



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 579–585



Océanographie (Géophysique marine)

Sismique marine haute résolution 3D : un nouvel outil de reconnaissance à destination de la communauté scientifique

Yannick Thomas ^{a,*}, Bruno Marsset ^{a,*}, Stéphane Didailler ^a, Jean-Pierre Regnault ^a, Sandie Le Conte ^a, Dominique Le Roux ^a, Patrick Farcy ^a, Maurice Magueur ^b, Pascal Viollette ^b, Jacques Herveou ^b, Jean-Charles Guedes ^b, Bernard Jegot ^b, Gilles Gascon ^b, Christian Prud'homme ^b, Hervé Nouze ^a, Estelle Thereau ^a, Isabelle Contrucci ^a, Jean-Paul Foucher ^a

^a Ifremer, BP 70, 29280 Plouzané, France

^b Genavir, BP 70, 29280 Plouzané, France

Reçu le 10 juillet 2003 ; accepté le 15 janvier 2004

Disponible sur Internet le 17 avril 2004

Présenté par Jean-François Minster

Résumé

Cette note présente les résultats technologiques et les premières mesures issus du développement d'une méthode de reconnaissance sismique marine haute résolution 3D à destination de la communauté scientifique. 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. Le dispositif a été transféré durant l'année 2003 dans le parc d'équipements communs. *Pour citer cet article* : Y. Thomas *et al.*, *C. R. Geoscience* 336 (2004).

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

High-resolution marine 3D seismic: a new surveying tool for the Scientific Community. This note presents the first results of the development of 3D high-resolution marine seismic method designed for scientific application. A particular attention was paid to the realisation of an operational system to be in agreement with the expected goals in term of acquisition and processing. *To cite this article*: Y. Thomas *et al.*, *C. R. Geoscience* 336 (2004).

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Sismique marine ; Haute résolution ; 3D ; Imagerie

Keywords: Marine seismic; High resolution; 3D; Imagery

Abridged English version

* Auteurs correspondants.

Adresses e-mail : thomasy@ifremer.fr (Y. Thomas), bmarsset@ifremer.fr (B. Marsset).

Academic applications of 3-dimensional (3D) marine seismic observations are numerous. A close analy-

sis within the Geosciences community has emphasized a peculiar need in 3D high-resolution studies. The major issue is to define an acquisition system properly tailored for these scientific targets within academic means. This note describes a system that has been developed for this purpose.

The first step toward the design of the system is to evaluate and translate end-user requirements into technical constraints. These are:

- (1) vertical resolution (frequency content), 2 m;
- (2) horizontal resolution (spatial sampling), 5 m;
- (3) water depth (source emission level, streamer length), from continental shelf to oceanic basins;
- (4) penetration (frequency content, source emission level): one hundred of metres in sediments.

The seismic sources were selected based on their frequency content: small air guns and Sparker, with respective main frequencies of 150 and 250 Hz meet those requirements. The seismic traces depend on the frequency content of the sources and were therefore designed taking into account spatial sampling requirements. The length of each streamer will drive the imaging capability of the seismic system through velocity determination. The major constraint is the size of the vessel and therefore the length of the two streamers was limited to two active sections of 150 m (24 traces/6.25 m, each) during 3D acquisition. Thanks to the digital technology, the combination of the active sections will allow to set them as a unique streamer for 2D acquisition. The range of water depth has to be considered with regard to both acquisition and processing capabilities. There is no theoretical limit in water depth, but the lateral resolution after migration of the seismic data would be in the order of the dominant wavelength only if the velocity model is accurate enough.

Differential GPS (DGPS) technology provides the vessel and seismic sources positions, and compasses on the streamers allow to invert the position of the receivers. This positioning strategy allows a positioning accuracy better than the final processed bin size (6 m). Dedicated software was developed to monitor the sources/receivers positions onboard to enable a pertinent acquisition. Seismic data are processed onboard through a simple water velocity NMO/stack algorithm, to evaluate data quality.

Two acquisition surveys were completed in order, on the one hand, to acquire the first High Resolution 3D seismic data sets, and, on the other hand, to qualify the developed Navigation Processing and Quality Control software. These were respectively:

- the *ESSHR campaign (R/V L'Europe)*; the seismic layout, on this coastal vessel, consisted in one seismic streamer (48 traces) operated together with two Sparker sources, 15 m apart; 20 profiles, or 20 h (daylight only) were required to survey a $5000 \times 300 \text{ m}^2$ area offshore Corsica (Mediterranean Sea) in 300 m water depth;
- the *HYDRATECH campaign (R/V Le Suroît)*; the seismic layout, on this open-sea vessel, consisted in two seismic streamers (48 traces, 300 m long), 25 m apart operated together with two air guns (mini GI) sources, 12.5 m apart; 173 profiles, or 12 days (day/night shift) were required to survey a $7000 \times 3500 \text{ m}^2$ area offshore Norway (Atlantic Sea) in 800 to 1000 m water depth.

Based on the results of the former sea trials, it is considered that the major current fields of research in marine Geosciences will benefit of the newly developed 3D high resolution seismic acquisition system through the fine imagery it can deliver. The transfer of this new tool to operational use was scheduled for 2003, therefore becoming available to the European Geosciences marine research community.

1. Introduction

Tant du point de vue du géophysicien que du point de vue du géologue, la réalité physique du terrain est éminemment tridimensionnelle (3D) et l'objectif de la sismique 3D est de prendre en compte cette réalité. L'acquisition de profils 2D sériés, espacés au mieux de quelques centaines de mètres, est couramment employée par les laboratoires de recherche en géologie marine. Elle entraîne une grande disparité de l'échantillonnage spatial. L'interprétation « pseudo » 3D de ces données sismiques s'en trouve biaisée, voire impossible.

Le premier intérêt des données sismiques 3D est de décrire un volume permettant l'interprétation des structures. L'exploitation de ces cubes de données ne

se limite pas à ce premier stade d'interprétation. En effet, la sismique 3D est l'une des meilleures illustrations de la nécessité d'un travail pluridisciplinaire en géosciences : le recoupement de mesures ponctuelles (forages) en géochimie, sédimentologie et pétrophysique avec les volumes d'attributs sismiques permet de caractériser les sédiments et de construire des modèles de terrain décrivant les caractéristiques géo-acoustiques, géochimiques et pétrophysiques des matériaux. Le domaine d'application de la sismique dépasse alors le cadre de l'interprétation géométrique pour ouvrir le domaine de la caractérisation quantitative des volumes sédimentaires.

Cette évolution vers la sismique 3D a été initiée par l'industrie pétrolière, il y a une trentaine d'années [1,2,6], afin de limiter les risques et les coûts de forage lors des phases d'exploration. Le projet HR3D décrit dans cette note prend la suite de travaux menés en sismique marine Très Haute Résolution 3D (THR, gamme de fréquence 200–1000 Hz [4,5]) et traite de la sismique marine haute résolution (HR, gamme de fréquence 50–350 Hz). Ce projet a pour objectif de mettre à la disposition de la communauté scientifique un outil de mise en œuvre simple et opérable sur les navires de recherche côtiers et hauturiers, répondant aux critères suivants :

- résolution verticale de l'ordre du mètre et résolution horizontale de l'ordre de 6 m ;
- surfaces des cibles de 25 à 50 km² ;
- profondeur d'investigation de 100 à 2000 m de profondeur d'eau pour des pénétrations de plusieurs centaines de mètres dans les sédiments.

2. Méthodologie

L'outil développé doit être adapté aux objectifs géologiques recherchés (processus et enregistrements sédimentaires, structures tectoniques, instabilités de pente, figures d'échappement de fluide, hydrates de gaz ...). La première étape de conception consiste à préciser la nature des cibles et les performances demandées (profondeur d'investigation, pendages des réflecteurs, pouvoirs de résolution verticale et horizontale ...), afin de les prendre en compte dans la définition du dispositif : nature des sources (contenu fréquentiel, puissance d'émission ...) et géométrie

d'acquisition (échantillonnage spatial, longueur du dispositif ...).

Les types de source retenus sont le canon à air mini-GI et le Sparker, dont les gammes de fréquence respectives de 50–250 Hz et de 100–350 Hz (fréquences centrales de 150 et 250 Hz) sont adaptées aux objectifs de résolution HR. La qualité et la stabilité de la signature acoustique du canon en font un outil particulièrement adapté au traitement sismique 3D. La faible répétitivité du Sparker limite cette source aux seuls objectifs d'imagerie, à l'exclusion de tout traitement d'amplitude. Deux dispositifs sources sont déployés simultanément à l'arrière du navire et fonctionnent en alternance, augmentant ainsi l'échantillonnage dans la direction perpendiculaire aux lignes d'acquisition (Fig. 1(a)).

La trace, antenne élémentaire de réception, doit être adaptée au contenu fréquentiel défini : le nombre d'hydrophones et la longueur de la trace déterminent la directivité du dispositif de réception et le bon échantillonnage spatial des signaux. La configuration retenue est de huit hydrophones espacés de 0,78 m formant des traces distantes de 6,25 m. Le nombre de traces par flûte sismique a été limité à 48 (deux tronçons actifs) et le nombre de flûtes dépend de la taille du navire porteur (deux flûtes sur les navires hauturiers, une flûte sur les navires côtiers), afin de préserver une mise en œuvre simple et un encombrement limité. Les écartements entre flûte(s) et sources déterminent la distance entre lignes naviguées (entre 15 et 25 m) et l'échantillonnage spatial dans la direction perpendiculaire à ces lignes (6,25 m), ce dernier étant plus faible (typiquement deux fois plus faible) que l'échantillonnage dans la direction d'acquisition (3,125 m). Une attention particulière devra donc être apportée lors de la préparation des campagnes, afin d'assurer l'adéquation entre les objectifs recherchés et la géométrie d'acquisition (l'orientation des lignes naviguées doit en particulier être perpendiculaire aux structures de pendage le plus élevé). Les dimensions horizontales du *bin* (maille élémentaire) utilisées pour le traitement 3D doivent être cohérentes avec la résolution attendue et l'échantillonnage spatial des données, soit 6,25 m pour les dispositifs décrits.

Un dispositif court, au regard de la profondeur des objectifs, ne permet pas de déterminer les vitesses de propagation [3,7] et limite les possibilités de caractériser

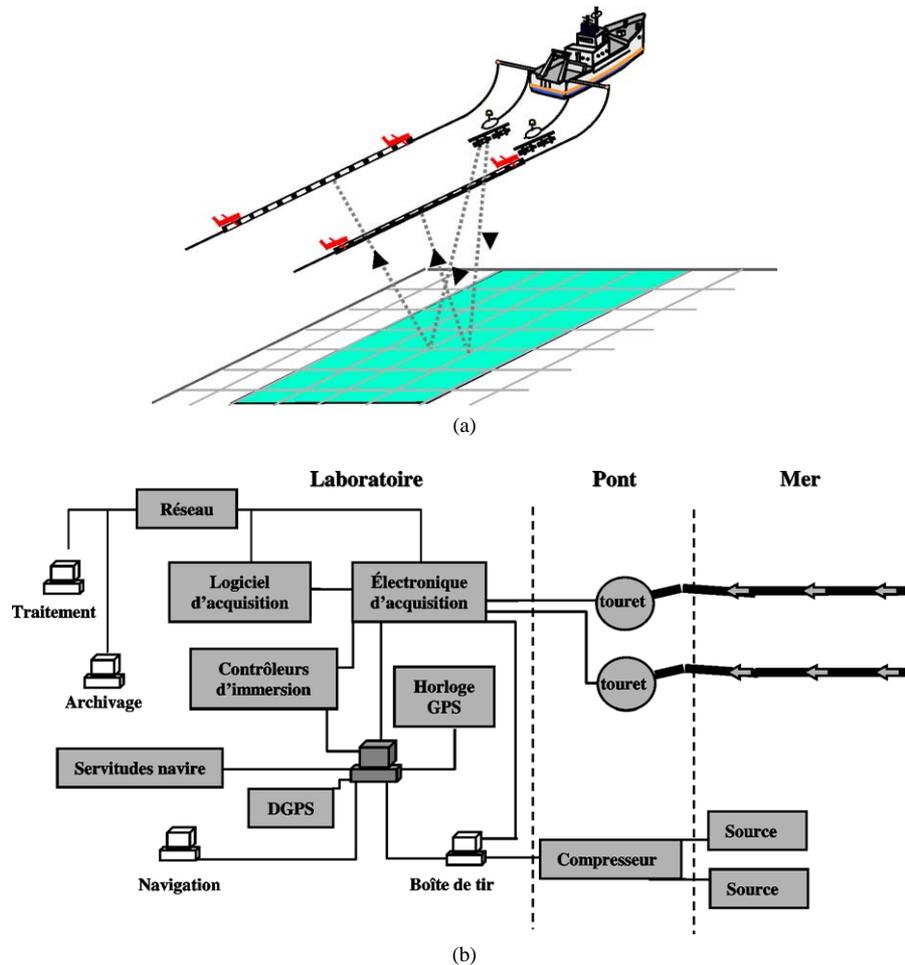


Fig. 1. (a) Vue d'artiste du dispositif d'acquisition sur un navire hauturier (deux flûtes sismiques / deux sources sismiques). (b) Synoptique du dispositif d'acquisition, les informations des capteurs de servitude sont compilées par un ordinateur avant leur stockage dans les en-têtes des fichiers sismiques (format Seg-D).

Fig. 1. (a) Artist view of the seismic layout. (b) Acquisition synoptic, navigation information are collected and merged by computer prior to saving into seismic trace headers (format Seg-D).

sation des sédiments : la règle communément admise est que la distance source–récepteur doit être du même ordre de grandeur que la profondeur maximale de l'objectif à reconnaître. Au-delà de 500 m de profondeur d'eau, le dispositif 3D proposé ne permettra donc pas la détermination des vitesses. Il est proposé, par profondeur d'eau inférieure à 1000 m, l'acquisition de profils 2D utilisant l'ensemble des 750 m de tronçons actifs, permettant ainsi de contraindre le modèle de vitesse. Par profondeur d'eau supérieure à 1000 m, le dispositif sera limité à des objectifs d'imagerie et des

données complémentaires seront nécessaires afin de contraindre le modèle de vitesse utilisé.

Le positionnement absolu du navire est acquis à l'aide de deux systèmes indépendants de type GPS différentiel (DGPS), de gyrocompas et/ou d'une centrale d'attitude. Ces données sont interpolées à l'instant de l'ordre de tir, à l'aide d'une horloge GPS supplémentaire (Fig. 1(b)). La redondance d'informations permet de s'affranchir, pour partie, des aléas de la mesure. Le positionnement des sources par rapport au navire est assuré par un double système DGPS/VHF

placé au-dessus de chaque source. Le positionnement des flûtes par rapport au navire est extrapolé à partir des données de contrôleurs d'immersion équipés de compas (trois par flûte). La précision requise pour le positionnement des sources et des récepteurs doit atteindre l'ordre de grandeur de la taille de la maille élémentaire du traitement sismique, estimée d'après la résolution horizontale propre du dispositif, soit environ 6 m.

La distance entre flûtes, le nombre de flûtes et le nombre de sources déterminent la surface couverte lors d'un passage du navire. La prise en compte de la vitesse du navire, d'une part, et des temps de giration/présentation, d'autre part, permet une première estimation du temps nécessaire à l'acquisition du volume 3D. Ce temps devra être majoré (environ 25 à 50 %), afin de prendre en compte les différents aléas de ce type d'acquisition (lignes supplémentaires, entretien du matériel, pannes, météorologie...), l'objectif étant d'obtenir une couverture aussi homogène que possible.

L'acquisition et le traitement de données de sismique 3D nécessitent le traitement en temps quasi réel du positionnement : positionnement absolu, mais aussi positionnement relatif entre les différents éléments du dispositif. La sommation de traces sismiques issues de profils différents ne peut être cohérente que si l'ensemble des positions est connu avec une précision meilleure que la résolution recherchée. Le matériel est accompagné d'un logiciel permettant, à bord du navire, le traitement du positionnement, le suivi de la couverture acquise et la réalisation d'un premier cube sismique (NMO-Stack) permettant ainsi un contrôle qualité de l'ensemble des données acquises.

3. Campagnes technologiques

Plusieurs campagnes d'essais ont été nécessaires afin de développer, tester et adapter l'ensemble de la chaîne d'acquisition. Les premières missions en mer se sont déroulées sur des navires côtiers afin d'évaluer les fonctionnalités des composants unitaires du dispositif (flûtes sismiques, électronique et logiciel d'acquisition, servitudes de positionnement). Deux campagnes de mesures (novembre 2001 et juillet 2002) ont par la suite permis, d'une part, d'acquérir les premiers jeux de données sismiques

HR3D et, d'autre part, de qualifier les outils élaborés pour les traitements « navigation » et « contrôle qualité ».

3.1. Campagne ESSHR (novembre 2001, N/O L'Europe, Fig. 2(a))

Le dispositif mis en œuvre sur ce navire côtier de 30 m comprenait une flûte sismique (48 traces) associée à deux sources de type Sparker, séparées de 15 m. 22 profils, soit 20 h d'acquisition, ont été nécessaires pour effectuer le relevé d'une zone de 5000 m par 300 m sur le plateau continental Est-Corse par une profondeur d'eau de 300 m. La profondeur de pénétration dans le milieu est limitée par le multiple du fond de l'eau ; néanmoins, des réflecteurs sont interprétables à plus de 500 m de profondeur (épisode messinien). La résolution verticale est évaluée à 1,5 m. Le système de mesure du positionnement des sources, alors en cours de réalisation, n'a pas pu être utilisé durant cette mission.

3.2. Campagne Hydratech (juillet 2002, N/O Le Suroît, Fig. 2(b))

Le dispositif mis en œuvre sur ce navire hauturier de 65 m comprenait deux flûtes sismiques (48 traces) espacées de 25 m par des tangons situés de part et d'autre du navire. Deux sources de type canon à air mini GI, espacées de 12,5 m et reprises mécaniquement sur les tangons, complétaient l'ensemble. 173 profils acquis durant 12 jours d'acquisition ont été nécessaires pour effectuer le relevé d'une zone de 7000 m par 3500 m dans le domaine de la pente au large de la Norvège, par une profondeur d'eau de 1000 m. La profondeur de pénétration dans le milieu est limitée par le niveau d'émission de la source (compromis résolution/pénétration) ; néanmoins, des réflecteurs sont interprétables à plus de 1000 m de profondeur. La résolution verticale est évaluée à 3 m.

4. Conclusion

Le développement d'une méthode de reconnaissance dans le domaine de la sismique marine 3D haute résolution à vocation académique a été mené avec succès, tant du point de vue technologique qu'en ce qui

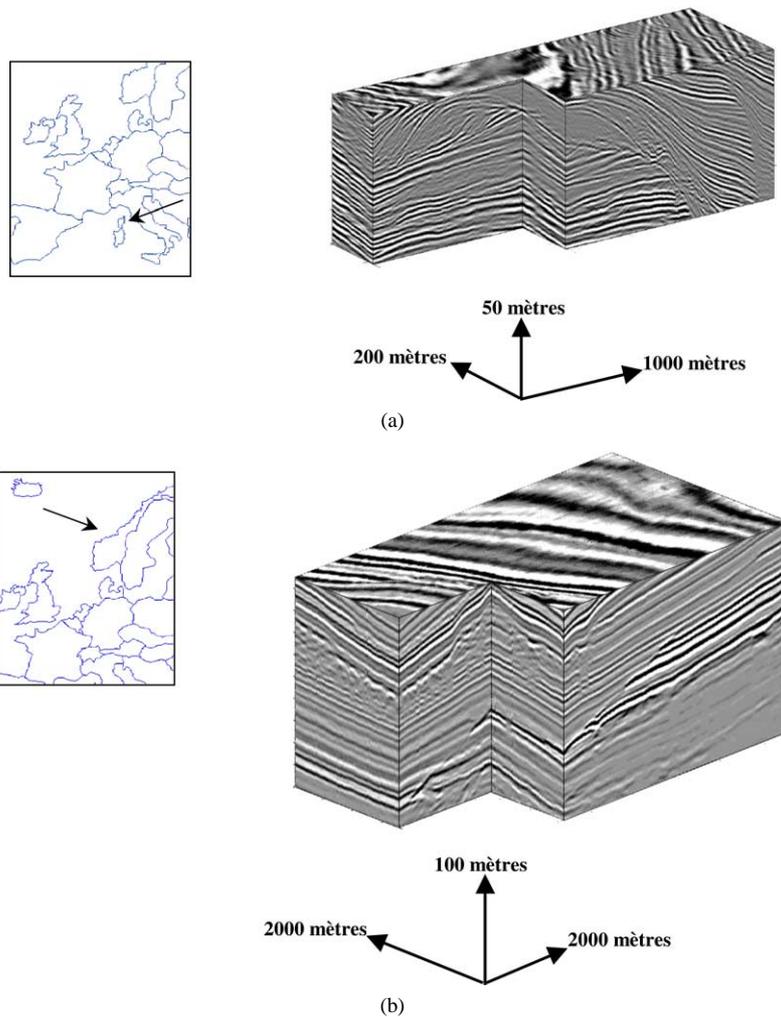


Fig. 2. Exemples de volume sismique HR3D, migration profondeur avant sommation. (a) Extrait du bloc 3D Est-Corse (novembre 2001), les données ont été acquises durant une campagne d'essais dans le cadre de la recette du système d'acquisition (profondeur d'eau : 300 m, sources : Sparker, une flûte sismique, 48 traces). (b) Extrait du bloc 3D Ouest-Norvège (juillet 2002), première mission scientifique au large de la Norvège (profondeur d'eau : 900 m, sources : canon à air mini GI, deux flûtes sismiques, 48 traces).

Fig. 2. Examples of 3D seismic volumes, 3D pre-stack depth migration. (a) Sample of the 3D East-Corsica cube (November 2001); data have been acquired during sea acceptance trials of the acquisition system (water depth: 300 m, sources: Sparker, one seismic streamer, 48 traces). (b) Sample of the 3D West-Norway cube (July 2002), first scientific application west of Norway (water depth: 900 m, Sources: Air gun mini GI, two seismic streamers, 48 traces).

concerne le logiciel de navigation et le logiciel de contrôle qualité.

Cet outil de sismique HR3D semble particulièrement adaptée à l'étude détaillée de structures « clés » à une échelle de quelques dizaines de kilomètres carrés, en relation notamment avec des mesures in situ. Les temps d'acquisition et de traitement, ainsi que le

volume des données générées ne permettent pas d'envisager l'application de cette méthode à plus grande échelle : le choix des cibles doit donc être extrêmement pertinent et s'appuyer sur des reconnaissances conventionnelles préalables.

L'ensemble du dispositif a été transféré durant l'année 2003 dans le parc d'équipements communs géré

par Genavir et ainsi accessible à l'ensemble de la communauté scientifique des géosciences dans le cadre des demandes de campagnes en mer.

Remerciements

Une partie du projet a été réalisée dans le cadre du contrat plan État–région Bretagne.

Références

- [1] A.J. Berkhout, 3D seismic processing with an eye to the future, *World Oil* 5 201 (1985) 91–94.
- [2] M.R. Bone, A case history of 3D seismic application in the gulf of Mexico, in: *Offshore Technology Conference*, 1978, pp. 1106–1118, Paper 3176.
- [3] J.-F. Claerbout, *Imaging the Earth's Interior*, Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [4] B. Marsset, Very High Resolution marine 3D seismic method for detailed site investigation, Final Report, Contract MAST3 MAS3-CT97-0121, 2001.
- [5] T. Marsset, B. Marsset, Y. Thomas, S. Didailler, Sismique très haute résolution 3D : une nouvelle méthode d'imagerie des sols superficiels, *C. R. Geoscience* 334 (2002) 403–408.
- [6] E.R. Tegland, 3D seismic techniques boost field development, *Oil Gas J.* 75 (37) (1977) 76–82.
- [7] Ö. Yilmaz, Seismic data processing, in: *Investigation in Geophysics*, vol. 2, Society of Exploration Geophysicists, 1987.