

PROSPECTION HYDROGRAPHIQUE ET GÉOPHYSIQUE MARINE

Lucien Halleux

*Administrateur délégué G-Tec SA,
Professeur visiteur KU Leuven & Chargé de cours temps partiel Ulg*

Résumé

Un grand nombre de techniques de reconnaissance non destructives ont été développées pour l'industrie offshore dans le but de cartographier les fonds marins et de décrire la structure des couches sous jacentes. La plupart de ces techniques sont basées sur la propagation d'ondes acoustiques et sismiques. Les techniques les plus importantes sont brièvement passées en revue et illustrées par des exemples montrant des structures géomorphologiques intéressantes.

Mots-clés

Reconnaissance géophysique, morphologie sous-marine

Abstract

Many non destructive investigation techniques have been developed in the offshore industry for the mapping of the bottom and of sub bottom structures. Most of these techniques are based on the propagation of acoustic and seismic waves. The most important techniques are briefly reviewed and illustrated by examples showing interesting geomorphological features.

Keywords

Geophysical reconnaissance, sea-bottom morphology

Un petit mot d'hommage à André Ozer

Diplômé en 1979, j'appartiens aux générations d'ingénieurs géologues qui ont bénéficié d'un enseignement substantiel en géomorphologie et photointerprétation, dispensé par le Professeur Albert Pissart et ses collaborateurs, en particulier André Ozer. A cette époque déjà, André avait d'innombrables contacts à l'étranger et en faisait largement profiter ses étudiants. C'est grâce à lui que j'ai pu passer quelques semaines à bord du navire de recherche « Bannock » du Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) lors d'une campagne sur la plateforme continentale sarde. Ce stage a constitué mon premier contact avec les techniques hydrographiques et géophysiques marines, que j'ai eu l'occasion d'appliquer ensuite dans le cadre de mon activité aux LGIH de l'Université de Liège, et au sein de l'entreprise G-Tec, créée en 1993. L'entreprise G-tec occupe aujourd'hui une petite cinquantaine de géologues, géographes, biologistes et ingénieurs. Les travaux de reconnaissance maritime constituent l'activité principale de la société et sont à l'origine des quelques exemples d'application présentés ci-après.

Tout au long de ma carrière, je suis resté en contact avec André, et nous avons eu l'occasion de collaborer sur des projets aussi divers que la stabilité des talus le long d'un chantier ferroviaire en Algérie ou la recherche de sable au large des côtes marocaines. Aujourd'hui, je tiens à exprimer ma reconnaissance pour son enseignement et pour son dévouement envers les étudiants qui ont durablement influencé ma carrière.

1. INTRODUCTION

La présente note donne un aperçu des techniques hydrographiques et géophysiques couramment utilisées pour la reconnaissance des fonds marins. Elle est illustrée par de nombreux exemples d'application relevant en particulier de la géomorphologie marine peu profonde. Ces exemples ont tous été obtenus dans le cadre d'études commerciales liées à des projets d'infrastructure maritime tels qu'aménagement portuaire, dragage

de chenaux d'accès, réaménagement de plages, etc. Il ne s'agit donc pas d'une publication scientifique, mais plutôt d'un témoignage montrant que la géomorphologie marine et les techniques permettant de l'étudier constituent un maillon essentiel des reconnaissances géologiques préalables aux grands travaux.

Les méthodes hydrographiques sont destinées à reconnaître le fond marin, sans pénétration sous le fond. Selon les méthodes, on obtient soit une carte bathymétrique, soit une image du fond. Au contraire, les méthodes

géophysiques sont destinées à pénétrer sous le fond, de manière à donner des informations sur la nature et l'épaisseur des dépôts, ou encore sur la profondeur du bedrock sous jacent. Ces techniques trouvent des applications dans presque tous les domaines d'activité offshore : études scientifiques, recherche et exploitation d'hydrocarbures ou autres ressources minérales, grands travaux d'infrastructures, production d'énergie éolienne, études environnementales, etc. Une grande variété de méthodes et équipements sont disponibles sur le marché, et il est essentiel d'en connaître à la fois les possibilités et les limitations afin d'aboutir à une mise en œuvre bien adaptée à chaque cas particulier. Seules les techniques les plus importantes sont mentionnées ci après.

2. PRINCIPES GÉNÉRAUX DES MÉTHODES HYDROGRAPHIQUES ET GÉOPHYSIQUES

2.1. Quelles méthodes ?

Il existe un très grand nombre de méthodes hydrographiques et géophysiques qui peuvent être utilisées dans les applications de type "géologie de l'ingénieur", c'est-à-dire relevant des infrastructures et des constructions. Citons les diverses méthodes sonar et sismiques, la géorésistivité, la gravimétrie, la magnétométrie ou encore les diagraphies en forage. Dans le cadre de cette note, nous nous limitons aux méthodes acoustiques et sismiques, qui sont basées sur la propagation de signaux acoustiques ou sismiques dans l'eau et dans le sous-sol. Ces méthodes sont les plus utiles dans le cadre d'études géomorphologiques marines.

2.2. La propagation des signaux acoustiques et sismiques dans l'eau

Les signaux acoustiques et sismiques sont tous deux des ondes mécaniques. On utilise habituellement le terme « acoustique » pour désigner les fréquences élevées, de l'ordre de 30 kHz à 800 kHz. Il s'agit en fait d'ultrasons. Les signaux sismiques sont de fréquence plus basse (10 Hz à 10 kHz).

La résolution des images acoustiques et sismiques est fonction de la fréquence : plus la fréquence est élevée, meilleure est la résolution et donc le degré de détail visible sur le résultat.

Dans l'eau, la vitesse de propagation dépend de la température et de la salinité. La figure 1 illustre la variation de la vitesse en fonction de la température pour l'eau douce et l'eau de mer « normale » (salinité = 35 ‰). En milieu marin, la vitesse est proche de 1500 m/s, avec des variations dues par exemple à la thermocline.

L'atténuation est également un paramètre très important qui détermine la portée. Elle dépend du matériau et de la fréquence. Dans un matériau donné, plus la fréquence est élevée, plus l'atténuation est forte. Il y a également une très grande différence entre l'eau d'une part et les sédiments. Dans l'eau, l'atténuation est faible et

surtout fonction de la turbidité. Les fréquences élevées (> 30 kHz) peuvent être utilisées. Dans les sédiments, l'atténuation est beaucoup plus élevée et variable. Ceci explique que seuls les signaux sismiques, de fréquence faible (< 15 kHz), peuvent pénétrer sous le fond. Certains matériaux se caractérisent par une atténuation très élevée, empêchant toute pénétration. C'est le cas de certaines vases contenant des matériaux organiques dont la décomposition produit des petites bulles de gaz qui restent piégées dans le matériau.

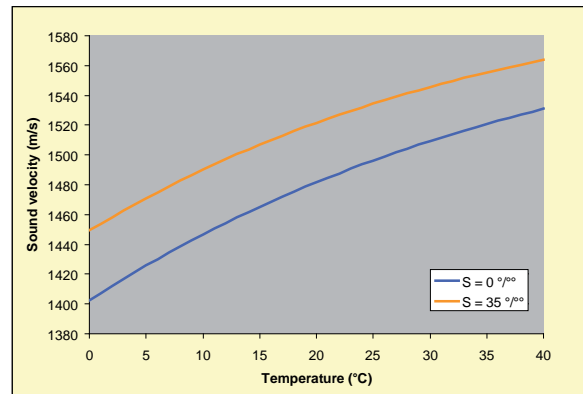


Figure 1. Vitesse de propagation des ondes acoustiques dans l'eau douce (salinité $S = 0$ ‰) et dans l'eau de mer ($S = 35$ ‰).

En conclusion, une fréquence élevée entraîne une pénétration faible, mais avec une bonne résolution. Inversement une fréquence faible améliore la pénétration au détriment de la résolution. Il convient donc de trouver le compromis optimal pour chaque application particulière.

3. LES MÉTHODES HYDROGRAPHIQUES

3.1. Échosondeur simple faisceau

L'échosondeur simple faisceau est l'application la plus ancienne et la plus connue des techniques acoustiques utilisées en mer, zones portuaires ou voies navigables : il permet d'obtenir la profondeur d'eau sous le transducteur. Son emploi est généralisé dans un grand nombre de domaines : dragage, pêche, navigation commerciale, militaire ou de plaisance, contrôle de l'ensablement des chenaux portuaires, etc.

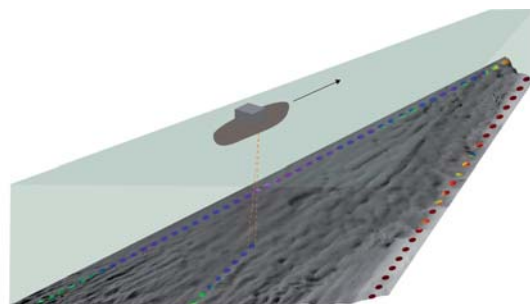


Figure 2. Principe de l'échosondeur simple faisceau.

Le principe consiste à envoyer vers le fond une impulsion sonar focalisée. Celle-ci, de fréquence usuellement comprise entre 33 et 300 kHz, est réfléchi par le fond ou tout autre obstacle, et renvoyée vers le transducteur. L'ouverture du faisceau sonar doit être faible, de manière à obtenir une bonne résolution horizontale. Le temps de propagation mesuré est converti en profondeur moyennant calibration directe, ou détermination de la vitesse sur base de la température et de la salinité ou encore par mesure au moyen d'une sonde de célérité.

La figure 2 illustre le principe. Un transducteur piézoélectrique fixé au bateau émet l'impulsion et reçoit le signal réfléchi par le fond. En déplaçant l'embarcation, on obtient un profil bathymétrique dans la direction voulue, sous forme digitale ou analogique. Moyennant couplage à un système de positionnement, les mesures sont géoréférencées et des profils ou cartes bathymétriques peuvent être dressés. La méthode est rapide et peu coûteuse. Elle convient bien aux zones peu étendues. L'inconvénient principal est l'absence d'information entre les profils parcourus par le bateau.

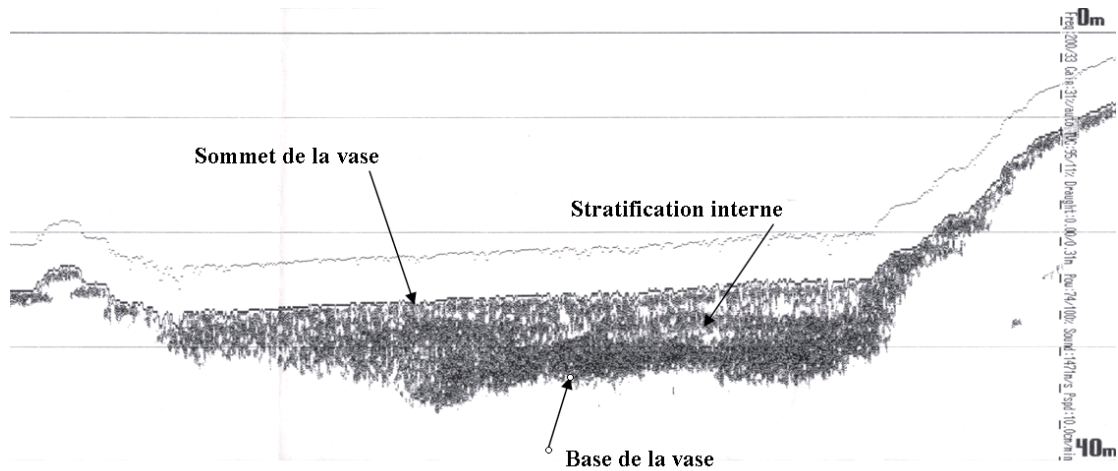


Figure 3. Exemple de profil échoudeur double fréquence.

La fréquence usuelle des échoudeurs est de 210 kHz. On utilise également des échoudeurs « double fréquence » émettant une impulsion à 210 kHz et une impulsion à 33 kHz. La basse fréquence peut pénétrer des vases très liquides, comme illustré sur la figure 3: l'axe vertical représente la profondeur, de 0 à 40 m. Au pied du versant, on distingue nettement la présence d'un dépôt de vase dont l'épaisseur atteint localement une dizaine de mètres. Des réflecteurs internes sont visibles dans la vase.

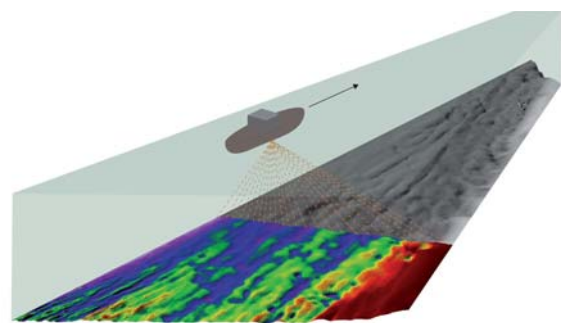


Figure 4. Illustration du principe des sonars multifaisceaux.

3.2. Echoudeur multifaisceaux

Le sonar multifaisceaux est un instrument beaucoup plus complexe, capable d'enregistrer un profil bathymétrique complet transversalement à la direction de profilage (fig. 4).

Chaque profil transversal («swath») comporte typiquement 100 à 200 points de mesure et la cadence d'acquisition à faible profondeur atteint 40 *swaths* par seconde. Bien que le principe soit simple, la mise en œuvre est très complexe. En effet, chaque mesure individuelle doit être corrigée en tenant compte de la position et de l'attitude instantanée du bateau. Ces informations sont fournies par le GPS et par une centrale inertielle qui mesure en permanence l'azimut, le roulis et le tangage. La méthode présente donc une similitude avec les lasers aéroportés.

Par rapport à l'échoudeur classique (monofaisceau), le sonar multifaisceaux présente les avantages suivants:

- Très haute densité de points : en fonction de la profondeur d'eau, plusieurs points bruts par m² peuvent être obtenus, ce qui conduit à des modèles à très haute résolution.
- Couverture latérale de 5 à 7 fois la hauteur d'eau en un seul passage, d'où un nombre nettement réduit de profils de mesure.
- Couverture continue du fond

La figure 5 montre une vue en perspective du fond obtenue par échoudeur multifaisceaux, Dans la partie gauche, des rides de sable sont nettement visibles.

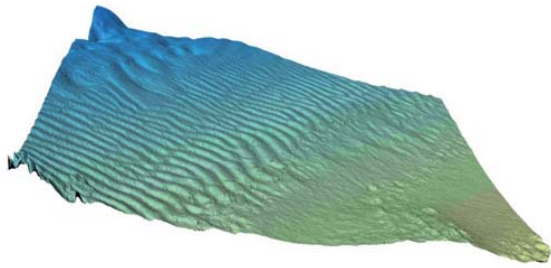


Figure 5. Exemple de carte bathymétrique sonar MF au large de la côte nord africaine.

3.3. Sonar à balayage latéral

Le sonar à balayage latéral utilise la réflexion d'un faisceau ultrasonique émis perpendiculairement à la trajectoire du bateau. La géométrie est similaire à celle illustrée sur la figure 4 pour l'échosondeur multifaisceaux, mais la méthode ne fournit pas d'information bathymé-

trique. En revanche la résolution est excellente. Le résultat final est une image acoustique du fond, comparable dans une certaine mesure à une photo aérienne sous éclairage oblique sur terre ferme.

L'énergie ultrasonique est réfléchi de deux façons différentes :

- Réflexions spéculaires sur des faciès morphologiques ou des objets émergeant du fond.
- Rétrodiffusion qui augmente avec la rugosité / granulométrie du fond.

L'image sonar résultante fournit une information sur la morphologie du fond, sur la présence d'obstacles et sur la différence de composition du fond. Le couplage avec le GPS et une centrale inertielle permet l'assemblage de plusieurs profils sous forme de mosaïque géoréférencée. La figure 6 illustre la mise en oeuvre avec un transducteur équipé d'un dépresseur destiné à faire plonger le câble de traction.

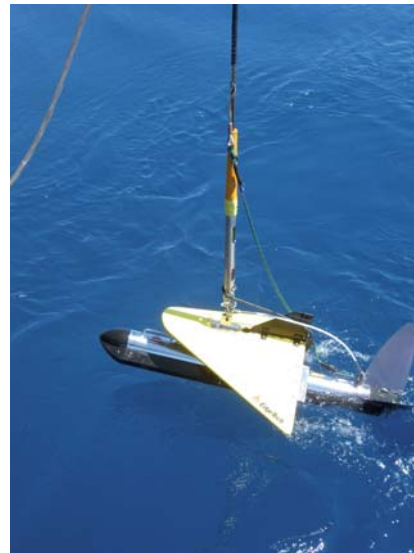
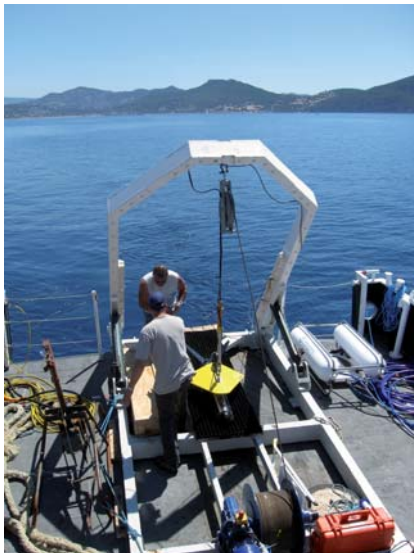


Figure 6. Mise en oeuvre du sonar à balayage latéral.

La figure 7 montre un exemple d'enregistrement obtenu sur un fond sableux, partiellement envahi par des sédiments fins. Les rides de sable sont bien visibles. Localement, elles disparaissent sous la couche de sédiments fins.

La figure 8 montre un affleurement rocheux émergeant d'un fond sableux. L'érosion préférentielle de la roche le long des diaclases est bien visible.

4. LES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

4.1. Sismique réflexion monotrace haute résolution

Le principe général de la sismique réflexion haute résolution, souvent appelée *Sub Bottom Profiler* (SBP), est illustré sur la figure 9. Le bateau de mesure remorque une source sismique et un groupe d'hydrophones. Les sources les plus couramment utilisées sont électriques (*sparker*), électromécaniques (*boomer*) ou piézoélectri-

ques (*pinger*). Ces sources diffèrent en termes de puissance et de fréquence du signal émis. Pour une investigation sous le fond classique dans le cadre de recherche de sédiments, un *boomer* avec une fréquence centrale variant de 1.7 à 4 kHz est le plus fréquemment utilisé. Pour des recherches plus précises telles que la localisation d'objets, des *pingers* ou *chirp* de fréquence plus élevée (5 kHz à 12 kHz) sont utilisés. Lorsqu'une pénétration plus importante est requise, le *sparker* constitue une bonne option. La source sismique envoie une impulsion à intervalles de temps réguliers, typiquement de une à quatre fois par seconde. Une partie du signal est réfléchi sur le fond, une partie pénètre sous le fond et est partiellement réfléchi sur les discontinuités (réflecteurs) présentes.

L'échelle verticale de la section sismique est une échelle de temps. Sur l'exemple de la figure 9, l'intervalle entre deux lignes horizontales est de 10 ms. La conver-

sion en échelle de profondeur est basée sur la formule $d = v \cdot t / 2$ dans laquelle d est la profondeur, t le temps et v la vitesse de propagation des ondes sismiques. Dans l'eau et les sédiments meubles, la vitesse est proche de 1500 m/s. Un intervalle de temps de 10 ms correspond donc à une profondeur de 7.5 m environ. La résolution de la méthode est l'aptitude à distinguer deux réflecteurs successifs. Elle dépend de la fréquence

du signal et peut être estimée à $\lambda / 2$ où λ est la longueur d'onde du signal. Pour une fréquence de 4 kHz, la résolution est de l'ordre de 0.2 m. La pénétration sous le fond dépend de l'atténuation du signal, fonction du matériau et de la fréquence.

Les réflecteurs plus ou moins horizontaux comme le fond ou les limites entre des couches de sédiments apparaissent sur la section sismique brute avec leur géo-

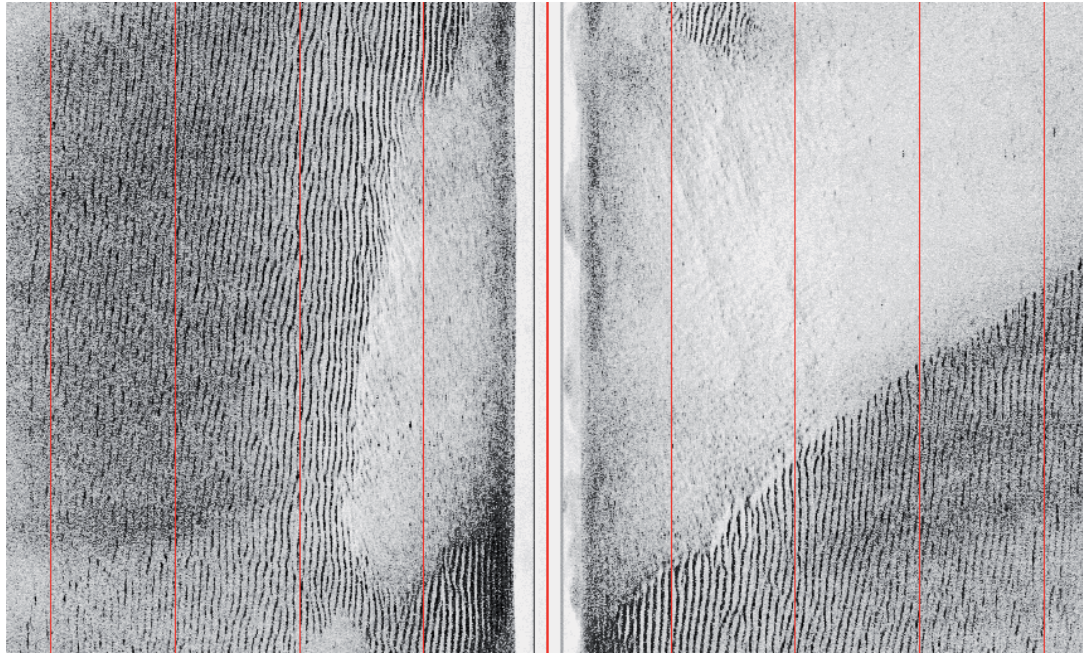


Figure 7. Enregistrement sonar à balayage latéral. La trajectoire du bateau se situe au centre. La portée est de 50 m de part et d'autre du bateau. La longueur du profil est de 200 m environ.

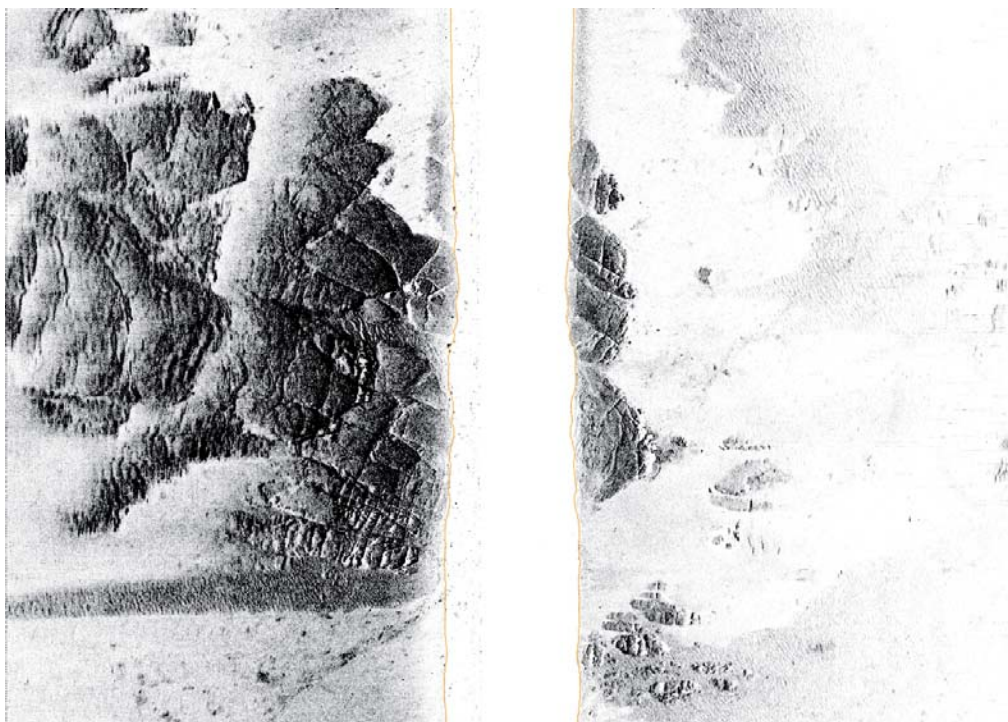


Figure 8. Enregistrement sonar à balayage latéral montrant un affleurement rocheux. L'image couvre une zone d'environ 100 x 100 m (Amérique centrale, côté Pacifique).

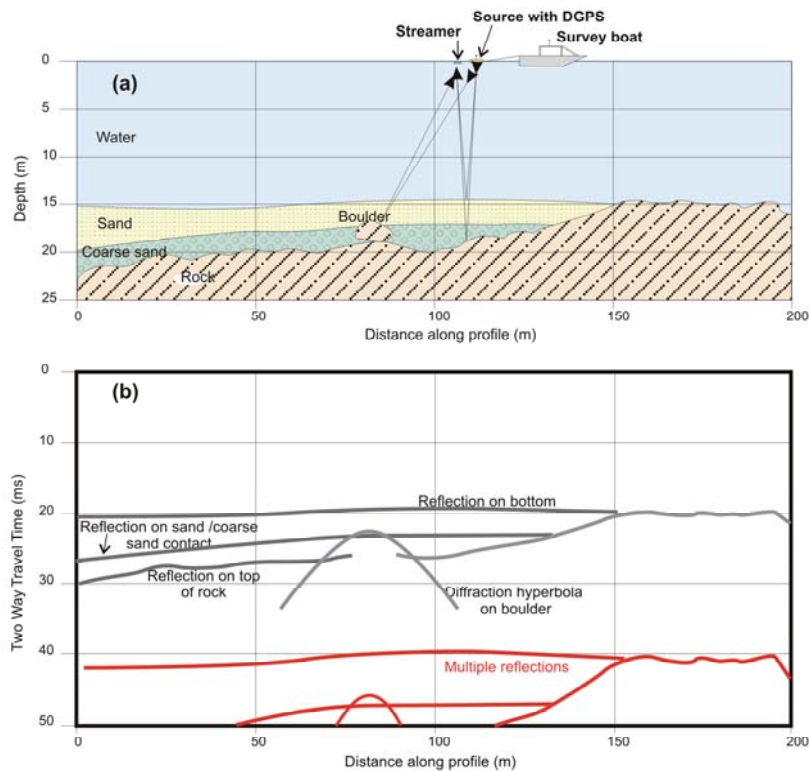


Figure 9. Principe de la sismique réflexion marine monotrace. En haut : mise en œuvre. En bas : allure des résultats obtenus.

métrie réelle, ce qui rend l'interprétation aisée. Dans le cas où les réflecteurs ont une certaine pente ($>20^\circ$), une distorsion géométrique apparaît qui fausse la pente apparente. Les réflecteurs n'ayant pas d'extension latérale (blocs, épaves,...) sont appelés réflecteurs ponctuels et présentent une signature typique en « hyperboles de diffraction ». Sur l'exemple ci-dessus, un bloc présent sur le fond se traduit par une hyperbole de diffraction. L'objet provoquant l'hyperbole est situé au sommet de celle-ci. La géométrie réelle peut être retrouvée en appliquant une technique appelée « migration » qui est utilisée de manière systématique pour la sismique profonde de l'industrie pétrolière mais rarement pour les applications peu profondes. Les réflexions surlignées en rouge sont appelées multiples et correspondent à un trajet multiple de l'onde entre la surface de l'eau et le fond.

L'avantage principal du *sub bottom profiler* est l'obtention d'une image continue de la subsurface le long du profil. La continuité des couches, leur épaisseur, la présence et la profondeur d'obstacles peuvent être déterminés. Dans le cas de conditions favorables pour le *sub bottom profiler*, cette méthode est de loin la meilleure pour déterminer la structure de la subsurface.

Toutefois, comme pour chaque méthode géophysique, il y a des limites :

- Certains types de matériaux provoquent une forte atténuation du signal. L'exemple typique est la présence de vase et de matériaux très fins contenant

une fraction organique produisant du méthane. Les petites bulles de gaz sont piégées dans les sédiments et absorbent une partie de l'énergie du signal sismique ;

- L'hétérogénéité des matériaux rend l'interprétation complexe et contribue à l'affaiblissement du signal.
- Les artefacts les plus marqués sur les sections sismiques sont provoqués par des réflexions multiples entre le fond et la surface de l'eau. Les multiples du fond apparaissent à deux fois la hauteur d'eau. Sur l'exemple ci-dessus, les multiples sont surlignés en rouge. Plus la hauteur d'eau est faible, plus les multiples seront rapprochés sur la section sismique et plus l'identification des réflecteurs réels sera difficile. La limite de profondeur d'eau pour l'acquisition de données sismiques de qualité dépend également du caractère du fond. Pour un équipement de type *boomer* (fig. 10), les données deviennent généralement ininterprétables pour des hauteurs d'eau inférieures à 4-5 m.

La figure 11 illustre un profil sismique obtenu avec un *boomer* en mer. Le fond se situe à une profondeur de 100 m environ. On distingue nettement 2 anciennes dunes ou cordons littoraux, recouverts d'une couche homogène de sédiments fins, très transparente en sismique. Plus bas, on distingue plusieurs couches horizontales surmontant une surface d'érosion. Sous celle-ci, les couches sont inclinées. L'image obtenue donne une

description géométrique précise de la structure géologique sous le fond marin. La méthode n'apporte pas d'information directe sur la nature des couches. Tenant compte des conditions géologiques locales, on peut cependant interpréter divers attributs sismiques, tels que transparence, régularité des réflecteurs, intensité, en termes de nature probable.

4.2. Autres méthodes géophysiques

D'autres méthodes géophysiques peuvent être mises en œuvre dans le cadre des études de géomorphologie marine. Citons la sismique multitraces, en mode réflexion ou réfraction, la magnétométrie ou encore les méthodes géoélectriques marines.



Figure 10. Equipement sismique boomer et mise en oeuvre.

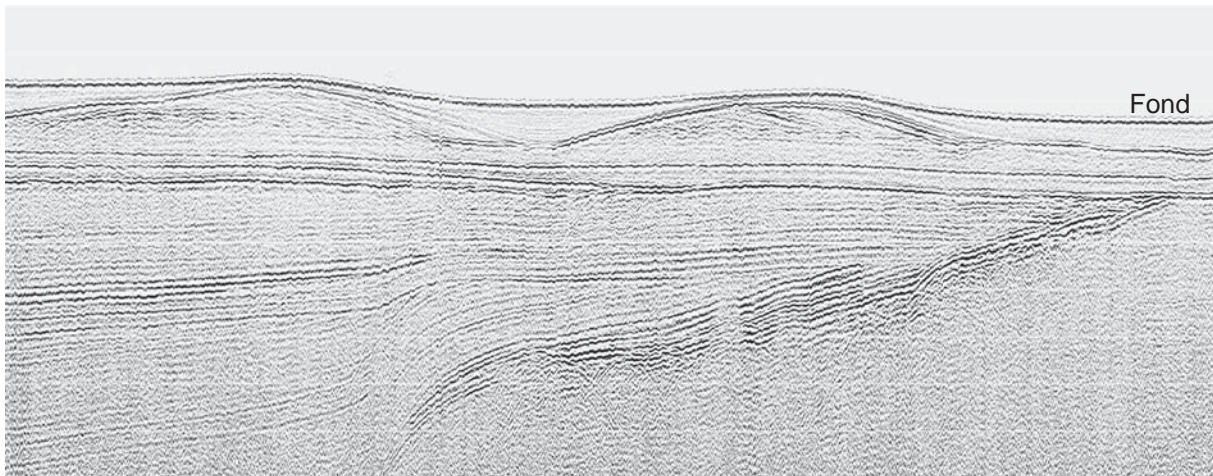


Figure 11. Profil sismique réflexion (boomer) enregistré en mer Tyrrhénienne. Longueur du profil: 500 m. Pénétration sous le fond: 50 m.

5. INTÉGRATION ET INTERPRÉTATION DES DONNÉES

Les mesures hydrographiques et géophysiques doivent être complétées par des observations géologiques et par échantillonnage direct. De nombreuses techniques sont disponibles, soit au départ d'un bateau (prélèvement à la benne, vibrocarottage) soit au départ d'une plateforme (forage). L'intégration de toutes les données disponibles permet d'interpréter les résultats obtenus. L'interprétation est présentée sous forme de coupes ou cartes. La figure 12 illustre l'interprétation d'un profil de sismique réflexion. On distingue nettement une épaisse couche de sédiments argileux, recouvrant la surface d'érosion qui constitue le sommet du substratum.

Les réflecteurs inclinés visibles plus bas sont des multiples, sans signification géologique.

6. CONCLUSIONS

L'eau constitue un milieu particulièrement favorable pour la propagation des ondes acoustiques et sismiques. Grâce à l'industrie offshore, nous disposons d'un grand nombre de méthodes non destructives permettant d'obtenir une image continue du fond et des couches sous jacentes. Ces méthodes sont largement utilisées dans le cadre des reconnaissances géologiques préalables aux grands travaux d'infrastructures. En outre, elles constituent une base essentielle pour toute étude de géomorphologie marine.

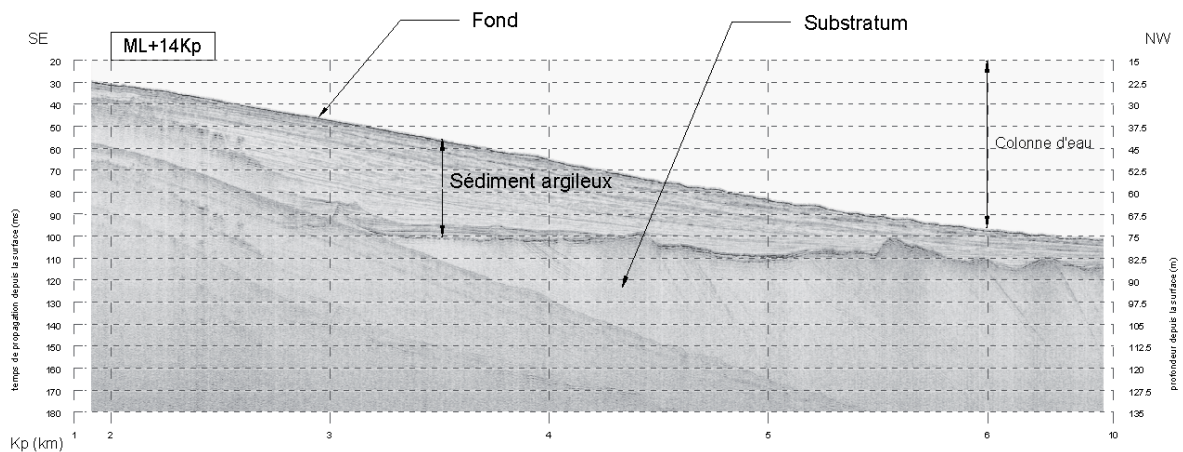


Figure 12. Exemple de profil sismique marin interprété (Afrique du Nord).

Toutes ces techniques hydrographiques et géophysiques sont des méthodes indirectes, basées sur les lois de la physique. Comparées aux méthodes ponctuelles par sondage ou plongeur, elles permettent une couverture complète et rapide des zones à investiguer. Cependant, elles ont également des limitations qui sont fonction des méthodes elles-mêmes et de la nature des terrains à investiguer. La réalisation d'essais ponctuels reste indispensable pour calibrer les mesures et donc interpréter correctement les résultats. L'idéal est de

réaliser d'abord une couverture complète par méthodes hydrographiques et géophysiques, et d'implanter ensuite les essais ponctuels. On peut ainsi optimiser la campagne de reconnaissance.

Les aspects relatifs à la qualité jouent un rôle essentiel dans les campagnes hydrographiques et géophysiques. Il s'agit d'une part de la qualité des mesures elles-mêmes, mais aussi du choix correct des méthodes en fonction des objectifs à atteindre et des conditions locales, et enfin de la qualité de l'interprétation.