
Sismique très haute résolution 3D : une nouvelle méthode d'imagerie des sols superficiels

Tania Marsset^{*, a}, Bruno Marsset^b, Yannick Thomas^b and Stéphane Didailler^b

^a Ifremer, DRO/GM/LES, BP 70, 29260 Plouzané, France

^b Ifremer, TMSI/AS, BP 70, 29260 Plouzané, France

*: Corresponding author : tmarsset@ifremer.fr

Résumé:

Cette note présente les premiers résultats du développement d'une méthode de reconnaissance sismique très haute résolution (THR) 3D. Une attention particulière a été portée à la réalisation d'un système opérationnel en adéquation avec les objectifs visés, en termes de mise en œuvre et de traitement. Trois exemples de volumes 3D sont présentés, dans différents contextes géologiques.

Mots clés: Sismique, THR, 3D, Imagerie

Pour citer cet article : *T. Marsset et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 403–408.*

Introduction

Tant du point de vue du géophysicien (acquisition, traitement) que du point de vue du géologue (interprétation), la réalité physique du terrain est éminemment 3D. L'objectif du développement d'une méthode de reconnaissance sismique Très Haute Résolution (THR) 3D est de prendre en compte cette réalité terrain, l'échelle abordée étant l'échelle de la reconnaissance de détail (quelques km²).

Dans l'acquisition de profils sismiques 2D, les événements provenant hors du plan d'acquisition sont interprétés comme du bruit (échos latéraux). Dans le cas 3D, tous les événements sismiques enregistrés correspondent à un signal qui doit permettre d'imager correctement les structures ; les signaux provenant hors du plan d'acquisition peuvent être focalisés et contribuent ainsi à améliorer la résolution des images sismiques. L'acquisition de profils sériés 2D est couramment employée pour réaliser une interprétation pseudo 3D, néanmoins l'espacement des profils entraîne une grande disparité de l'échantillonnage spatial et l'interprétation 3D de ces données s'en trouve biaisée, voire impossible.

Le premier intérêt des données sismiques 3D est de fournir par imagerie un volume sismique permettant l'interprétation 3D des structures et des couches sédimentaires à l'aide d'outils interactifs de piqué d'événements. L'exploitation des volumes de sismique 3D conventionnelle (pétrolière), ne se limite pas à ce premier stade d'interprétation et permet la construction de réels modèles numériques de terrain à travers le calcul d'attributs sismiques sur le volume sismique traité et leur corrélation avec des données issues de mesures in situ. Néanmoins, les contraintes d'acquisition et de traitement deviennent alors telles qu'elles ne sont pas transposables aux études des sols superficiels.

Le développement d'une méthode de reconnaissance sismique 3D THR **opérationnelle** en terme d'acquisition et de traitement prend la suite des approches menées par différents laboratoires durant la dernière décennie [1][5][10].

Dispositif (figure1)

La gamme de fréquence imposée par les objectifs de résolution (métrique dans le cas de la sismique T.H.R.) détermine en grande partie la géométrie du dispositif d'acquisition et principalement la distance maximale entre deux récepteurs. L'échantillonnage spatial du front d'onde réfléchi, fonction de la géométrie des réflecteurs (pendage), doit

satisfaire à certains critères afin de permettre une bonne focalisation des événements sismiques lors du traitement, focalisation sans laquelle ces événements se traduiraient sous la forme de bruit dispersif dans le volume de données traitées. Ce point doit être pris en compte pour la définition de la distance entre traces (*in-line spacing*), mais aussi pour la définition de la distance entre flûtes (*cross-line spacing*). Le tableau 1 présente les résultats du calcul des distances inter-capturs en fonction des pentages des réflecteurs à imager dans le cas de l'utilisation d'une source sismique T.H.R. (fréquence centrale 600 Hz).

Pendage des réflecteurs	10°	20°	40°	60°	90°
Distance inter-capturs	7.00 m	3.50 m	2.00 m	1.50 m	1.25 m

Tableau n°1 : Distances inter-captur requises pour imager différents pentages

(cas de la sismique Très Haute Résolution, fréquence centrale : 600 Hz)

Enfin la définition d'une méthode d'acquisition doit prendre en compte les contraintes opérationnelles en terme de moyens, les reconnaissances sismiques en milieu peu profond (inférieur à la centaine de mètres), s'effectuant de manière générale à l'aide de navires polyvalents de petite taille.

Le dispositif développé s'est fixé pour objectif de permettre d'imager des pentages de 40° dans l'axe d'acquisition (soit une inter-trace de deux mètres) et des pentages de 20° dans l'axe perpendiculaire (soit un inter-flûte de quatre mètres). La longueur des flûtes a été limitée à six traces afin de conserver une taille de dispositif d'une bonne facilité de mise en œuvre. Les flûtes sont opérées soit à partir de tangons, soit à partir de panneaux divergents souples afin de pouvoir accroître leur espacement dans le cas de l'étude de structures présentant de faible pendage. Un tel dispositif ne permet pas de réaliser les analyses de la vitesse de propagation des ondes dans le sol du fait de sa faible longueur : les analyses de vitesse sont réalisées parallèlement à l'acquisition 3D, de manière conventionnelle, par le biais d'études 2D à plus grand offset (distance source - récepteur).

Le positionnement de l'ensemble du dispositif est le point le plus critique de l'acquisition, ce positionnement devant permettre de localiser, à l'échelle de la résolution souhaitée (métrique), la source sismique et les récepteurs afin de permettre le traitement des données. Le positionnement absolu (référéncé à un ellipsoïde) est réalisé à l'aide d'un récepteur GPS fonctionnant en mode différentiel sur une station de référence dédiée. Les corrections en temps réel permettent le suivi de profil, le traitement en temps différé des données de la station de référence et du navire

permettent le positionnement de l'antenne de réception à la précision souhaitée. Les corrections en altitude sont obtenues à partir des données d'un profondimètre corrigées des variations de pression atmosphérique.

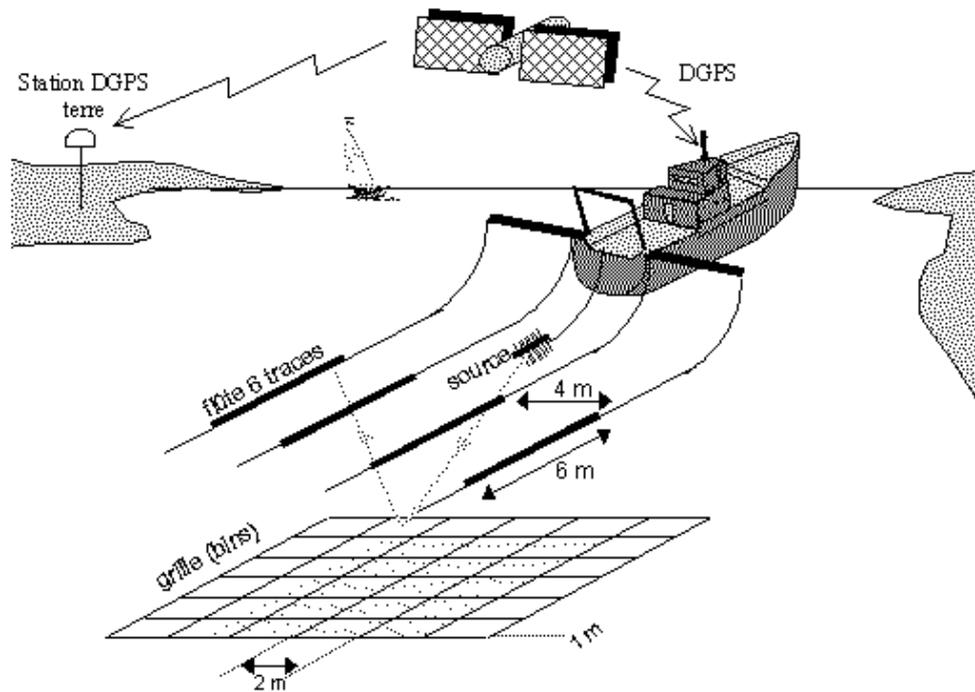


Figure 1 : Dispositif d'acquisition sismique THR 3D composé d'une source et de 4 flûtes assurant une couverture théorique de maillage 2m/ 1m - (Schematic overview).

Acquisition

La géométrie du dispositif, une fois déterminée, fixe les paramètres d'acquisition en terme de cellules élémentaires imagées (*bin*). Les dimensions optimales de cette cellule élémentaire sont égales à la moitié de la distance entre capteurs, cette taille étant dégradée (augmentée) si la vitesse du navire ne permet pas une cadence de tirs suffisamment rapide (égale à la demi inter-trace). La taille du dispositif proposé (4 flûtes sismiques, espacées de 4 mètres, comportant chacune 6 traces espacées de 2 m), associée à un inter-tir de 1 mètre, donne accès à un *bin* théorique de 1 mètre (*in-line*) par 2 mètres (*cross-line*). La surface totale insonifiée pour chaque point de tir est alors de 6 mètres (*in-line*) par 6 mètres (*cross-line*) et une couverture complète de la zone prospectée nécessitera la réalisation de lignes d'acquisition distantes de 8 mètres. En prenant en compte une vitesse moyenne du navire de 4 nœuds (1 ligne naviguée de 1 kilomètre en 10 minutes), ainsi que le temps nécessaire à la présentation sur les profils (10 minutes), l'acquisition

d'une surface de 1 km² peut être évaluée à 48 heures, durée qui peut être majorée à 4 jours afin de prendre en compte les différents impondérables.

L'acquisition proposée reste une stratégie d'acquisition : le système de positionnement utilisé ne dispose pas d'une précision suffisante en temps réel, les positions exactes de la source et des récepteurs ne sont pas connues et la trajectoire du navire peut s'éloigner des lignes théoriques. L'objectif essentiel de l'acquisition est de fournir une couverture aussi complète que possible nécessitant ainsi la réalisation de profils supplémentaires (*infill*) afin d'homogénéiser celle-ci.

Traitement

Le traitement de données de sismique 3D, quel qu'elles soient, reste avant tout un problème de positionnement : positionnement absolu mais aussi positionnement relatif antenne, source et récepteurs sismiques. La sommation de traces sismiques issues de profils différents ne peut être cohérente que si l'ensemble des positions est connu avec une précision inférieure à la résolution recherchée.

Le traitement, temps différé, par trajectographie, des données GPS différentiel donne accès à une résolution supérieure au mètre pour la position de l'antenne. Les positions relatives (X, Y) de la source et des récepteurs sismiques sont calculées à partir des temps de trajet direct dans l'eau ; cette approche représente un problème sous-déterminé, qui doit être contraint moyennant certaines hypothèses sur le comportement du dispositif. Les positions absolues de la source et des récepteurs sismiques sont obtenues par projection de leurs positions relatives dans l'axe du navire. Les standards utilisés dans l'acquisition sismique 3D pétrolière (positionnement UHF et acoustique) ne sont pas adaptés aux études des sols superficiels en terme de coût et d'encombrement. La chaîne de traitement proposée permet une connaissance approchée des coordonnées des différents capteurs sismiques.

L'utilisation de sources sismiques Très Haute Résolution de type Sparker ou Boomer (fréquence centrale supérieure à 600Hz) ne permet pas d'obtenir une bonne reproductibilité du signal du fait de leurs largeurs de bande et des variations d'immersion liées aux techniques de mise en œuvre. En conséquence, le traitement des données sismiques ne s'intéresse pas aux amplitudes vraies et le pré-traitement des données se limite à une séquence simple : Réjection des traces bruitées - Filtrage fréquentiel - Détection du fonds - Suppression de l'arrivée directe - Normalisation d'amplitude - Filtrage de la houle [7].

Deux séquences de traitement conventionnel s'offrent ensuite afin de calculer l'image 3D finale (*cube*) [8].

- Un traitement de type Point Milieu Commun (*CMP*) qui consiste à corriger les différentes traces de leur offset en utilisant une loi de vitesse (*Normal Move Out*), puis à sommer les différentes contributions (*stack*) au sein d'un même *bin*. Cette séquence a l'avantage de la simplicité ; néanmoins, elle ne prend pas en compte, dans la sommation, la position exacte du point milieu mais celle du *bin* ; de plus ce type de traitement repose sur l'hypothèse de réflecteurs horizontaux, hypothèse inadaptée par définition à l'étude de structures 3D.

- Un traitement de type migration de Kirchhoff qui consiste, à partir d'une loi de vitesse donnée, à calculer la contribution de chaque point de tir à la construction de traces migrées centrées sur les différents *bins*. Cette séquence est plus coûteuse d'un point de vue calcul, néanmoins elle prend en compte la position réelle des traces enregistrées et des traces migrées, et ne fait pas d'hypothèses sur la géométrie du milieu. L'implémentation d'une version simplifiée du code de migration, justifiée par le manque de contrôle sur les amplitudes et par l'utilisation de modèles de vitesse 1D, permet d'utiliser efficacement ce traitement dans le cadre de l'imagerie T.H.R. 3D.

Applications

Au cours du développement de la méthode de reconnaissance sismique T.H.R. 3D, trois sites différents ont été reconnus dans des contextes géologiques variés.

Golfe d'Aigues Mortes (1998) : Unités sédimentaires postglaciaires, déposées durant la dernière remontée du niveau marin (-18000 ans) et correspondant à des sédiments littoraux liés à l'activité fluviatile du Petit Rhône [2] [4]. Une zone de 1 km sur 1 km a été reconnue en utilisant un écartement entre flûtes de 10 mètres (ce dispositif entraînant un sous-échantillonnage dans le sens *cross-line* n'a plus été utilisé par la suite). Une interprétation de profils monotraces, extraits du jeu de données, en parallèle au traitement 3D proprement dit, a permis de valider l'ensemble de la méthode proposée (Figure 2).

Boulonnais (1999) : Formations carbonatées tectonisées, datées du Jurassique supérieur, appartenant à la plate-forme épicrotonique nord européenne [6] [9]. Une zone de 1.5 km * 0.6 km a été reconnue en utilisant un écartement entre flûtes de 4 mètres, correspondant au dimensionnement idéal du dispositif. La présence d'événements de grande

longueur d'onde (anticlinal, synclinal) et de petite longueur d'onde (faille), tous deux correctement imagés en 3D, souligne l'excellente adéquation de la méthode à ce type de reconnaissance (Figure 3).

Baie de Saint Austell - Angleterre (2000) : Structures de remplissage d'un réseau complexe de paléo-vallées quaternaires [3]. La définition recherchée sur ces corps sédimentaires de très petite taille (quelques mètres de profondeur, quelques dizaines de mètres d'extension latérale), tend vers la limite de la méthode présentée ; les différentes phases de remplissage des chenaux sont néanmoins bien imagées (Figure 4).

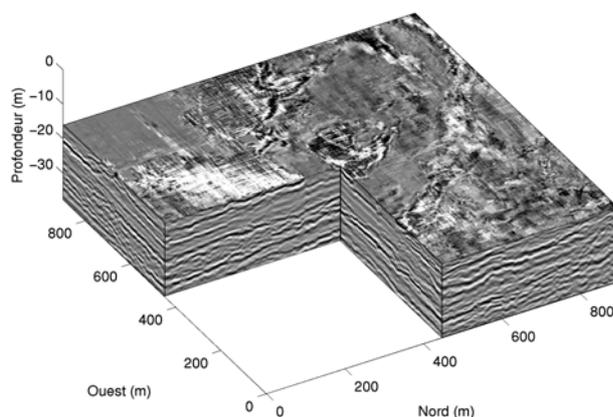


Figure 2 : Bloc 3D - Aigues Mortes : zone test visant à imagier un environnement présentant des lithologies contrastées, soit une alternance de sédiments fins (faciès sismique gris homogène) et de sédiments grossiers (faciès sismique chaotique) - (3D block - Aigues Mortes)

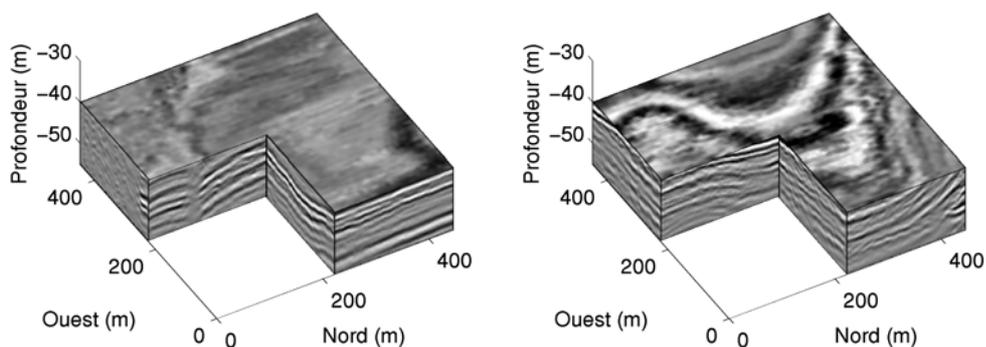


Figure 3 : Bloc 3D - Boulonnais : zone test visant à imagier des structures lithologiques dans une série carbonatée. L'exemple montre une faille accompagnée d'un épanchement de gaz à faciès sismique sourd (cube de gauche) et le passage d'un anticlinal à un synclinal (cube de droite) - (3D block - Boulonnais)

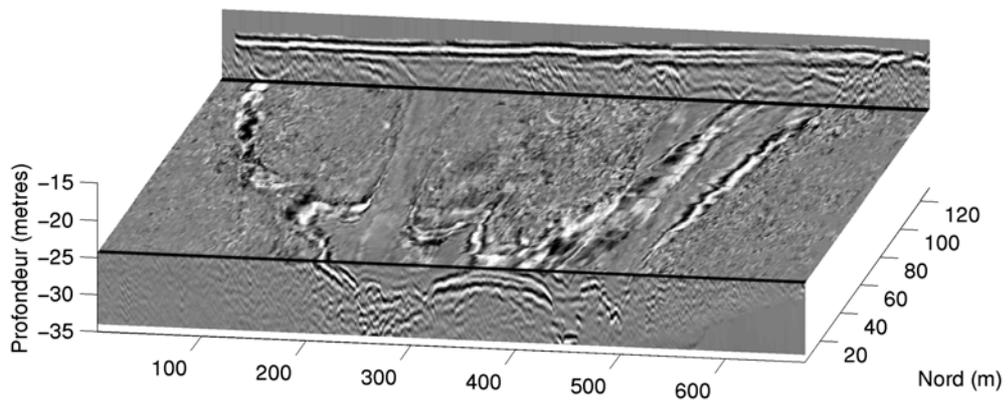


Figure 4 : Bloc 3D - Saint Austell : zone test visant à imager un réseau de paléo-vallées avec mise en évidence d'une zone de confluence (à gauche). L'image montre l'évolution typique du faciès de remplissage de paléo-vallée depuis la base (faciès chaotique lié à la présence de sédiments grossiers) vers le sommet (transparent lié à la présence de sédiments fins argileux) - (3D block - Saint-Austell)

Conclusion

Le développement d'une méthode de reconnaissance des sols superficiels par sismique THR 3D a été mené avec succès. Les moyens mis en œuvre, en terme d'acquisition et de traitement, restent modérés et compatibles avec les objectifs scientifiques et/ou techniques poursuivis. Les résultats, en terme d'imagerie, soulignent l'intérêt de cette méthode, qui offre à l'interprétation des données comparables à un levé de terrain à terre.

L'approche proposée reste néanmoins focalisée sur des zones de détail du fait de la longueur du dispositif. Le développement d'une méthodologie Haute Résolution 3D (gamme de fréquence 50 – 350 Hz) a été démarrée en Janvier 2001, afin de permettre d'aborder des corps géologiques de plus grande extension géographique.

Références

- [1] Abdulah K.C., Anderson J.B., Coperude S., Canning A., Temporal and Spatial Sampling Constraints in High Resolution 3-D Seismic Surveys", *Marine Geophysical Researches*, 1997, 19, 97-113.
- [2] Aloisi J.C., Monaco A., Thommeret J., Thommeret, Y., Evolution paléogéographique du plateau continental Languedocien dans le cadre du Golfe du Lion. Analyse comparée des données sismiques, sédimentologiques et radiométriques concernant le Quaternaire récent. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, 1975, 17(1), 13-22.
- [3] Camm G.S., Review of Cornish Stanniferous Placers with special reference to offshore placers of Quaternary age on the south coast, *Transactions of the Royal Geological Society of Cornwall*, 1999, 57-88.
- [4] Gensous B., Tesson M., Les dépôts postglaciaires de la plate-forme rhodanienne : organisation stratigraphique et conditions de mise en place. *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes / Earth Planetary Sciences*, 1997, 325, 695-701
- [5] Henriot J.-P., Verschuren M., Versteeg W., Very high resolution 3D seismic reflection imaging of small-scale structural deformation, *First Break*, 1992, 10(3), 81-88.
- [6] Mahieux G., Proust J.N., Tessier B., DeBatist M., Comparaison between high-resolution seismic stratigraphy and high-resolution sequence stratigraphy approaches to a source rock formation (Upper Jurassic, Dover Strait area, Northern France). *Marine and Petroleum Geology*, 1998, 15(4), 329-342.
- [7] Marsset B., Blarez E., Noble M., Girault R., Very high resolution multichannel recording for shallow seismic., *Proc. Offshore Technology Conf., Houston, Tx*, 1994, vol. 1, p. 15-19.
- [8] Noble M., Marsset B., Missiaen T., Versteeg, W., Near surface 2D and 3D data processing - Beyond stack, 61st Mtg. Eur. Assoc. Expl Geophys., 1996, Extended Abstracts, European Association of Geophysical Exploration, M033.
- [9] Proust J.N., Deconinck J.F., Geysant J.R., Herbin J.P., Vidier J.P., Sequence analytic approach of the Upper Kimmeridgian/Lower Tithonian storm-dominated ramp deposits of the Boulonnais (Northern France). A landward time equivalent to offshore marine source rocks. *Geol. Rundsch*, 1995, 84, 255-271.
- [10] Pulliam, J., Austin J. A. Jr., Luhurbudi E. C., Saustrop, S., Stoffa, P. L., An ultrahigh resolution 3-D survey of the shallow subsurface on the continental shelf of New Jersey, *The Leading Edge*, 1996, 15, no. 07, 839-845.

Remerciements

L'ensemble de ce travail a été réalisé dans le cadre du projet européen MAST3 VHR3D, référence : MAS3-CT97-0121.