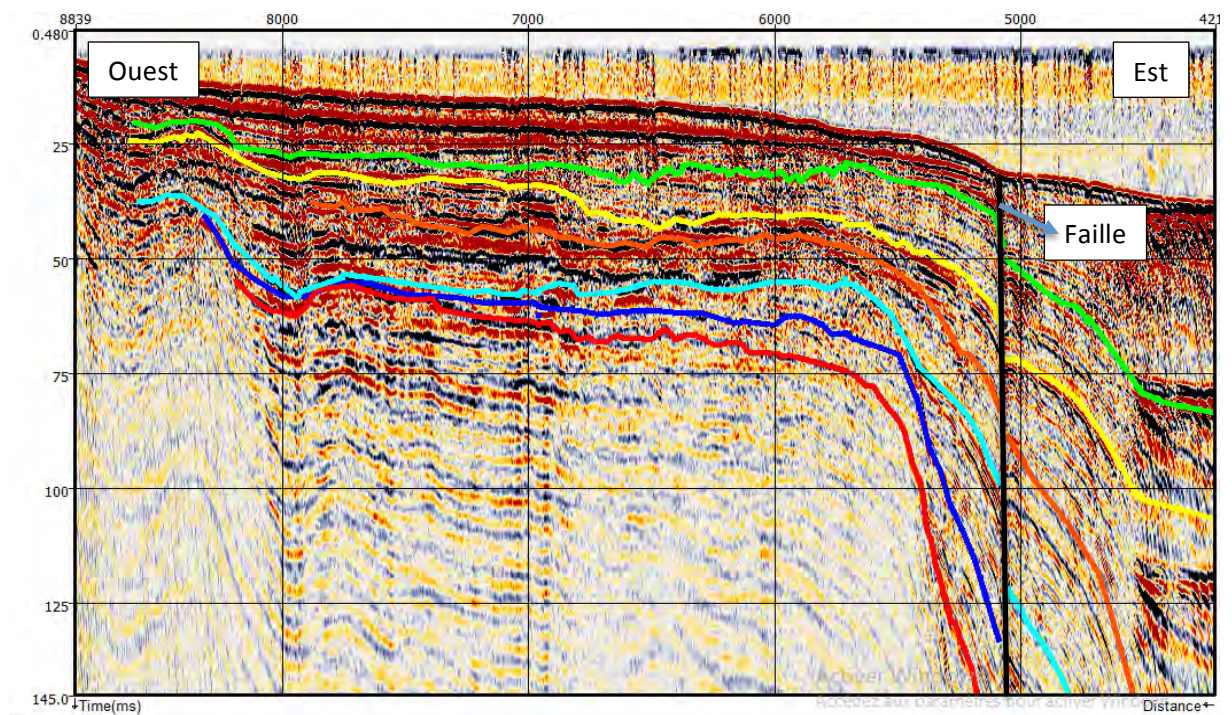


Figure 4.6 : Les horizons sismiques et la mise en évidence d'une faille verticale sur l'un des profils (402) sismique dans la partie ouest du Lac.

- Aussi de manière inattendue, on constate également la présence d'un petit pli dans la partie nord du lac. Ce petit pli s'étend sur environ 3km de large avec une direction NO-SE. Il est très bien marqué sur le profil 201 qui se trouve à l'extrême nord du lac. Néanmoins, à mesure qu'on approche dans la zone du bassin situé au milieu du lac, ce pli est plus faiblement imagé sous le front de gaz dans les profils 601 et 302 qui sont parallèles au profil 201 (figure 4.7).

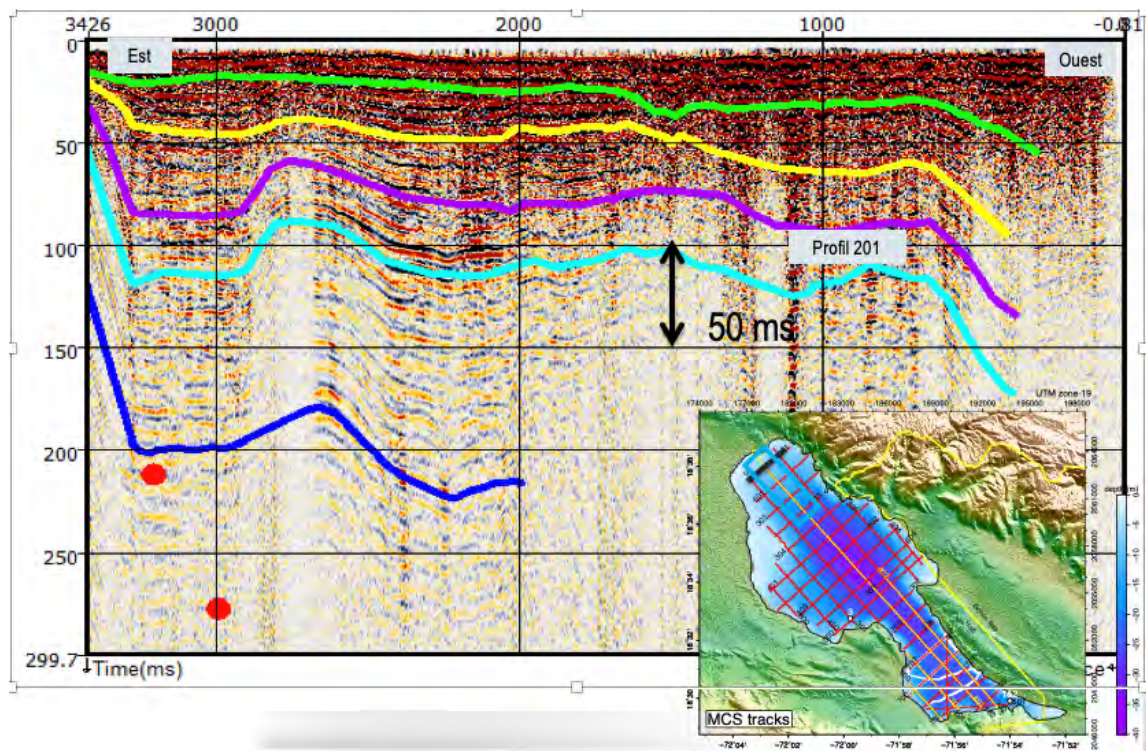


Figure 4.7 : les horizons sismiques numérisés sur le profil 201(non migre) situé dans la partie nord du lac. L'axe horizontal est annoté en mètre le long du profil. L'axe vertical indique le temps aller-retour en ms. Notez le pli aux environs de la distance 2800 m

• Interprétations et Discussions

Pour la zone de déformation située dans la partie sud du lac et qui présente un ensemble de plis en échelon de direction E-O, nous proposons que ces plis indiquent une large zone tectoniquement active. En effet, en prenant en considération le fort taux de sédimentation dans le Lac Azuei, estimé entre 0.04 et 0.6 cm/an [Eisen-Cuadra et al., 2013 ; Cormier et al., 2018], les premiers 4m à 6m de sédiment typiquement imagé par les profils CHIRP seraient âgés entre 1 000 à 10 000 ans- et ces sédiments sont fréquemment déformés. Nous proposons que les plis en échelons soient les conséquences du mouvement transpressif sur la zone de faille située au voisinage de la rive sud du lac, plutôt que

l'expression d'une faille coulissante E-O. En effet, dans ce second cas, on devrait remarquer de préférence des plis d'orientation NO-SE [e.g., *Sylvester*, 1988] et des décalages probables entre les horizons dans les profils de sismique multitrace. De ce fait, notre proposition est en concordance avec celle qui a été étayée récemment par trois études indépendantes. Suivant ces études, la zone de faille EPG est considérée comme étant une faille transpressive avec un pendage vers le sud (sous le Massif de la Selle) [*Symithe & Calais*, 2016 ; *Possee et al.*, 2019 ; *Saint Fleur et al.*, 2015 et 2019]. En contraste, *Wang et al* (2018) proposent une faille de cisaillement pure (l'EPGF) accompagnée d'une autre faille normale à pendage vers le nord (Faille de Jimani). Notre proposition est aussi basée sur les données de CHIRP acquises en même temps que les données de MCS et sur lesquelles on ne remarque pas non plus des décalages stratigraphiques entre les horizons [*Cormier et al.*, 2018].

Pour ce large pli monoclinique mis en évidence par le traitement des données de sismique réflexion multitrace, nous proposons que celui-ci soit l'expression à la surface d'une faille de chevauchement (inverse) aveugle avec pendage vers le SO et s'étendant sous presque toute la partie ouest du lac. L'augmentation progressive du pendage des horizons avec la profondeur indique que cette structure a été continuellement active depuis au moins le temps nécessaire pour déposer environ 300 m de sédiments images dans ces profils. De plus, les zones de déformations dans les couches sédimentaires souples (« soft sédiment déformation ») remarquées sur certains profils de sismique multitrace et de CHIRP [*Cormier et al.*, 2017 et 2018] pourraient correspondre à des liquéfactions et/ou glissements de terrains survenus lors des mouvements sismiques sur ce plan de faille. Cette proposition est aussi basée sur l'analyse du relevé d'un paléo-rivage basée sur les profils CHIRP et qui documente une surélévation d'environ 2 m du paleorivage le long de la côte ouest (figure 4.8) [*Lucier*, 2017 ; *Sloan et al.*, 2017 ; *Cormier et al.*, 2018]. Enfin, les zones d'érosions remarquées sur les horizons sismiques pourraient correspondre à des érosions de surface produites pendant des périodes prolongées de sécheresse, peut-être produite en association avec les variations climatiques liées aux cycles glaciaires et interglaciaires.



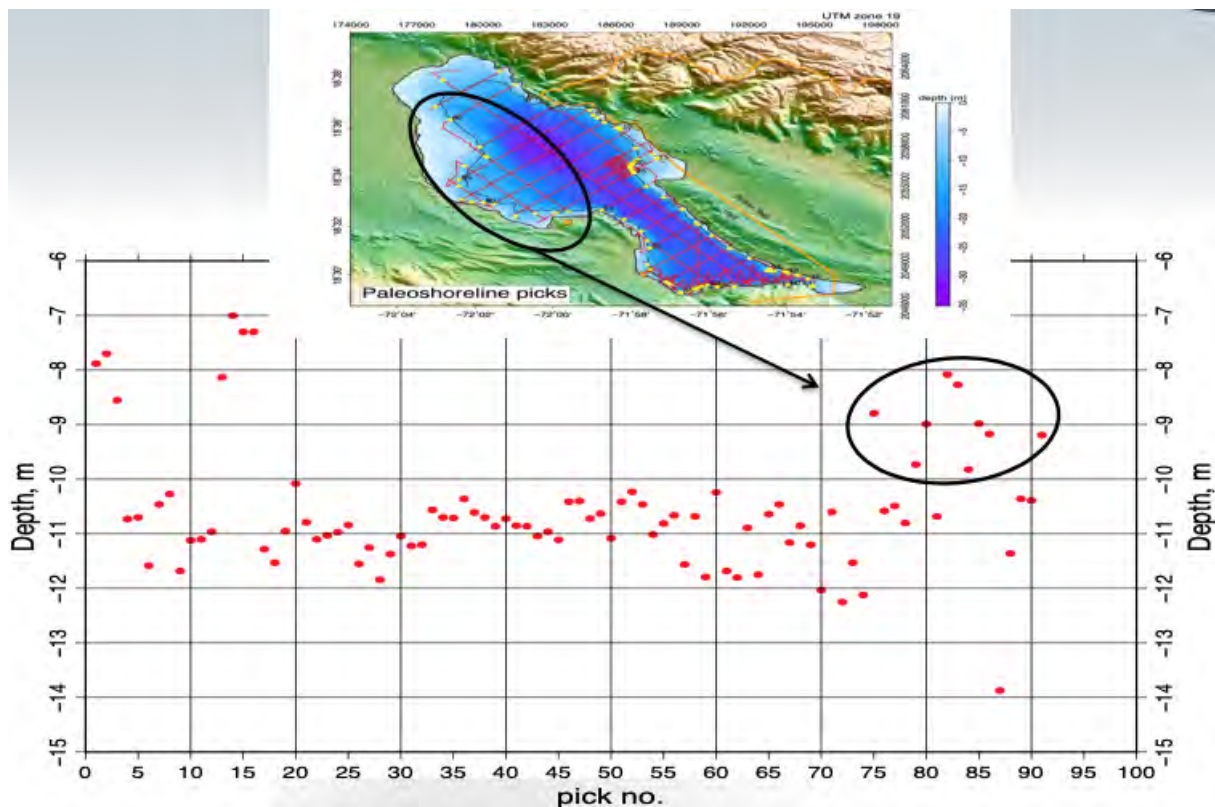


Figure 4.8: Les points jaunes sur la carte indique la position d'un paléo-rivage détecté sur les profils CHIRP. Sa profondeur correspond en général avec le courbe de niveau de 11m (fin trait noir), sauf pour la partie ouest du lac. Le graphe montre les 91 relevés de profondeur de ce paléo-rivage ; l'axe horizontal correspond aux identifications faites en commençant au Nord du Lac et continuant dans le sens des aiguilles d'une montre (d'après Lucier, 2017 ; Sloan et al., 2017 ; Cormier et al., 2018).

L'analyse des données de sismique réflexion révèle aussi la présence d'un pli de 3km de large dans la partie nord du lac et d'orientation No-SE, parallèle au grand pli monoclinique décrit ci-dessus ainsi qu'au front de la chaîne des Matheux qui borde le Lac par le N-E. Nous proposons que ce pli soit le résultat de ces deux mouvements de chevauchements qui le bordent de chaque côté. La présence de ce pli, ainsi que le pli monoclinique indiquent que la partie nord du lac est une zone qui est tectoniquement très active. De ce point de vue, il est intéressant de noter que *Symithe & Calais* (2016) dans leur analyse des données de GPS, ne documentent aucune (ou peu) de déformation dans la zone de la Chaîne des Matheux au nord du Lac Azuei. Peut-être cette différence de résultats provient des différentes échelles de temps, entre GPS (la dernière décade) et la sismique réflexion multitrace (au moins plusieurs dizaines de milliers d'années)

○ Conclusion

L'analyse des données de sismique réflexion multitrace acquises en 2017 atteste de la complexité des structures transpressives actives qui marquent la limite entre la plaque Nord-Américaine et la plaque Caraïbe. Cette analyse révèle les structures suivantes.

- Une série de plis de direction E-O dans la partie sud du lac corrobore que le mouvement de la zone de faille Enriquillo Plantain-Garden est un mouvement transpressif. La géométrie de ces plis est compatible avec la présence d'une faille à mouvement oblique ayant un pendage sud sous le Massif de la Selle, en concordance avec les résultats de trois autres études indépendantes. Ces observations ne sont pas compatibles avec un mouvement purement décrochant, comme l'a été proposé par Wang et al. (2018). Les profils de sismique réflexion multitrace documentent néanmoins la présence d'une zone de déformation E-O de 2-3 km de large, là où ces auteurs proposent le passage de l'EPGF.
- Un large pli monoclinique d'orientation NO-SE borde la rive nord-ouest du lac. L'augmentation progressive du pendage des horizons avec la profondeur suggère que ce pli monoclinique est actif depuis au moins le temps nécessaire pour déposer 300 m de sédiments (probablement des dizaines de milliers d'années, sinon plus). La géométrie de ce pli monoclinique suggère qu'il soit l'expression en surface d'une faille inverse aveugle de pendage vers le S-O, et aurait pu produire des séismes dans les derniers milliers d'années.
- Un petit pli (~ 3km de large) se situe entre les deux zones de chevauchements d'orientation NO-SE qui bordent le Lac Azuei dans sa partie nord. Il semble exprimer la continuité de l'activité tectonique non seulement sur la zone de chevauchement dans la partie nord-ouest du lac mais aussi sur le chevauchement entre la chaîne des Matheux sur le bassin du cul de sac.

De ce fait, le bassin du cul de sac et la zone métropolitaine de Port-au-Prince sont non seulement sous la menace de l'EPGF, qui a enregistré une augmentation de son état de contrainte lors du séisme de 2010 (*Symithe et al., 2013*), mais aussi sous la menace d'autres



failles aveugles susceptibles de produire de grands séismes comme celui de 2010, qui a résulté d'un glissement sur la Faille aveugle de Léogane.



○ Recommandations

Pour approfondir notre connaissance de cette zone très complexe, nous faisons les recommandations suivantes :

- Mettre sur pied une autre étude de sismique réflexion de haute résolution qui permettrait non seulement d'avoir une meilleure imagerie des structures en sous-sol mais aussi de détecter les zones éventuelles de gaz en forte concentration, une présence qui pourrait poser un risque pour le projet de forage scientifique HaitiDRILL.
- Utiliser les résultats de l'analyse des données de la sismique réflexion de haute résolution pour prélever des carottes de quelques dizaines de mètres dans différents endroits du lac, et surtout dans la zone du pli monoclinique, afin de dater différents horizons sismiques, et donc déterminer les taux de déformation tectonique.
- Faire une étude de sonar bathymétrique multifaisceaux très haute résolution dans la partie sud du lac afin de détecter avec grande précision la géométrie des plis, la présence éventuelle de glissement de terrain, et cartographier des possibles décalages de structures superficielles telles que chenaux, glissements de terrains, ou paléo-rivages qui pourraient être du à l'activité des failles sismogéniques.





○ Références

Benford, B., DeMets, C., and Calais, E., GPS estimates of microplate motions, northern Caribbean: evidence for a Hispaniola microplate and implications for earthquake hazard: *Geophysical Journal International*, 191, 481-490, 2012.

Calais, E. & De Lépinay, B. M. Strike-slip tectonic processes in the northern Caribbean between Cuba and Hispaniola (Windward Passage). *Marine Geophysical Researches*, 17, 63-95. 1995.

Calais, E., Freed, A., Mattioli, G., Amelung, F., Jonsson, S., Jansma, P., Hong, S.-H., Dixon, T., Prepetit, C., and Momplaisir, R., Transpressional rupture of an unmapped fault during the 2010 Haiti earthquake: *Nature Geoscience*, 3, 794-799, 2010.

Calmus, T., Contribution à l'étude géologique du massif de Macaya (sud-ouest d'Haiti, Grandes Antilles), sa place dans l'orogène nord caraïbe (Ph. D. thesis, Paris, France), 1983.

Charles, N., M.H. Cormier, H. Sloan, N.J. Watrus, C.C. Sorlien, D. Boisson, K. Guerrier, C.K. Hearn, J.W. King, R. Momplaisir, S.J. Symithe, and S.M.J. Ulysse, Une campagne de sismique réflexion multitraces sur le lac Azuei (Haiti) révèle un système complexe de structures transpressives actives le long de la frontière de plaque Nord-Américaine – Caraïbe , Colloque Haïti Géoscience, Port-au-Prince, Haïti, 11-12 Septembre 2019a.

Charles, N., M.H. Cormier, H. Sloan, N.J. Watrus, C.C. Sorlien, D. Boisson, K. Guerrier, C.K. Hearn, J.W. King, R. Momplaisir, S.J. Symithe, and S.M.J. Ulysse, Multichannel Seismic Survey of Lake Azuei (Haiti) Documents a Complex System of Active Transpressional Structures Across the North American-Caribbean Plate Boundary, abstract # 555543, Fall Meeting of the American Geophysical Union, San Francisco, 9-13 December 2019b.

Cormier, M.H., H. Sloan, and the Lake Azuei Project Team, Lake Azuei Project, Haiti: Field Report, <https://www.projectlakeazuei.org>, January 9 - February 3, 2017.

Cormier, M.H., Sloan, H., Boisson, D., Brown, B., Guerrier, K., Hearn, C.K., Heil, C.W., Kelly, R.P., King, J.W., Knotts, P., Lucier, O.F., Momplaisir, R., Stempel, R., Symithe, S.J., Ulysse, S.M.J., and Watrus, N.J., Signature of Transpressional Tectonics in the Holocene Stratigraphy



of Lake Azuei, Haiti: Preliminary Results from a High-Resolution Subbottom Profiling Survey, Fall Meeting of the American Geophysical Union, Session T047, abstract # 259609, New Orleans, 11-15 December 2017.

Cormier, M.H., Sloan, H., King, J.W., Boisson, D., Guerrier, K., Hearn, C.K., Heil, C.W., Kelly, R.P., Momplaisir, R., Murray, A.N., Sorlien, C.C., Symithe, S.J., Ulysse, S.M.J., and Wattrus, N.J., Late Quaternary fault-related folding, uplifted paleoshoreline, and liquefaction structures: clues about transpressional activity along the North American-Caribbean plate boundary from a comprehensive seismic reflection survey of Lake Azuei, Haiti, Abstract #368456, Fall Meeting of the American Geophysical Union, Washington DC, doi: 10.1002/essoar.10500232.1, 2018.

Cormier, M.H., H. Sloan, K. James, D. Boisson, K. Guerrier, C.K. Hearn, J.W. King, R. Momplaisir, T. Ramsamooj, S.J. Symithe, S. Ulysse, and N.J. Wattrus, Déformation Holocène Transpressive Révélée par les Marqueurs Géomorphologiques et Stratigraphiques du Lac Azuei, presented at the Haïti Géoscience 2019 meeting, Port-au-Prince, Haiti, 11-13 September 2019.

Douilly, R., Haase, J.S., Ellsworth, W.L., Bouin, M.-P., Calais, E., Symithe, S.J., Armbruster, J.G., de Lépinay, B.M., Deschamps, A., Mildor, S.-L., et al., Crustal Structure and Fault Geometry of the 2010 Haiti Earthquake from Temporary Seismometer Deployments, Bull. Seismol. Soc. Am. 103, 2305–2325, 2013.

Duplan, L., Carte Structurale de la République d'Haiti. Région Sud, 1975. Eisen-Cuadra, A., A.D. Christian, E. Dorval, B. Broadaway, J. Herron, J., and R.E. Hannigan, Metal Geochemistry of a Brackish Lake: Etang Saumatre, Haiti, P. Censi et al. (eds.), Medical Geochemistry: Geological Materials and Health, 149-166, 2013.

Hagen, R.A., and P.R. Vogt, Seasonal variability of shallow biogenic gas in Chesapeake Bay: Marine Geology, 158, 75-88, 1999.

Hearn, C.K., Cormier, M.H., Sloan, H., Wattrus, N., Boisson, D., Brown, B., Guerrier, K., King, J.W., Knotts, P., Momplaisir, R., Sorlien, C.C., Stempel, R., Symithe, S., and Ulysse, S.M.J., Transpressional tectonics across the N. American-Caribbean plate boundary: preliminary



results of a multichannel seismic survey of Lake Azuei, Haiti, Abstract T51G-0566, Fall Meeting of the American Geophysical Union, New Orleans, 11-15 December 2017.

James, K., M.H. Cormier, H. Sloan, T. Ramsamooj, D. Boisson, K. Guerrier, C.K. Hearn, J.W. King, R. Momplaisir, S.J. Symithe, S.M.J. Ulysse, and N.J. Wattrus, Geomorphologic and Stratigraphic Evidence of Ongoing Transpressional Deformation Across Lake Azuei (Haiti), abstract # 554040, Fall Meeting of the American Geophysical Union, San Francisco, 9-13 December 2019.

Leroy, S., Ellouz-Zimmermann, N., Corbeau, J., Rolandone, F., Lépinay, B. M., Meyer, B., Momplaisir, R., Granja Bruña, J. L., Battani, A. & Baurion, C. Segmentation and kinematics of the North America-Caribbean plate boundary offshore Hispaniola. *Terra Nova*, 27, 467-478. <https://doi.org/10.1111/ter.12181>. 2015.

Lucier, O., Submerged Paleo-Shorelines as Markers of Vertical Deformation around Lake Azuei, Haiti, SURFO Technical Report No. 17-01, U. Rhode Island, pp 43-53, http://digitalcommons.uri.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1013&context=surfo_tech_reports, 2017.

Mann, P., F.W. Taylor, R.L. Edwards, and T.L. Ku, Actively evolving microplate formation by oblique collision and sideways motion along strike slip faults: An example from the northwestern Caribbean plate margin, *Tectonophysics*, 246, 1 –69, 1995.

Mann, P., E. Calais, J.-C. Ruegg, C. DeMets, P.E. Jansma, and G.S. Mattioli, Oblique collision in the northeastern Caribbean from GPS measurements and geological observations, *Tectonics* 21, doi:10.1029/2001TC001304, 2002.

Mercier de Lépinay, B., A. Deschamps, F. Klingelhoefer, Y. Mazabraud, B. Delouis, V. Clouard, Y. Hello, J. Crozon, B. Marcaillou, D. Graindorge, M. Vallée, J. Perrot, M.-P. Bouin, J.-M. Saurel, P. Charvis, and M. St-Louis, The 2010 Haiti earthquake: A complex fault pattern constrained by seismologic and tectonic observations, *Geophysical Research Letters*, 38, doi:10.1029/2011GL049799, 2011.

Moknatian, M., M. Piasecki and J. Gonzalez, Development of geospatial and temporal characteristics for Hispaniola's Lake Azuei and Enriquillo using Landsat imagery, *Remote Sensing*, 9, 510-542, 2017.



Momplaisir, R. Contribution à l'Etude Géologique de la partie orientale du massif de la hotte (presqu'île de sud d'Haiti): Synthèse structurale des marges de la presqu'île à partir de données sismiques. Ph.D. thesis, Univ. Pierre-et-Marie-Curie (Paris VI). 1986.

Murray, A.N., Sedimentary Signatures of Climate Variability and Tectonic Activity in Lake Azuei, Haiti: Possible Implications for Natural Hazards, SURFO Technical Report 18-01, U. Rhode Island, pp. 91-106,
https://digitalcommons.uri.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1014&context=surfo_tech_reports, 2018.

Pubellier, M., Vila, J.-M. & Boisson, D. North Caribbean neotectonic events: The Trans-Haitian fault system. Tertiary record of an oblique transcurrent shear zone uplifted in Hispaniola. *Tectonophysics*, 194, 217-236. 1991.

Pubellier, M., A. Mauffret, S. Leroy, J.M. Vila, and H. Amilcar, Plate boundary readjustment in oblique convergence: Example of the Neogene of Hispaniola, Greater Antilles, *Tectonics*, 19, 630-648, 2000.

Possee, D., D. Keir, N. Harmon, C. Rychert, F. Rolandonne, S. Leroyt, J. Corbeau, G. Stuart, E. Calais, F. Illsley-Kemp, D. Boisson, R. Momplaisir, and C. Prépetit, The Tectonics and Active Faulting of Haiti from Seismicity and Tomography, *Tectonics*, 38, 1138-1155, doi: 10.1029/2018TC005364, 2019.

Prentice, C., Mann, P., Crone, A., Gold, R., Hudnut, K., Briggs, R., Koehler, R. & Jean, P. 2010. Seismic hazard of the Enriquillo-Plantain Garden fault in Haiti inferred from palaeoseismology. *Nature Geoscience*, 3, 789.

Prépetit, C., Aléa et risque sismique en Haïti, Bureau des Mines et de l'Energie,
<http://www.bme.gouv.ht/alea%20sismique/Aléa%20et%20risque%20sismique%20en%20Haïti%20VF.pdf>

Rodríguez-Zurrunero, A., Granja-Bruña, J., Carbó-Gorosabel, A., Muñoz-Martín, A., Gorosabel-Araus, J. M., De La Peña, L. G., Ballesteros, M. G., Pazos, A., Catalán, M. & Espinosa, S. Submarine morpho- structure and active processes along the North American-Caribbean plate boundary (Dominican Republic sector). *Marine Geology*, 407, 121-147. 2019.



Saint Fleur, N., N. Feuillet, N., and R. Grandin, Seismotectonics of southern Haiti: a new faulting model for the 12 January 2010 M7 earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 10273-10281, 2015.

Saint Fleur, N., N. Feuillet, and Y. Klinger, Active tectonics along the Cul-de-Sac – Enriquillo plain and seismic hazard for Port-au-Prince, Haiti, *Tectonophysics*, 771, 228235, 2019.

Sloan, H., M.H. Cormier, D. Boisson, B. Brown, K. Guerrier, C.K. Hearn, C.W. Heil, L. Hynes, R.P. Kelly, J.W. King, P. Knotts, O.F. Lucier, R. Momplaisir, R. Stempel, S.J. Symithe, S.M.J. Ulysse, and N.J. Wattrus, Subbottom seismic profiling survey of Lake Azuei, Haiti: Seismic signature of paleoshorelines in a transpressional environment and possible tectonic implications, Fall Meeting of the American Geophysical Union, Session T047, abstract # 259797, New Orleans, 11-15 December 2017.

Sylvester, A.G., Strike-slip faults, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 100, 1666-1703, 1988.

Symithe, S., and E. Calais, Present-day shortening in Southern Haiti from GPS measurements and implications for seismic hazard: *Tectonophysics*, 679, 117-124, 2016.

Wang, J., P. Mann, and R.R. Stewart, Late Holocene structural style and seismicity of highly transpressional faults in southern Haiti, *Tectonics* 37, 3834-3852, doi: 10.1029/2017TC004920, 2018.





○ Annexe

Numéro du profil	La (les) trace(s) défectueuse(s)
200B	22,24
201	22
202	22,24
301_correct	
302_correct	22,24
303_correct	22,24
304_correct	22,24
305_correct	12,22
400	22,24
401	22
402	22
403	22
500	22
501	22
600	22
601	22,24
602	22
603	22
604	22
700	22
701	22,12
702	22
703	22
704	12,22
705	12,22
707	12,22
708	12,22,24
800	12,22
801	12,22
802	12,22

Tableau présentant les profils et les traces défectueuses



501_CMPS.spw

501 StackVel

501

501 StackVel

<< < > >> Add Row Del Row Add Sheet Del Sheet S

Line 501 Location 5898.000000 Cell Math Sheet 8 of 25

	Time	Velocity
1	24.305555	1480.000000
2	58.333332	1660.000000
3	84.375000	1760.000000
4	112.499992	1840.000000
5	140.972214	1920.000000
6	233.333313	2160.000000
7	280.902771	2260.000000

Exemple de tableau de vitesse pour le CMP 5898 du profil 501

501_Shera.spw

Add Row Del Row Save

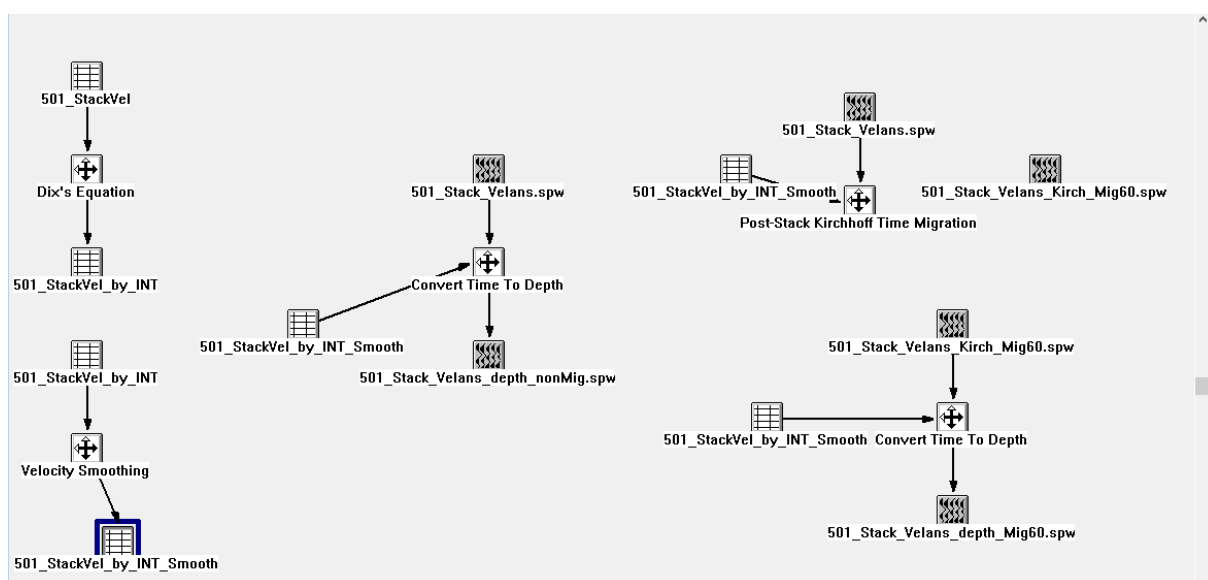
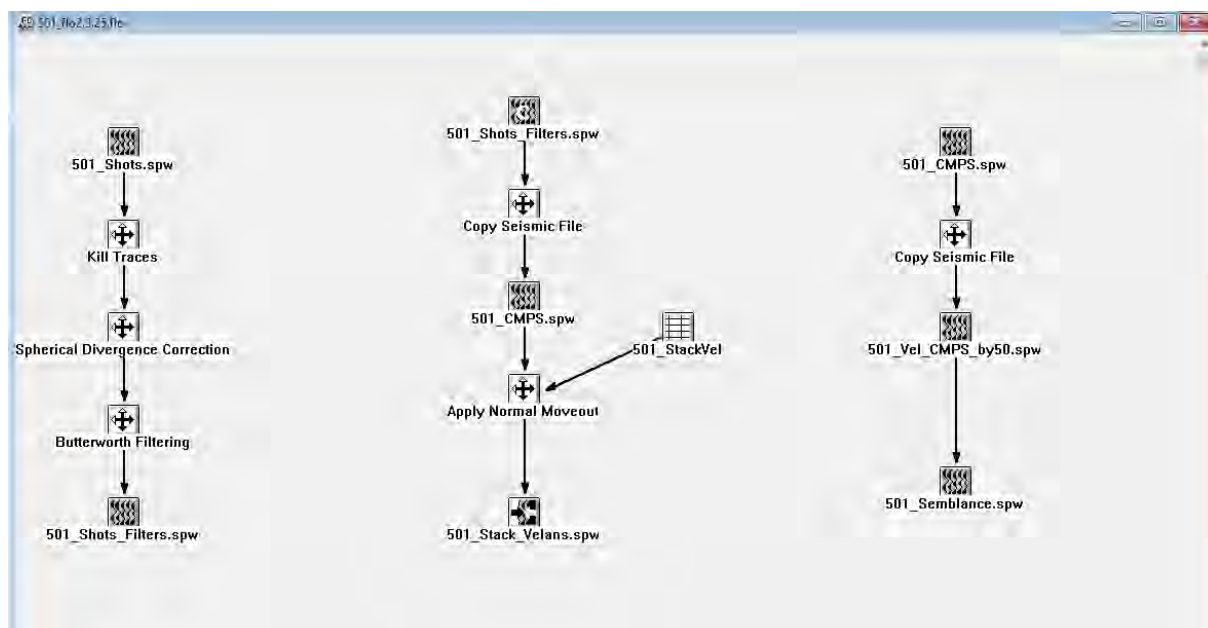
Cell Math

	Survey ID	CMP Line	CMP Location	Source Line	Source Location	Receiver Line	Rcv. Location	Field File	Trace Index	Channel Num.	FX Group	Trace Flags
1	501	5447.000000	501	5451	501	5443	5461	1	1			0
2	501	5446.000000	501	5451	501	5441	5461	2	2			0
3	501	5445.000000	501	5451	501	5439	5461	3	3			0
4	501	5444.000000	501	5451	501	5437	5461	4	4			0
5	501	5443.000000	501	5451	501	5435	5461	5	5			0
6	501	5442.000000	501	5451	501	5433	5461	6	6			0
7	501	5441.000000	501	5451	501	5431	5461	7	7			0
8	501	5440.000000	501	5451	501	5429	5461	8	8			0
9	501	5439.000000	501	5451	501	5427	5461	9	9			0
10	501	5438.000000	501	5451	501	5425	5461	10	10			0
11	501	5437.000000	501	5451	501	5423	5461	11	11			0
12	501	5436.000000	501	5451	501	5421	5461	12	12			0
13	501	5435.000000	501	5451	501	5419	5461	13	13			0
14	501	5434.000000	501	5451	501	5417	5461	14	14			0
15	501	5433.000000	501	5451	501	5415	5461	15	15			0
16	501	5432.000000	501	5451	501	5413	5461	16	16			0
17	501	5431.000000	501	5451	501	5411	5461	17	17			0
18	501	5430.000000	501	5451	501	5409	5461	18	18			0
19	501	5429.000000	501	5451	501	5407	5461	19	19			0
20	501	5428.000000	501	5451	501	5405	5461	20	20			0
21	501	5427.000000	501	5451	501	5403	5461	21	21			0
22	501	5426.000000	501	5451	501	5401	5461	22	22			0
23	501	5425.000000	501	5451	501	5399	5461	23	23			0
24	501	5424.000000	501	5451	501	5397	5461	24	24			0

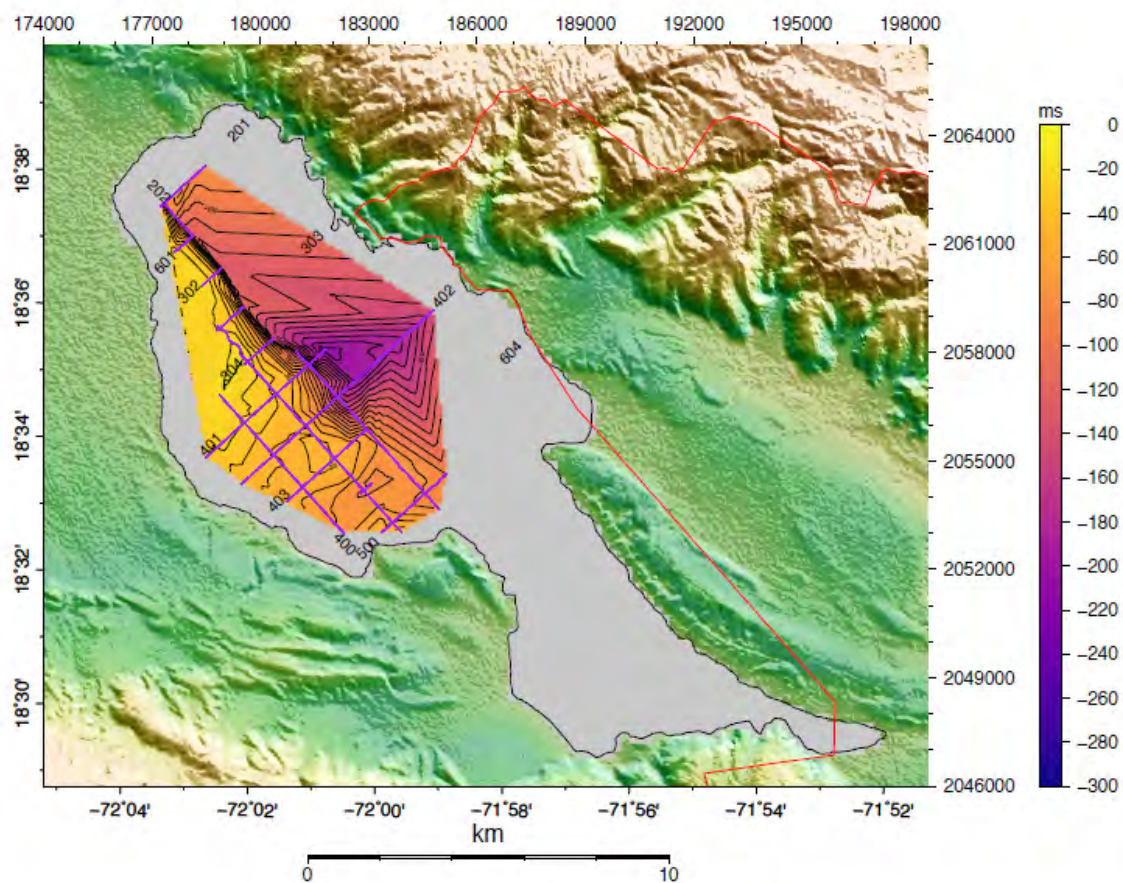
Cell Math												
	Gain	Fold	Offset	Static Time	Uphole Time	Source Depth	CMP Datum Elv	Rcv Datum Elv	Src Datum Elv	CMP Northing	CMP Easting	CMP Elevation
1	1.000000	0	12.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047935.000000	193925.000000	
2	1.000000	0	16.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047935.000000	193927.000000	
3	1.000000	0	19.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047935.000000	193929.000000	
4	1.000000	0	22.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047935.000000	193930.000000	
5	1.000000	0	25.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047936.000000	193932.000000	
6	1.000000	0	29.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047936.000000	193933.000000	
7	1.000000	0	32.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047936.000000	193935.000000	
8	1.000000	0	35.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047936.000000	193937.000000	
9	1.000000	0	38.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047936.000000	193938.000000	
10	1.000000	0	41.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047936.000000	193940.000000	
11	1.000000	0	45.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047936.000000	193941.000000	
12	1.000000	0	48.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047936.000000	193943.000000	
13	1.000000	0	51.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047936.000000	193945.000000	
14	1.000000	0	54.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047937.000000	193946.000000	
15	1.000000	0	58.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047937.000000	193948.000000	
16	1.000000	0	61.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047937.000000	193949.000000	
17	1.000000	0	64.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047937.000000	193951.000000	
18	1.000000	0	67.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047937.000000	193953.000000	
19	1.000000	0	70.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047937.000000	193954.000000	
20	1.000000	0	74.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047937.000000	193955.000000	
21	1.000000	0	77.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047937.000000	193957.000000	
22	1.000000	0	80.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047937.000000	193959.000000	
23	1.000000	0	83.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047938.000000	193962.000000	
24	1.000000	0	87.000000	0.000000	0.000000	0.000000		0.000000	0.000000	2047938.000000	193962.000000	

Cell Math												
	CMP Elevation	Rcv Northing	Rcv Easting	Rcv Elevation	Src Northing	Src Easting	Src Elevation	Velocity	CVS Panel	Azimuth Angle	Src Component	Rcv Component
1		2047936.000000	193932.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
2		2047936.000000	193935.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
3		2047936.000000	193938.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
4		2047936.000000	193941.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
5		2047936.000000	193945.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
6		2047937.000000	193948.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
7		2047937.000000	193951.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
8		2047937.000000	193954.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
9		2047937.000000	193957.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
10		2047938.000000	193961.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
11		2047938.000000	193964.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
12		2047938.000000	193967.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
13		2047938.000000	193970.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
14		2047938.000000	193974.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
15		2047939.000000	193977.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
16		2047939.000000	193980.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
17		2047939.000000	193983.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
18		2047939.000000	193986.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
19		2047940.000000	193990.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
20		2047940.000000	193993.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
21		2047940.000000	193996.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
22		2047940.000000	193999.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
23		2047940.000000	194003.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					
24		2047941.000000	194006.000000	15.000000	2047935.000000	193919.000000	15.000000					

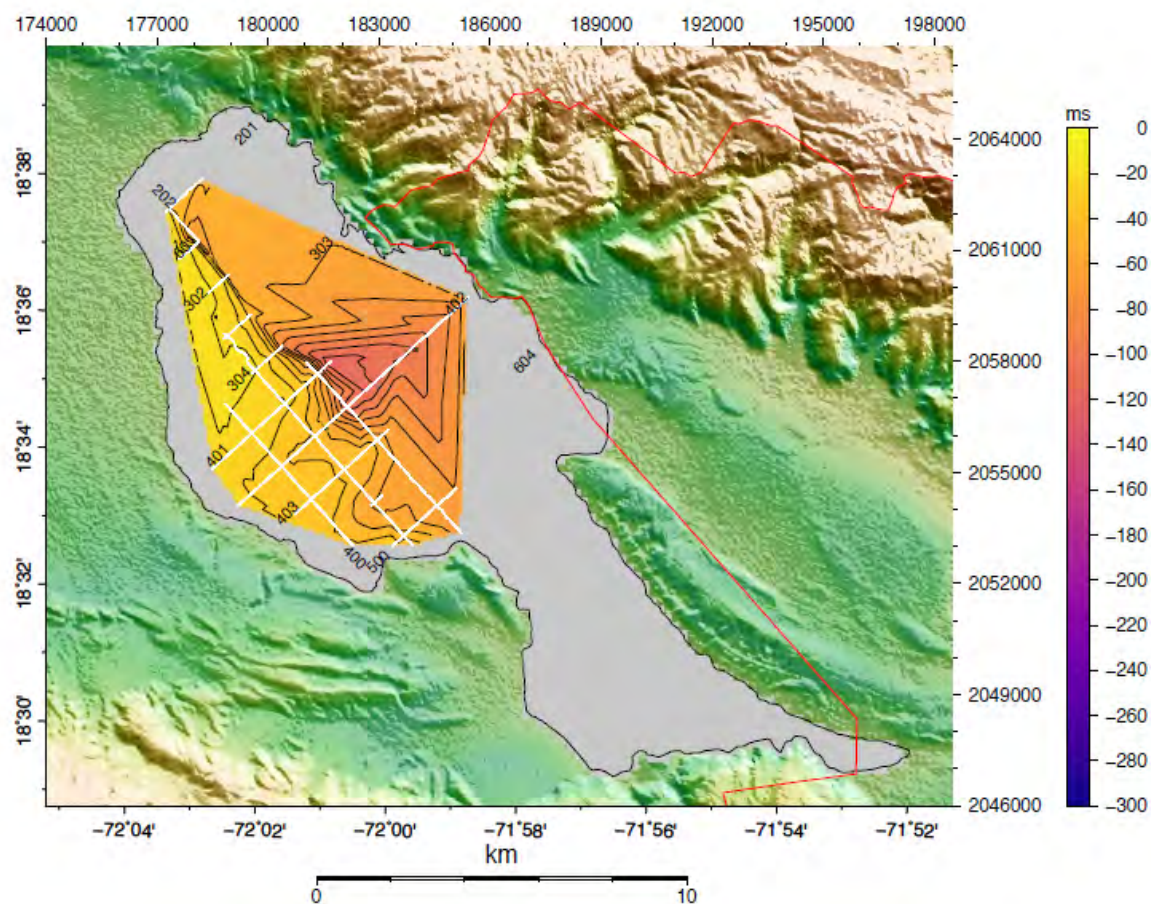
Exemple de certaines des informations que contient un fichier de format SEG-Y. Le format précis des fichiers SEG-Y est décrit là : https://seg.org/Portals/0/SEG/News%20and%20Resources/Technical%20Standards/seg_y_rev2_0-mar2017.pdf



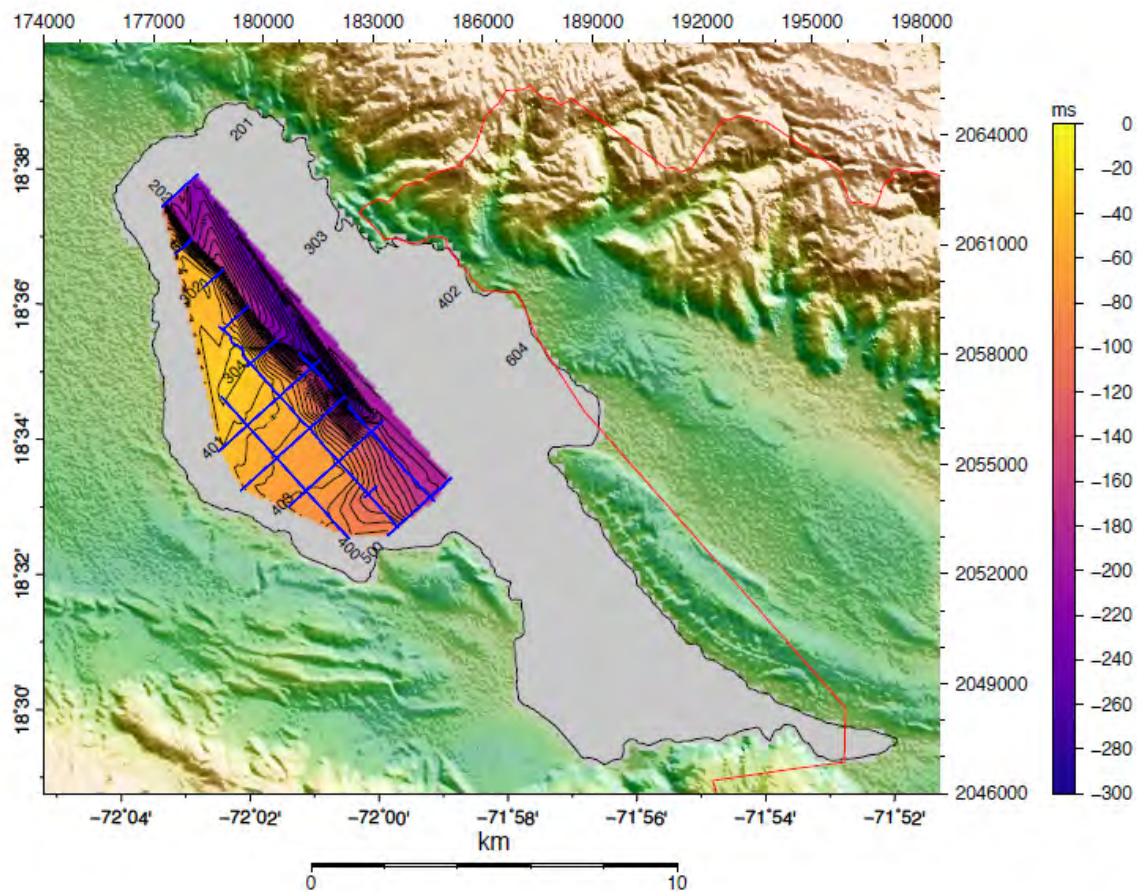
Exemple : les étapes de traitement appliquées au profil 501



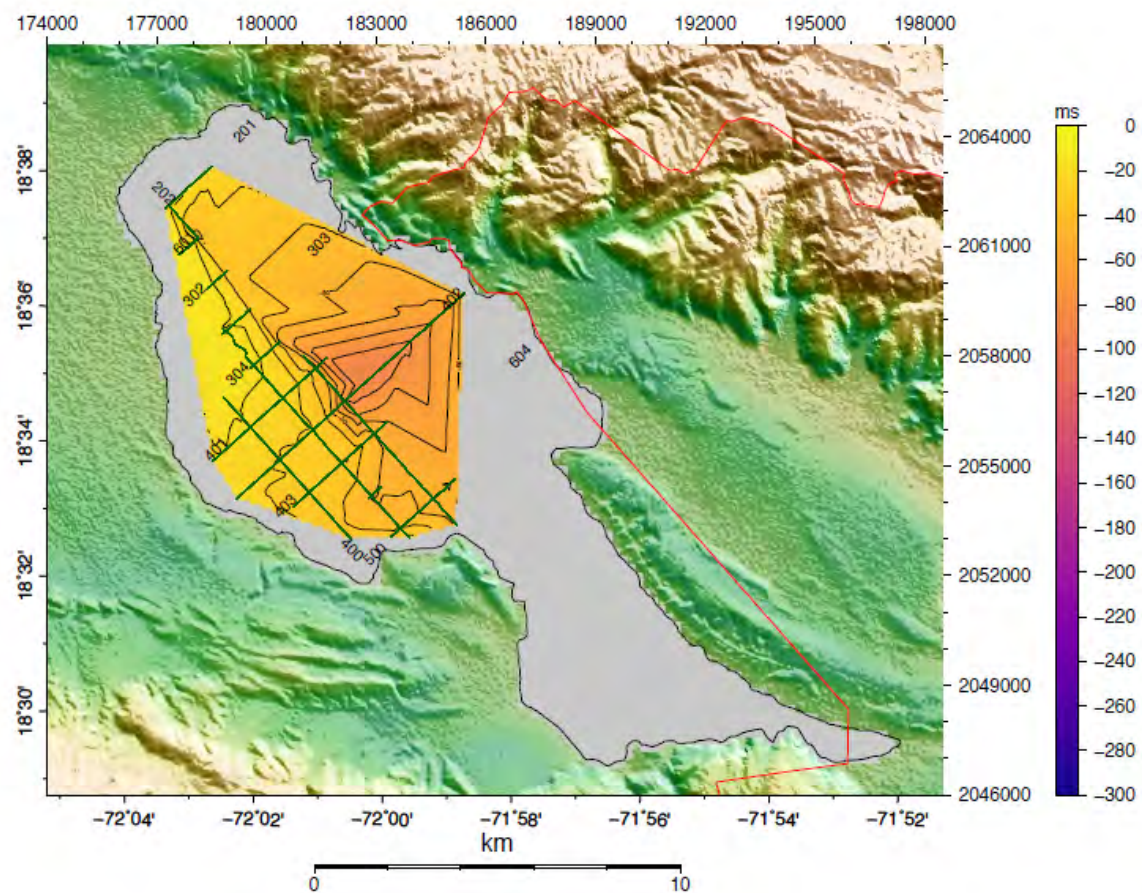
Carte de la surface de l'horizon sismique mauve, extrapolée à partir des profils. Les traits mauves indiquent là où une identification de cet horizon était possible.



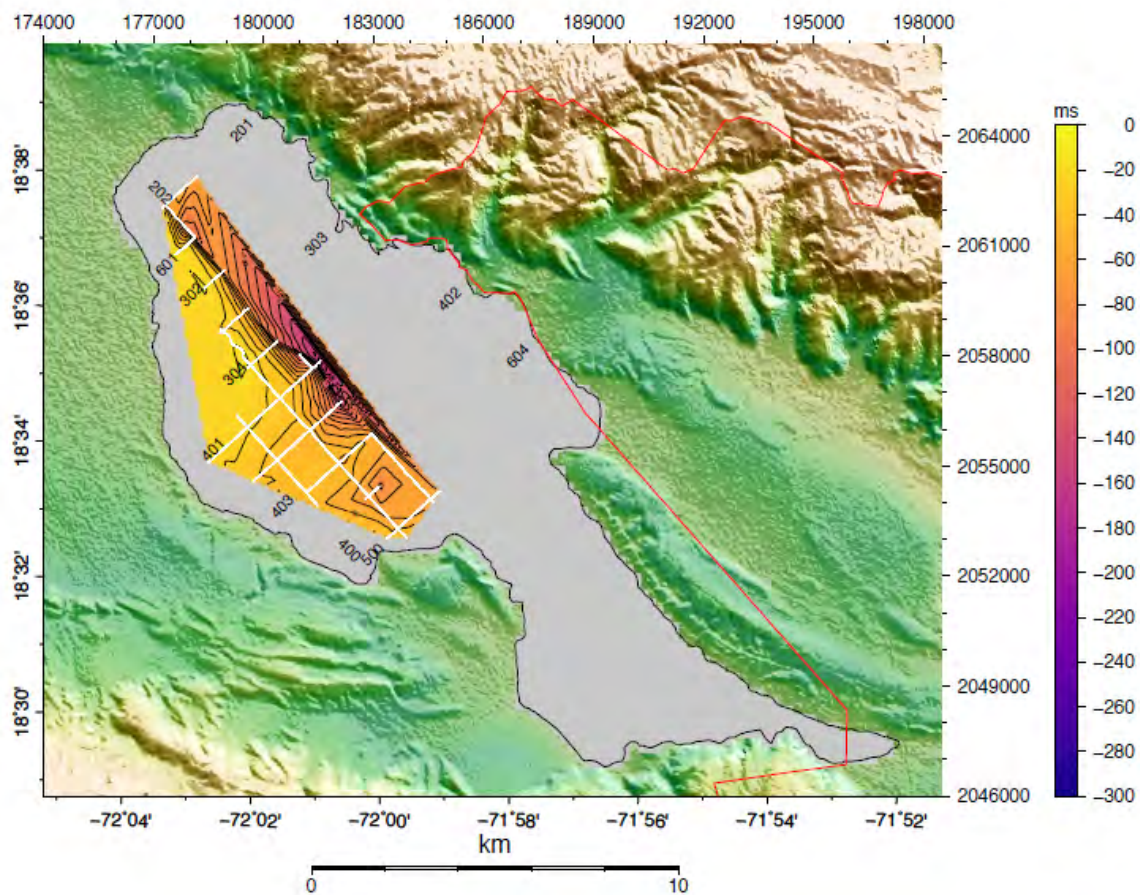
Carte de la surface de l'horizon sismique jaune, extrapolée à partir des profils. Les traits jaunes indiquent là où une identification de cet horizon était possible.



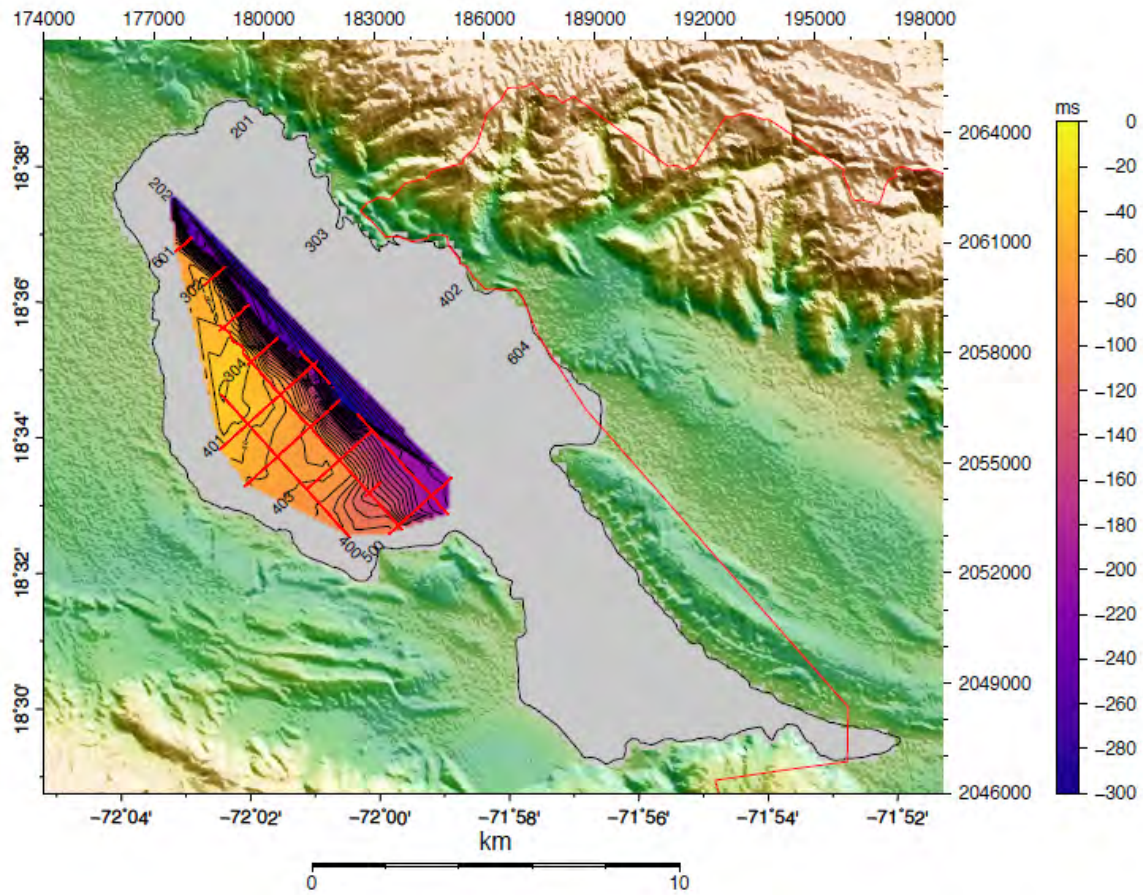
Carte de la surface de l'horizon sismique bleu, extrapolée à partir des profils. Les traits bleus indiquent là où une identification de cet horizon était possible.



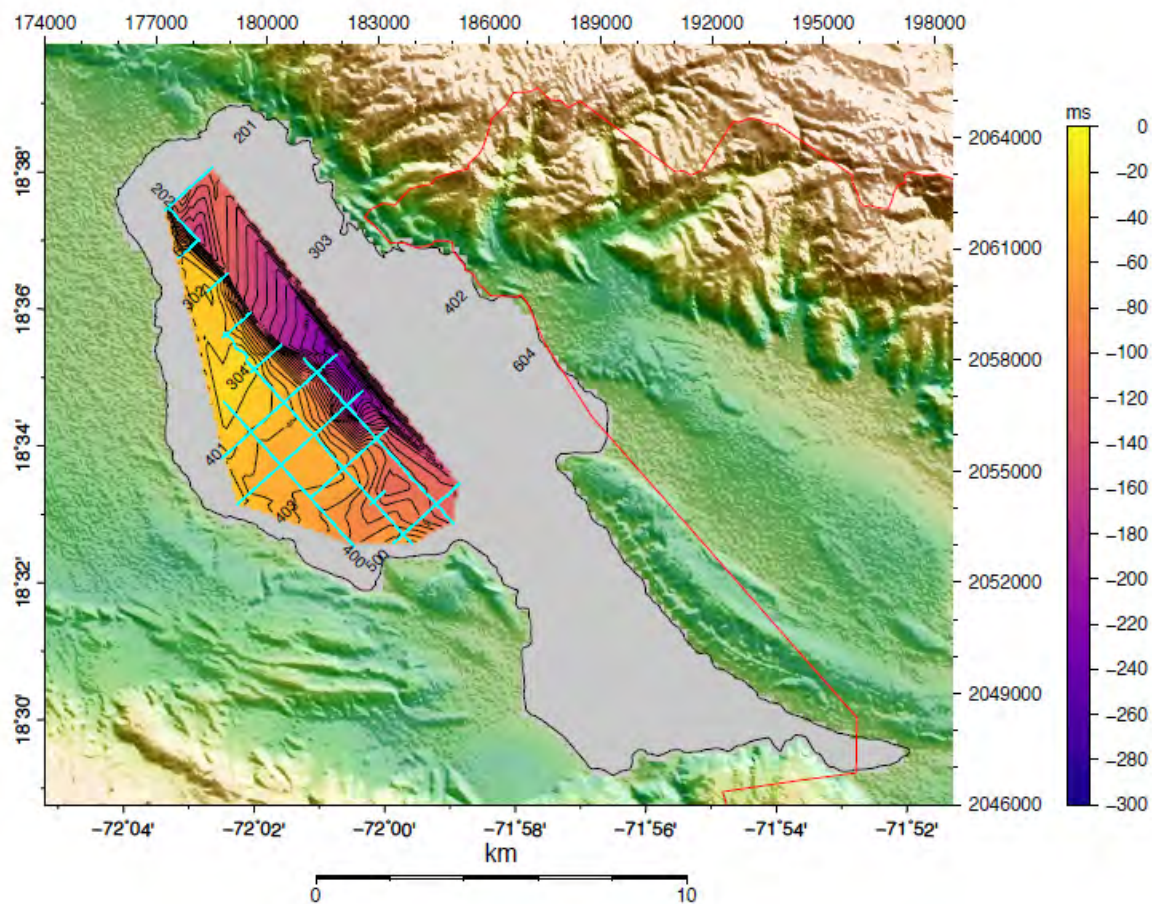
Carte de la surface de l'horizon sismique vert, extrapolée à partir des profils. Les traits verts indiquent là où une identification de cet horizon était possible.



Carte de la surface de l'horizon sismique orange, extrapolée à partir des profils. Les traits blancs indiquent là où une identification de cet horizon était possible.



Carte de la surface de l'horizon sismique rouge, extrapolée à partir des profils. Les traits rouges indiquent là où une identification de cet horizon était possible.



Carte de la surface de l'horizon sismique cyan, extrapolée à partir des profils. Les traits de couleur cyan indiquent là où une identification de cet horizon était possible.