

Retour d'expérience sur l'évolution des méthodes géophysiques pour construire un modèle de sol en mer, utilisable pour des projets géotechniques

Feedback on geophysical methods used to build ground model in offshore, applying to geotechnical projects

Christophe VERGNIAULT¹, Sylvain POULIQUEN¹

¹ EDF-DI-TEGG, 905, Avenue du camp de Menthe Cedex 02, 13097 Aix-en-Provence, FRANCE
christophe.vergniault@edf.fr, sylvain.pouliquen@edf.fr

Résumé. Cet article détaille l'évolution des méthodes de caractérisation géophysique du sous-sol marin en s'appuyant sur une série d'exemples d'acquisition de données EDF. En environnement structural complexe, là où les méthodes géophysiques classiques (Réfraction, MASW, ...) ne suffisent pas, EDF utilise de plus en plus l'imagerie par sismique réflexion afin d'accéder au modèle géométrique du sous-sol. Dans un premier temps, les choix d'EDF se sont tournés vers la combinaison de l'imagerie d'un sondeur de sédiments et d'un dispositif sismique plus pénétrant mais également monotrace. Rapidement le constat a été fait que ces dispositifs ne permettaient pas d'obtenir un rapport signal sur bruit suffisant. EDF s'est alors orienté vers des acquisitions sismiques 2D multi-trace et enfin, depuis peu EDF s'intéresse à la réalisation de mini-bloc 3D de très haute résolution. L'apport de ce type de données est sans comparaison en offrant la possibilité de cartographier en 3D les potentiels aléas géologiques impactant les travaux souterrains en mer.

Summary. This article shows the evolution of geophysical methods used to build an offshore geomodel. It is based on a series of EDF in-house examples. In complex structural environment, where conventional geophysical methods such as refraction or MASW are not efficient, EDF is increasingly using seismic reflection imaging to access the geometry of geological feature. Initially, EDF's choices turned to the combination of imaging from a sub bottom profiler and a single trace low frequency seismic device. It was noted that these devices did not provide a sufficient signal-to-noise ratio. EDF then moved towards multi-trace 2D seismic acquisitions and recently, EDF start using very high-resolution 3D seismic cube. The benefit of this type of data is significant by offering the possibility to map in 3D the "geohazards" impacting offshore underground works.

1 Introduction

La construction d'un modèle du sous-sol (ground model) se base généralement sur la combinaison de mesures invasives (géotechniques et géophysiques en forage) et non invasives (géophysique de surface). Il y a dix ans et plus, les mesures non invasives les plus fréquemment mises en œuvre pour ces problématiques en mer étaient la sismique par réfraction et par ondes de surface (MASW), que ce soit avec un dispositif tracté ou coulé sur le fond de l'eau, en fonction du contexte.

Toutefois, en environnement complexe (faille, présence d'une formation lente en profondeur, fort pendage des structures, variations latérales fréquentes, paléo-chenal) ces méthodes peuvent être en limite d'utilisation. Par exemple :

- La sismique réfraction 2D reste un bon compromis entre qualité et prix pour définir la géométrie du toit du substratum. Cependant, elle ne détecte pas les inversions de vitesse et difficilement les discontinuités très redressées.
- Les ondes de surface (MASW) permettent d'accéder à un paramètre utile pour les calculs dynamiques par la vitesse des ondes de cisaillement. De plus, dans une certaine mesure, elles sont sensibles aux inversions de vitesse. Néanmoins, la résolution est trop faible pour imager finement une structure avec précision.

Depuis plusieurs années, EDF s'intéresse de plus en plus à l'imagerie de sismique réflexion afin d'accéder à un modèle géométrique du sous-sol (image des structures). Par rapport aux acquisitions terrestres, l'avantage des acquisitions marines est qu'il n'y a pas de zone hors nappe qui filtre fortement les hautes fréquences et il est donc possible d'utiliser des sources très haute fréquence permettant d'atteindre une résolution décimétrique, même en ondes P. Dans un premier temps, cette démarche s'est appuyée sur la combinaison de l'imagerie d'un sondeur de sédiment et de dispositif sismique monotracer (type sparker ou boomer). Toutefois, très vite le constat a été fait que ces dispositifs ne permettent pas d'exploiter toutes les capacités des méthodes de traitements sismiques (amélioration du rapport signal sur bruit par addition de multiples traces), correction de l'effet de la houle, atténuation des multiples, etc... EDF s'est alors orienté vers des acquisitions sismiques 2D multi-trace avec un canon à air de faible volume ou un sparker. Enfin, afin de pallier aux évolutions inévitables des tracés des projets de constructions, au besoin de précision de l'organisation des structures dans l'espace, depuis peu EDF s'intéresse à la réalisation de mini-bloc 3D de haute résolution. L'apport est sans comparaison avec la possibilité de cartographier en 3D les réseaux de fractures ou failles ainsi que les paléo-chenaux qui présentent des risques à prendre en compte pour les travaux souterrains en mer.

L'objectif de cet article est d'illustrer la chronologie de cette progression méthodologique par une série d'exemples. Toutefois, il est à noter que l'atténuation des réflexions multiples demeure un verrou et dans de très faibles tranches d'eau la réalisation de complément d'acquisition par sismique réfraction coulée peut s'avérer utile.

Afin de répondre à l'objectif posé, cet article est construit de la façon suivante. Dans un premier temps on trouvera des généralités sur l'ensemble des méthodes exploitées. Puis un deuxième chapitre sera consacré à la comparaison des méthodes à partir d'une série d'exemple dans des contextes comparables.

2 Panorama des méthodes sismiques utilisées

La propagation des ondes mécaniques est à la base de différentes méthodes d'imagerie (réfraction, réflexion, MASW). Chaque méthode est basée sur une simplification qui permet

de se focaliser sur un mode de propagation spécifique de l'énergie sismique et cela apporte des informations différentes sur le sous-sol.

La sismique réfraction, est basée sur l'analyse des premières arrivées des ondes sismiques (P ou S , selon le type de source). Chaque trace sismique est réduite à une seule valeur numérique, le temps de pointé de la première arrivée. Dans la plupart des approches de traitement en réfraction même les plus complètes (Palmer, 1981), le sous-sol est traité comme une série de couches homogènes dans lesquelles se propagent des rais sismiques. L'approximation d'un modèle en couche peut être assouplie en utilisant la tomographie par tracé de rais (Rawlinson et al., 2010).

Les travaux menés sur cette méthode (Vergnault et al., 2019) ont montré que la sismique réfraction reste un bon compromis qualité / prix dans l'objectif de définir la géométrie du substratum. La méthode d'acquisition à mettre en œuvre (base fixe, base glissante) dépendra du contexte et de l'objectif, ce qui influera sur la méthode d'analyse (Délais, Tomographie). Lorsque le nombre de tir est limité, la méthode des Délais est à préconiser, à condition d'avoir des tirs déportés de qualité. Dans le cas contraire, il faut préférer la tomographie. Elle est aussi à préconiser pour des approches de grand rendement.

L'analyse multicanal des ondes de surface s'est largement démocratisée grâce à la méthodologie MASW proposée par Park et al. (1999). Toutefois, l'analyse des ondes de surface se base sur une hypothèse forte d'un modèle 1D en couches et réduit chaque tir sismique à une ou plusieurs courbes de dispersion du mode fondamental et des modes supérieurs des ondes de surface. La profondeur d'investigation des ondes de surface est aussi limitée par la fréquence la plus basse pouvant être générée par la source ou enregistrée au récepteur. Les travaux menés sur cette méthode (Vergnault et al. 2018, Vergnault et al. 2019) ont montré qu'une approche pseudo-2D est également intéressante de façon qualitative pour identifier des anomalies majeures avec une production élevée (grand rendement). En revanche, pour imager finement des accidents géologiques ou une structure spécifique, la résolution de la méthode MASW est trop faible pour être un outil probant.

Il est à noter que l'interférence des ondes de Rayleigh avec une cavité plus petite que la longueur d'onde du signal va se traduire par une diffusion revenant vers la source d'une partie des ondes. C'est le phénomène dit de « backscattering » qui se traduit sur un enregistrement sismique (sismogramme) dans le domaine temporel par une hyperbole. Plusieurs techniques sont décrites dans la littérature pour mettre en valeur ces hyperboles. Dans le cadre de la gestion des risques liés à l'aléa cavités sur des ouvrages de grands linéaires en contexte ferroviaire et hydraulique, la méthode BackScattering Analysis (BSA) de Park (2015) a été validée (Vergnault et al., 2022) sur 15 à 20 m de profondeur.

La sismique réflexion est la méthode sismique la plus utilisée en géophysique pétrolière ou marine et la moins utilisée en géophysique appliquée au génie-civil à terre. En effet, contrairement aux acquisitions terrestres, en marine il n'y a pas de problématique liée aux terrains hors nappe qui filtrent fortement les hautes fréquences et il est donc possible d'utiliser des sources de très haute fréquence permettant d'atteindre une résolution décimétrique.

La sismique réflexion en couverture 1

Les sondeurs de sédiments (Sub Bottom Profiler, SBP) sont des équipements acoustiques (plage entre 1 kHz et 10 kHz) utilisés pour visualiser les strates sédimentaires jusqu'à 5 à 10 mètres de profondeur. Le signal peut-être un balayage en fréquence, analogue à celui d'un camion vibreur, on parle alors de Chirp ou bien ponctuel à l'aide d'un ou plusieurs

transducteurs (pingers). De par leur taille, ces dispositifs sont faciles à mettre en œuvre sur tout type d'embarcation. De plus, étant compact et fixe sur l'embarcation, les corrections de houle sont relativement faciles en se basant sur la position GPS du navire en deux points.

Les sources sismiques à proprement parler de type « boomeur » et « sparker », sont basées respectivement sur une membrane acoustique et un arc électrique. Elles sont généralement couplées à un ensemble de quelques hydrophones protégés à l'intérieur d'une gaine (flûte), dont les signaux sont enregistrés sur une seule voie (ce qui est destructeur en cas de houle). On considère donc que le dispositif est un dispositif monotracer, dont la couverture est de 1.

Il est à noter que bien souvent, des acquisitions basiques ne permettent pas de réaliser les corrections de la houle et de la marée avant sommation. Pourtant ceci serait possible en enregistrant les canaux séparément et en appliquant alors les méthodologies de corrections présentées avec les acquisitions à couverture multiple. Sinon a posteriori, il est possible de corriger en temps chaque trace de l'enregistrement sismique par comparaison de l'enregistrement sismique avec celui d'un échosondeur synchrone et lui corrigé de la houle et des marées.

La sismique réflexion en couverture multiple

La sismique marine Haute Résolution combine une flûte avec une série de récepteurs (multitracer), une source puissante et de haute fréquence (sparker ou canon avec un faible volume). Ceci lui confère un pouvoir de résolution élevé associé à une pénétration de quelques centaines de mètres en fonction de la nature des sols.

A cela, si on ajoute des récepteurs D-GPS en tête et queue de flûte, on a alors une position relativement précise du dispositif qui permet de réaliser bien plus de corrections. Toutefois, cette méthode demande une expertise en traitement des données (corrections de houle et marées, sommation des traces dont le CMP est dans un même pixel, atténuation des multiples, analyse des vitesses NMO et mute). On note également qu'en sismique réflexion, l'estimation des vitesses est un sous-produit du traitement. En proche surface, cette estimation des vitesses est certes souvent trop imprécise et de trop faible résolution pour répondre à des besoins pratiques, néanmoins elle peut être utile pour confirmer des anomalies.

La sismique réflexion en 3D

En tractant simultanément plusieurs flûtes sismiques parallèles, l'acquisition des données se fait alors dans les 3 dimensions. Avec des moyens de traitement conséquent, cette technologie permet alors de construire non plus des coupes 2D, mais un vrai bloc 3D du sous-sol. Son interprétation permet de générer des cartes structurales des niveaux clés du sous-sol, de suivre précisément la propagation d'un plan de faille, et de cartographier précisément le trajet d'un paléo-chenal.

3 Comparaison des méthodes

Cas d'étude N°1. L'objet ici est d'illustrer la différence entre les dispositifs compacts en couverture simple et ceux longs en couverture multiple.

Le premier site d'étude situé en mer du Nord, est caractérisé par une formation sableuse en surface (incluant localement des dunes) et reposant sur un substratum argileux (argile des Flandres).

La colonne d'eau est d'environ 15-20 m et l'épaisseur de la formation sableuse est comprise entre 8 et 16 m.

La même ligne a pu être reconnue par 2 dispositifs sismiques distincts :

- Le 1^{er} dispositif est un sondeur de sédiments (SBP) de type pinger 3.0 khz (Neptune Sonar Limited) (Fig. 1a).
- Le 2^{ème} dispositif est un dispositif multi-trace (Fig. 1b) composé d'une flûte (111 m) de 48 hydrophones espacés de 1.56 m (1-24) et de 3.125 m (25-48). La source est un canon à air (airgun) de faible volume (5 ci).

La figure 1 illustre la comparaison entre ces 2 types d'acquisitions. Elle permet de constater que la signature de l'image avec le SBP est fortement affectée par du bruit, ce qui ne permet pas d'identifier correctement les marqueurs sismiques superficiels même pour des temps très courts, avant l'écho multiple du fond de l'eau (multiple) qui est entre 60 et 70 ms (TWT). En comparaison, la signature de l'image avec le canon à air présente un bon rapport signal sur bruit, de plus basse fréquence, et le traitement multi-trace réalisé a permis d'atténuer les multiples. Le marqueur du contact sable argile est parfaitement identifiable vers 37 ms TWT. On devine la structuration dans l'argile des Flandres et un marqueur net apparaît à l'intérieur de la dune.

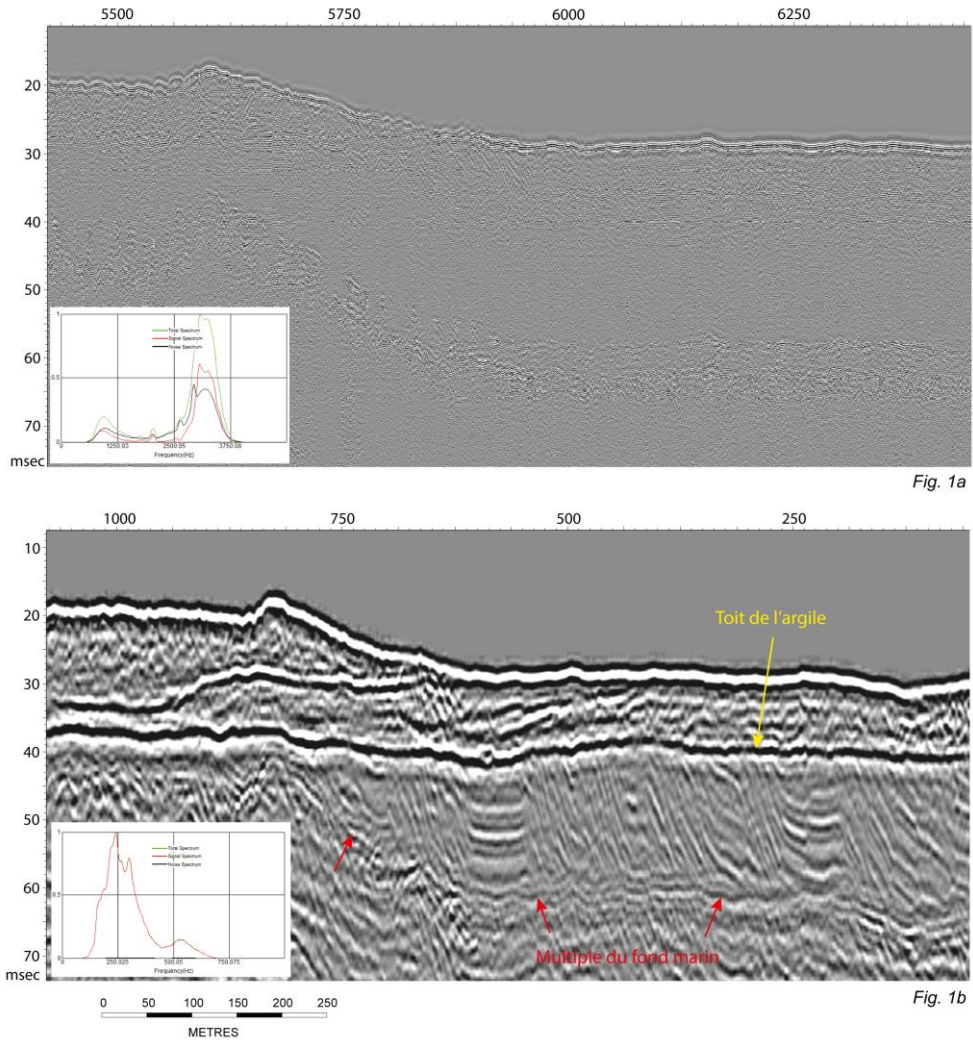


Figure 1 : Comparaison d'un profil acquis au SBP (Pinger 3.0 khz) et en sismique 2D multi-traces (airgun,5 ci)

Cas d'étude N°2. L'objet ici est d'illustrer l'importance de la phase de traitement sur un même jeu de données.

Ce deuxième site d'étude est caractérisé par du sable marin reposant directement sur un substratum tertiaire argilo-sableux.

En comparaison avec le site n°1, la colonne d'eau est beaucoup plus faible avec moins plus 50 m à gauche de la figure 2.

Le dispositif d'acquisition est composé d'une flûte de 72 m de long (48 hydrophones espacés de 1 m (1-24) et 2 m (25-48)). La source utilisée lors de cette acquisition est un sparker (600 J). Concernant le positionnement, en complément du positionnement du navire, le dispositif était composé de 2 bouées DGPS en tête et en queue de flûte.

La figure 2 illustre la comparaison entre 2 traitements effectués sur un même jeu de donnée. Cette figure permet d'illustrer la plus-value de prendre en considération précisément dans le traitement la position de la source et de la flûte en plusieurs points. Ceci permet de corriger les effets de la houle par des corrections de type statiques primaires (Fig. 2a). Malgré tout, pour exploiter les très hautes fréquences générées par le sparker, des corrections statiques résiduelles sont nécessaires (Fig.2b). En effet dans le traitement final, RockWave (Fig. 2b) réussi à utiliser l'ensemble de la bande passante présente dans les données. L'image finale est donc de plus haute résolution que celle du traitement initial.

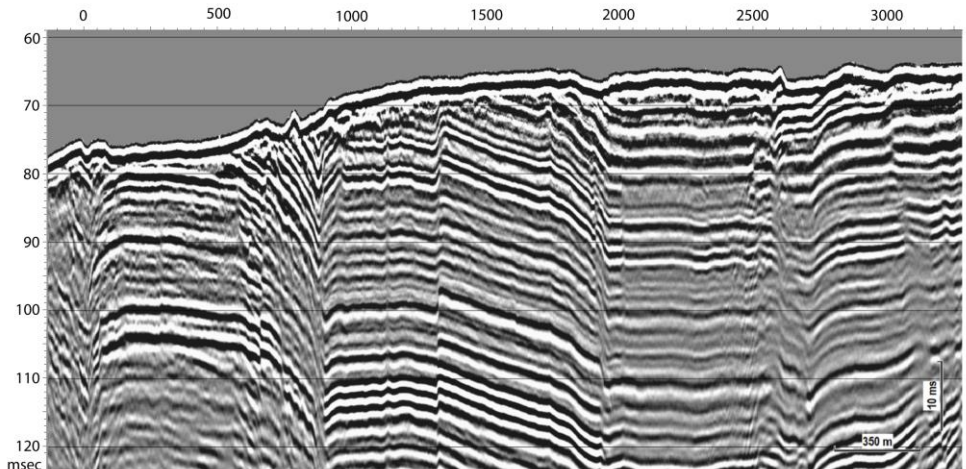


Fig. 2a

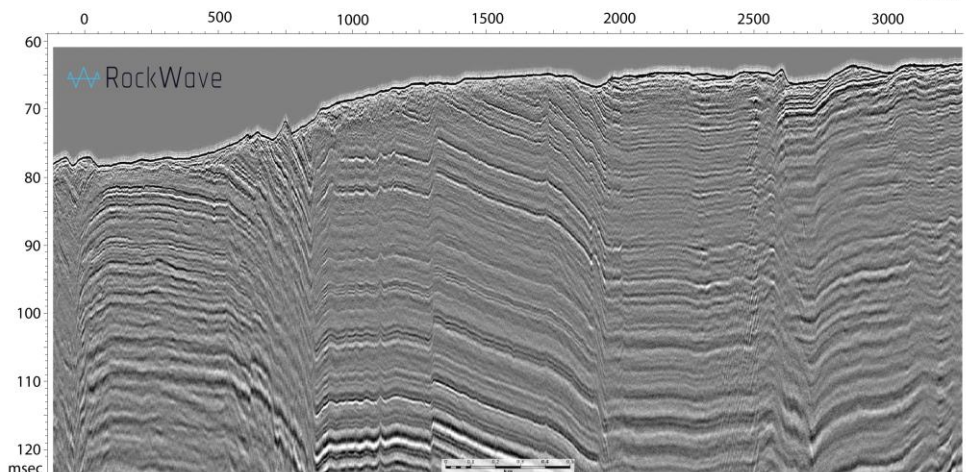


Fig. 2b

Figure 2 : Comparaison entre 2 traitements réalisés sur un même jeu de donnée (sparker multi-trace).

Enfin, il est important de mentionner un point de vigilance sur le fait que trop fréquemment l'effet de la houle, des marées, n'est absolument pas pris en compte pour les acquisitions sismiques en couverture simple, notamment car elles sont plus simples de mise en œuvre et donc accessibles à des sociétés moins expertes en sismique marine que ce soit en acquisition ou traitement (Fig. 3).

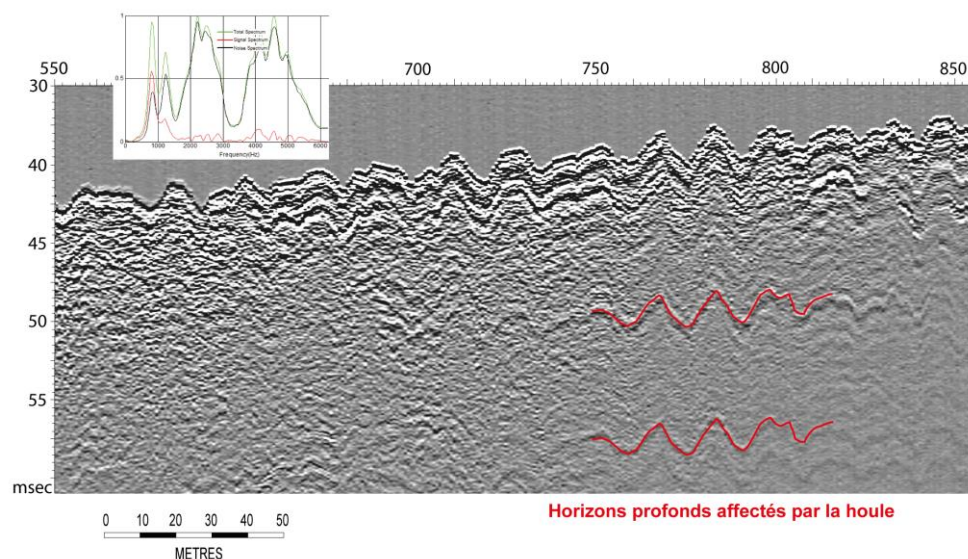


Figure 3 : Exemple d'acquisition sparker monotrace (sparker 150 J, 8 canaux espacés de 1 et directement sommés en 1). En profondeur on voit que tous les marqueurs sont affectés par des ondulations en phase, qui sont liées à la houle ou aux vagues.

Cas d'étude N°3. L'objet ici est d'illustrer l'importance du choix de la source même pour une sismique en couverture multiple et un traitement complet.

Ce troisième site d'étude est caractérisé par un vernis de sable marin reposant directement sur un substratum crayeux. Localement on peut voir se dessiner sur la zone une vallée quaternaire certainement remplie de craie remaniée, de silex et de sable marin.

La tranche d'eau est d'environ 17 m et l'épaisseur de la formation sableuse de 7 m.

Dans cet exemple la même route a pu être reconnue par 2 dispositifs d'acquisition sismique distincts :

- La première ligne a été acquise avec une flûte de 48 hydrophones espacés de 1.56 m (1-24m) et 3.125m (25-48) couplée à un « airgun » 10 ci (Fig. 4a).
- La seconde ligne correspond à une ligne extraite d'un bloc 3D acquis avec un dispositif tracté incluant 4 flûtes de 7 m (espacement entre hydrophone de 1 m) associé à un sparker de faible puissance (300 J) tirant avec une fréquence 4 Hz (Fig.4b).

La figure 4 de comparaison des sources permet de constater la plus-value de mettre en œuvre une source haute fréquence de type sparker avec une fréquence de tir. En surface la résolution verticale atteint les 15-20 cm. Il est à noter que sous le premier multiple du fond de l'eau, malgré ces corrections statiques résiduelles, il est encore difficile de conserver les très hautes fréquences. En effet, l'atténuation du multiple se déroule correctement dans les basses fréquences, mais à tendance à rajouter du bruit dans les hautes fréquences.

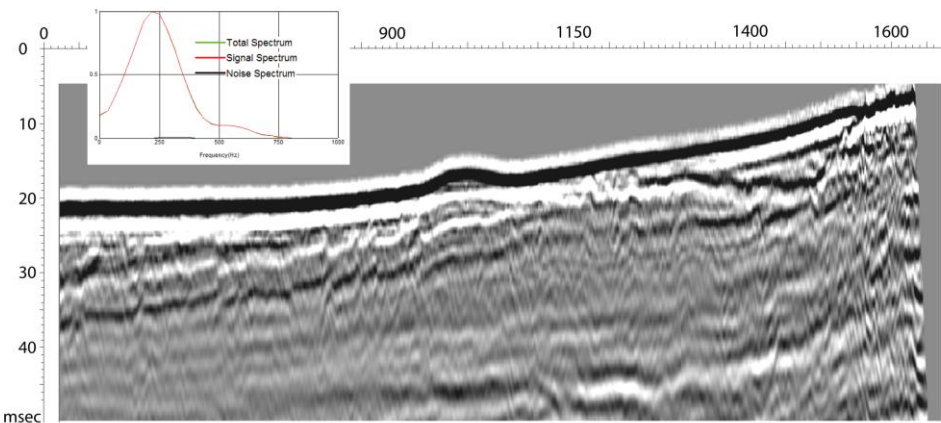


Fig.4a

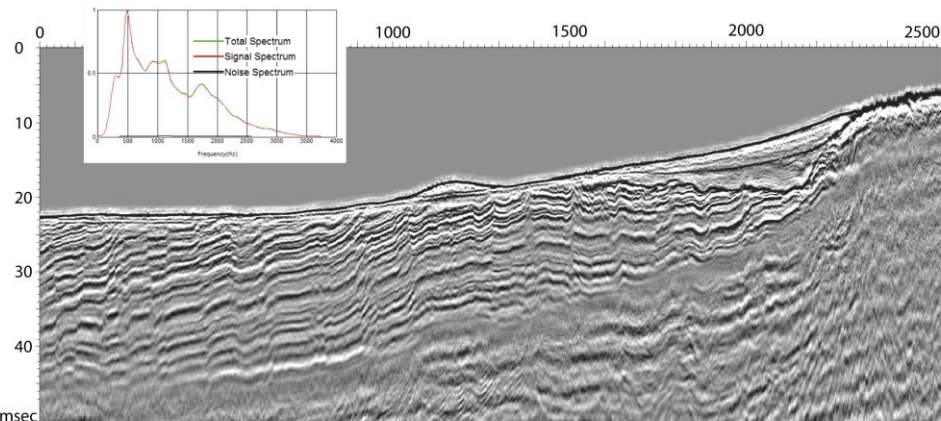


Fig.4b



Figure 4 : Exemple d’acquisition multi-trace airgun (haut) vs sparker (bas)

Cas d’étude N°4. L’objet ici est d’illustrer l’apport d’une approche 3D d’ultra haute résolution (UHR).

Le site est le même que celui du cas précédent, à savoir caractérisé par un substratum crayeux.

La plus-value d’une approche 3D UHR est de permettre d’améliorer fortement la compréhension de l’organisation en 3D des structures et donc de mieux caractériser les aléas géologiques pouvant impacter un projet de génie-civil en contexte maritime quel qu’il soit (tunnel, puit de rejet, fondation d’éolienne, etc...). La figure 5 représente l’extraction de l’amplitude du cube 3D de cohérence le long d’un niveau structural de surface (environ 10-15 ms) sous le fond marin. Ce type d’attribut sismique permet de visualiser très précisément le schéma de faille et de fracturation très dense sur la zone d’étude.

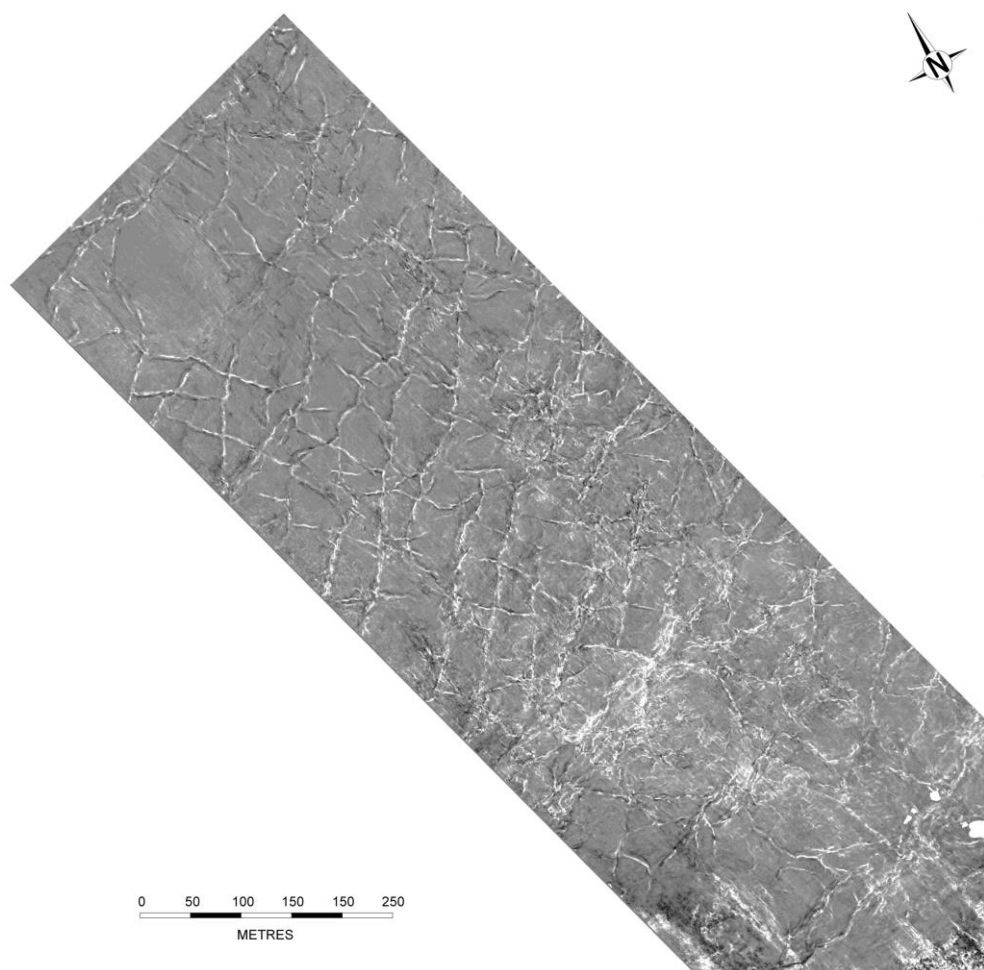


Figure 5 : Exemple d'horizon slice extraite du cube de cohérence au toit d'un horizon clé

4 Conclusion

A travers cette série d'exemples, il a été possible d'illustrer qu'aujourd'hui pour des environnements complexes (faille, présence d'une formation lente en profondeur, fort pendage des structures, variations latérales fréquentes, paléo-chenal) la sismique réflexion en 2D et 3D est pertinente pour des projets de génie-civil. Toutefois, le choix des matériels et du traitement à réaliser sont des paramètres clés qui peuvent changer du tout au tout le résultat. Le traitement des données de sismique réflexion multi-trace est un métier à part entière, il apparaît donc indispensable de confier cette tâche à des entreprises spécialisées dans le traitement de ces données.

Enfin, l'atténuation des multiples du fond marin demeure un vrai challenge. Et dans les très faibles tranches d'eau la réalisation de complément d'acquisition par sismique réfraction coulée peut toujours s'avérer utile.

Références

- 1 Palmer D., 1981, An Introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation: *Geophysics*, **46**, no. 11, 1508-1518, doi: 10.1190/1.1441157.
- 2 Park C. B., Miller R. D. and Xia J., 1999, Multichannel analysis of surface waves: *Geophysics*, **64**, no. 3, 800-808, doi: 10.1190/1.1444590.
- 3 Park C.B., 2015, Back scattering analysis (BSA) and Common Offset (CO) Sections, ParkSeis User Guide (free access on www.parkseismic.com).
- 4 Rawlinson N., Pozgay S., Fishwick S., 2010, Seismic tomography: A window into deep Earth. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 178(3), 101-135.
- 5 Vergniault C., Dubié F., Girard B., Rénalier F., 2018, Retour d'expérience sur l'utilisation des méthodes géophysiques par ondes de surface (MASW et bruit de fond) pour les études de stabilité dynamique des digues du canal de la Durance, Colloque CFBR 2018.
- 6 Vergniault C., Strobbia C., Deida G.P., Dupuy D., 2019, Comparaison des méthodes sismiques de surface, afin d'imager les premiers décimètres du sous-sol, Journées scientifiques de l'AGAP 2019.
- 7 Vergniault C., Buchoud E., Boisson-Gaboriau J., Hallier A., 2022, Application des méthodes géophysiques pour le diagnostic de l'aléa cavités sur des ouvrages de grands linéaires, en contexte ferroviaire et hydraulique, *Revue Française de Géotechnique* (en révision).