



GENIE CIVIL, GENIE COTIER : APPORT DE LA GEOPHYSIQUE.

R. LAGABRIELLE
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes.

LECTURE SPECIALE

ABSTRACT

The geophysical methods which are mostly used for site survey for harbour, or other shallow construction at sea, are reviewed and discussed. They are classified in two main categories: seismic methods, based on elastic waves propagation, and electrical methods, based on direct current potential measurements. Each method is briefly described, its advantages and drawbacks are underlined.

1. INTRODUCTION

Parmi les méthodes utilisées pour la reconnaissance du sous-sol marin avant des travaux de Génie Civil en environnement portuaire ou côtier, la Géophysique tient une place originale. Elle est insuffisamment connue et peu pratiquée, au moins en France. Pour de nombreux maîtres d'œuvre ou maîtres d'ouvrage, "Géophysique" est synonyme de sismique réflexion. Or, si cette technique est très efficace pour des profondeurs d'eau supérieures à 15 m, elle donne souvent de mauvais résultats aux profondeurs plus faibles. D'autres méthodes existent qui peuvent apporter rapidement et à faible coût des réponses satisfaisantes à certaines questions de reconnaissance.

Les questions auxquelles peut répondre la Géophysique sont essentiellement géométriques :

- Quelle est la répartition des matériaux constitutifs du sous-sol? Quelle est leur extension latérale? Quelle est la forme et la profondeur de l'interface qui sépare le sédiment meuble formant le fond de la mer et le substratum rocheux?
- La Géophysique contribue aussi à l'identification des matériaux, elle permet parfois de déterminer la valeur de paramètres caractérisant le sous-sol et dont la connaissance est utile à la conception des ouvrages.

Notre propos est ici de faire un inventaire critique des méthodes géophysiques pouvant être utilisées pour la reconnaissance du sous-sol marin en vue de travaux portuaires ou de génie côtier.

On peut classer les méthodes en trois catégories principales : Les deux premières font référence au phénomène physique à la base de la conception des méthodes, la troisième au mode de mise en œuvre.

La première catégorie de méthodes est constituée par les méthodes sismiques : sismique réflexion, sismique réfraction, sonar latéral, bathymétrie par écho-sondeur et pénétrateur de sédiments (cas particulier de la sismique réflexion).

La deuxième catégorie comprend les méthodes qui utilisent la circulation de courant électrique continu : prospection électrique par courant continu en milieu marin, mesure de la résistivité des matériaux in situ.

La troisième catégorie de méthodes est formée par les diagaphies et plus généralement la Géophysique de forage.

2. LES METHODES SISMIQUES

1. La sismique réflexion.

C'est la méthode de loin la plus employée en Géophysique marine. On utilise une source sismique produisant une impulsion mécanique riche en hautes fréquences (canon à air, étinceleur, "boomer"...) de manière à ce que les temps de trajet aller-retour des impulsions puissent être mesurés avec une précision suffisante pour que les différents réflecteurs présents dans le sous-sol soient bien identifiés (fréquence élevée signifie faible longueur d'onde et donc bonne résolution). Une flûte d'hydrophones est traînée entre deux eaux derrière le bateau sur lequel se trouve le laboratoire sismique. La coupe-temps est imprimée en temps réel et l'ensemble des données peut être enregistré numériquement en vue de traitements et de rejeux éventuels de retour au bureau. Des traitements classiques servent parfois à évaluer la vitesse des ondes mécaniques dans les différents matériaux rencontrés, aidant ainsi à leur identification.

La figure 1, extraite de (1), donne le principe de la sismique réflexion en mer. La figure 2, extraite de (2), montre un exemple de coupe-temps et son interprétation. Cette figure montre à la fois la puissance de la méthode et permet d'illustrer ses limites.

La coupe-temps met en évidence la structure géométrique du sous-sol marin. La topographie du fond est relativement douce, il est constitué de sable dont les variations d'épaisseur apparaissent bien. La couche de sédiment meuble est limitée vers le bas par un substratum rocheux, responsable d'une réflexion énergétique bien visible sur la coupe. De plus celle-ci montre clairement l'hétérogénéité de la couche de sable : une paléovallée ainsi que des interfaces, séparant des matériaux de propriétés différentes, sont marquées par des réflexions nettes. L'interpréteur les a distingués grâce aux vitesses différentes des ondes sismiques qui les caractérisent. L'interprétation géologique globale, avec transformation de l'échelle des temps en échelle des profondeurs est donnée en bas de la figure.

Sur la coupe-temps, apparaît, au temps double par rapport à la réflexion sur le fond de l'eau, la première réflexion multiple. Ici, elle arrive après la réflexion sur le substratum, elle ne masque donc aucun événement utile et ne perturbe pas l'interprétation des résultats. Cette campagne de sismique réflexion a donc été efficace.

Mais supposons que la même structure du sous-sol se rencontre sous une profondeur d'eau qui soit la moitié de celle observée sur la figure : la première réflexion multiple, au temps double par rapport à celle sur le fond de l'eau, aurait une amplitude beaucoup plus forte car son trajet serait deux fois moins long, elle masquerait complètement tous les événements intéressants. La coupe-temps serait illisible, la campagne de mesures inutile et le résultat n'en aurait sans doute pas été publié !

Il faut donc se souvenir que la sismique réflexion est rarement applicable lorsque la profondeur de l'eau est inférieure à 10m.

Il existe cependant de remarquables exceptions à cette règle : lorsque le fond de la mer est formé de matériaux dont l'impédance acoustique est proche de celle de l'eau et évolue lentement en profondeur, les réflexions multiples sont très affaiblies et la sismique réflexion est utilisable quelle que soit la profondeur de l'eau avec des résultats parfois remarquables.

2. Le pénétrateur de sédiments.

Les inconvénients de la sismique réflexion que nous venons de souligner ont fait l'objet de tentatives de corrections. C'est la raison pour laquelle les pénétrateurs de sédiments (mud penetrators en anglais) ont été mis au point.

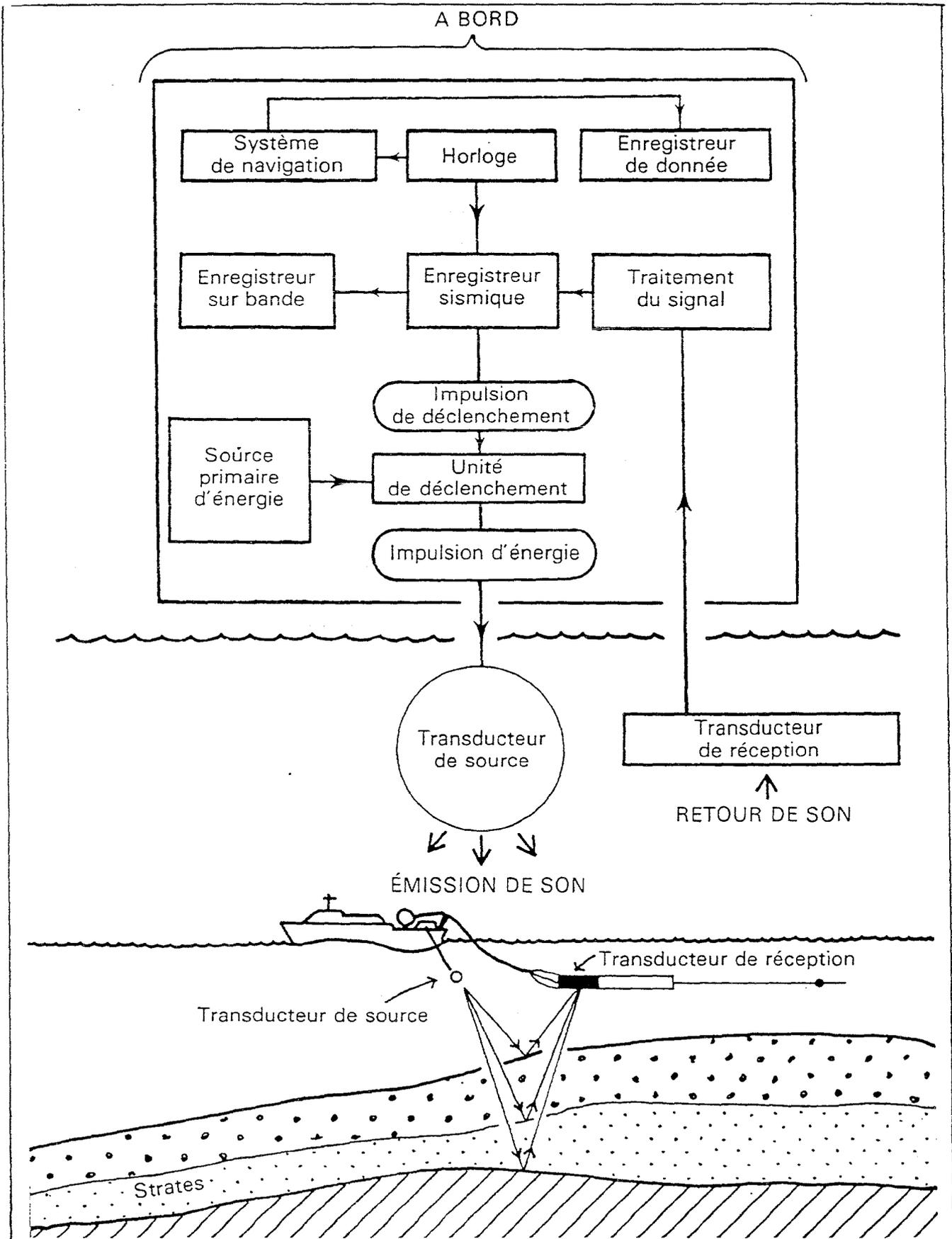
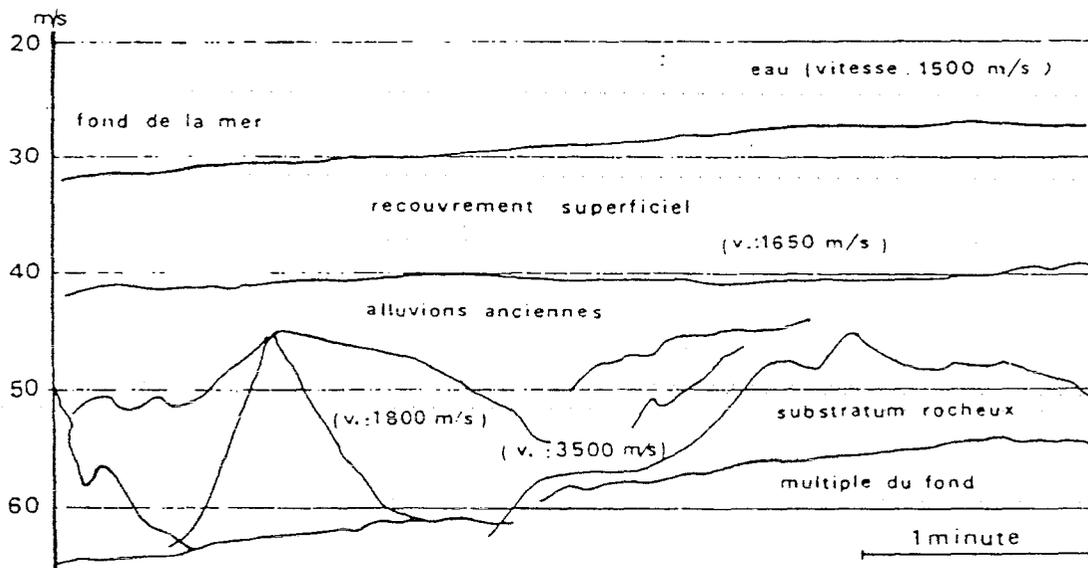
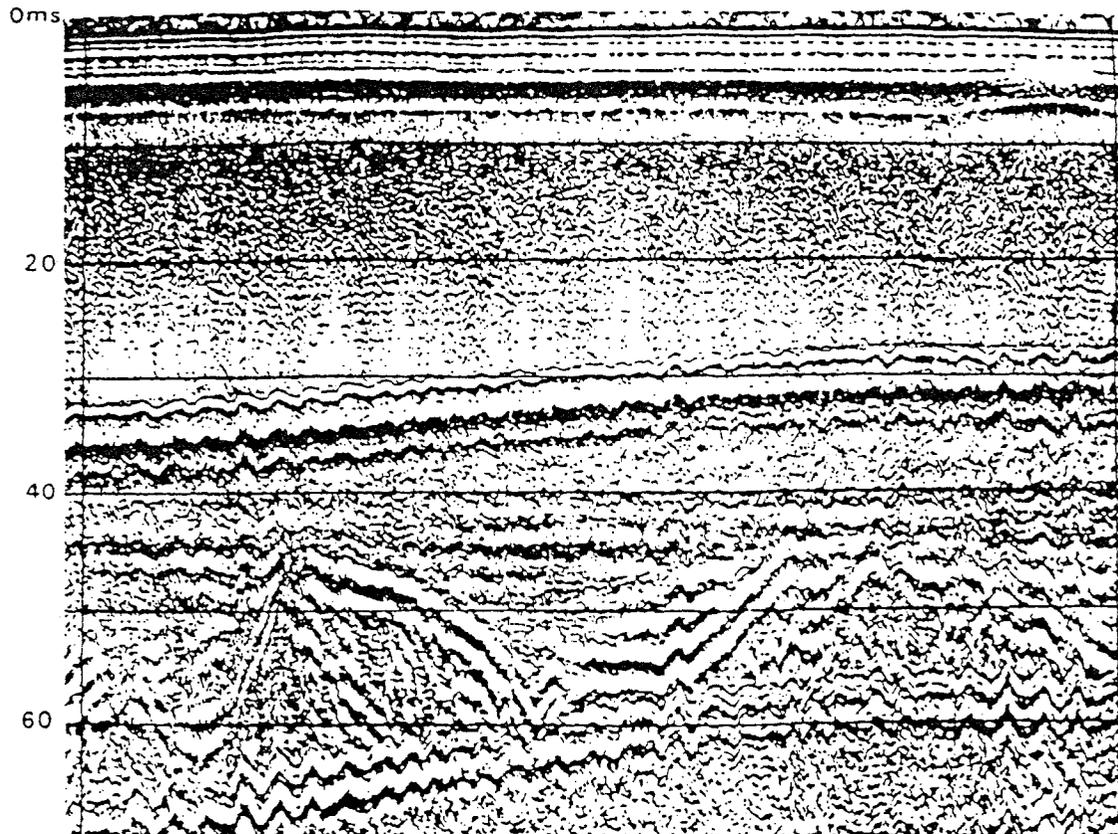
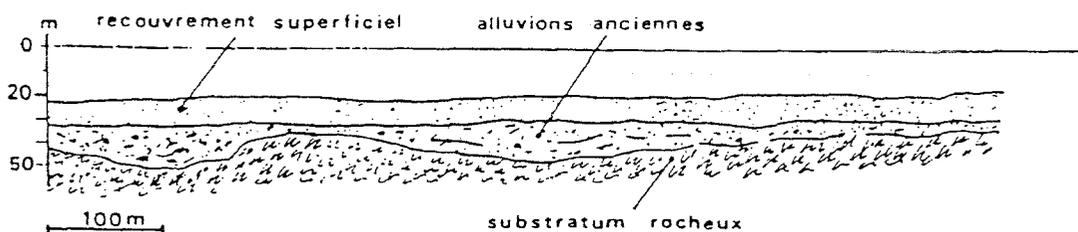


Fig. 1 : Bloc diagramme montrant les composants principaux d'un système de sismique à faible pénétration



INTERPRÉTATION COUPE-TEMPS



COUPE INTERPRÉTATIVE (exagération verticale: 2 X)

Fig. 2 : Enregistrement de sismique réflexion - (méthode Sparker) d'une paléovallée.

Il s'agit bien en réalité de sismique réflexion, mais la source sismique est un émetteur piézo-électrique, donc de fréquence élevée. L'idée est que l'émission d'ondelettes courtes aura pour conséquence que la durée, sur les coupes-temps, du signal correspondant aux réflexions multiples sera suffisamment brève pour que les événements utiles concernant les sédiments ne soient pas masqués. D'autre-part, la faible durée des signaux doit conduire à une bonne résolution, indispensable si l'épaisseur des sédiments est faible.

Tout ceci est vrai, et les pénétrateurs de sédiments donnent de bons résultats par faibles profondeurs d'eau, mais uniquement si le sédiment est de la vase (comme l'indique d'ailleurs le nom anglais). Si le sédiment est sableux, les hautes fréquences ne sont pas transmises et la méthode devient inefficace.

3. La bathymétrie.

Si on monte encore en fréquence, l'onde mécanique ne se propage plus que dans l'eau et se réfléchit presque totalement sur le fond de la mer. La sismique réflexion prend alors le nom de bathymétrie. Nous n'en parlons ici que pour mémoire car elle n'est généralement pas considérée comme une technique géophysique. Cependant, c'est une méthode de reconnaissance très utile. Elle est presque toujours pratiquée simultanément aux autres méthodes géophysiques car la profondeur est une donnée indispensable à l'interprétation. Pour la reconnaissance, la bathymétrie est pleine d'enseignements, même si elle est utilisée seule. En effet, la topographie fine du fond marin renseigne sur la nature et la structure du sous-sol, de même la forme et l'amplitude du signal enregistré dépend de la nature des matériaux formant le fond de l'eau.

4. Le sonar latéral.

Comme la bathymétrie qui ne donne directement d'informations que sur la géométrie du fond marin, le sonar latéral travaille à une fréquence suffisamment élevée pour que les ondes mécaniques se réfléchissent totalement sur la surface des matériaux et que les détails mis en évidence soient très fins.

Le principe du sonar latéral est d'émettre une impulsion mécanique très brève à une hauteur à peu près constante au dessus du fond et suivant un angle très ouvert dans un plan vertical. L'enregistrement en fonction du temps du signal réfléchi sur le fond en donne une image semblable à celle que l'on observerait si on pouvait l'éclairer "en lumière rasante". Cette image permet de visualiser la topographie fine du fond, de découvrir des obstacles localisés (la surface explorée est grande et le domaine concerné par la reconnaissance

peut être reconnu de manière exhaustive), on peut ainsi identifier la nature des matériaux rencontrés : enrochements, pierres, rocher, sable ou vase. C'est une méthode rapide, assez simple de mise en œuvre, mais qui demande pour l'interprétation un technicien expérimenté.

La figure 3, tirée d'un rapport de Jouanneau, représente un enregistrement au fond de la Garonne à Bordeaux au voisinage du pont de Pierre.

5. La sismique réfraction.

La sismique réfraction, largement utilisée en Génie-Civil à terre, peut rendre aussi de grand services en mer dans cas suivants :

La profondeur de l'eau est inférieure à 10m et, comme nous l'avons vu, la sismique réflexion est inopérante.

Il y a plus de 10m d'eau mais l'on désire une résolution maximale sur les premiers mètres du sous-sol sous-marin.

La connaissance des vitesses sismiques dans les différents matériaux est nécessaire pour prévoir les procédés de terrassement à employer (dragage, déroctage à l'explosif, etc...).

Les principes de la méthode sont les mêmes qu'à terre, avec les mêmes contraintes quant aux conditions d'application. En particulier, la vitesse des ondes de compression dans les différentes couches doit croître avec la profondeur. Ceci signifie que la première couche de sédiment meuble doit être caractérisée par une vitesse supérieure à celle de l'eau, soit plus de 1500m/s environ.

La méthode donne de meilleurs résultats si elle est mise en œuvre avec des géophones posés sur le fond. Ceux-ci sont en effet sensibles aux mouvements du fond et peu affectés par les bruits directement transmis par l'eau (vagues, bruits de moteur, etc...). On peut être amené à utiliser deux bateaux : l'un prenant en charge la source sismique et l'autre la flûte de géophones et le laboratoire d'enregistrement. Ainsi, il est plus facile de procéder aux tirs direct, inverse, au centre et en offset dont la combinaison des résultats est indispensable à une interprétation de qualité.

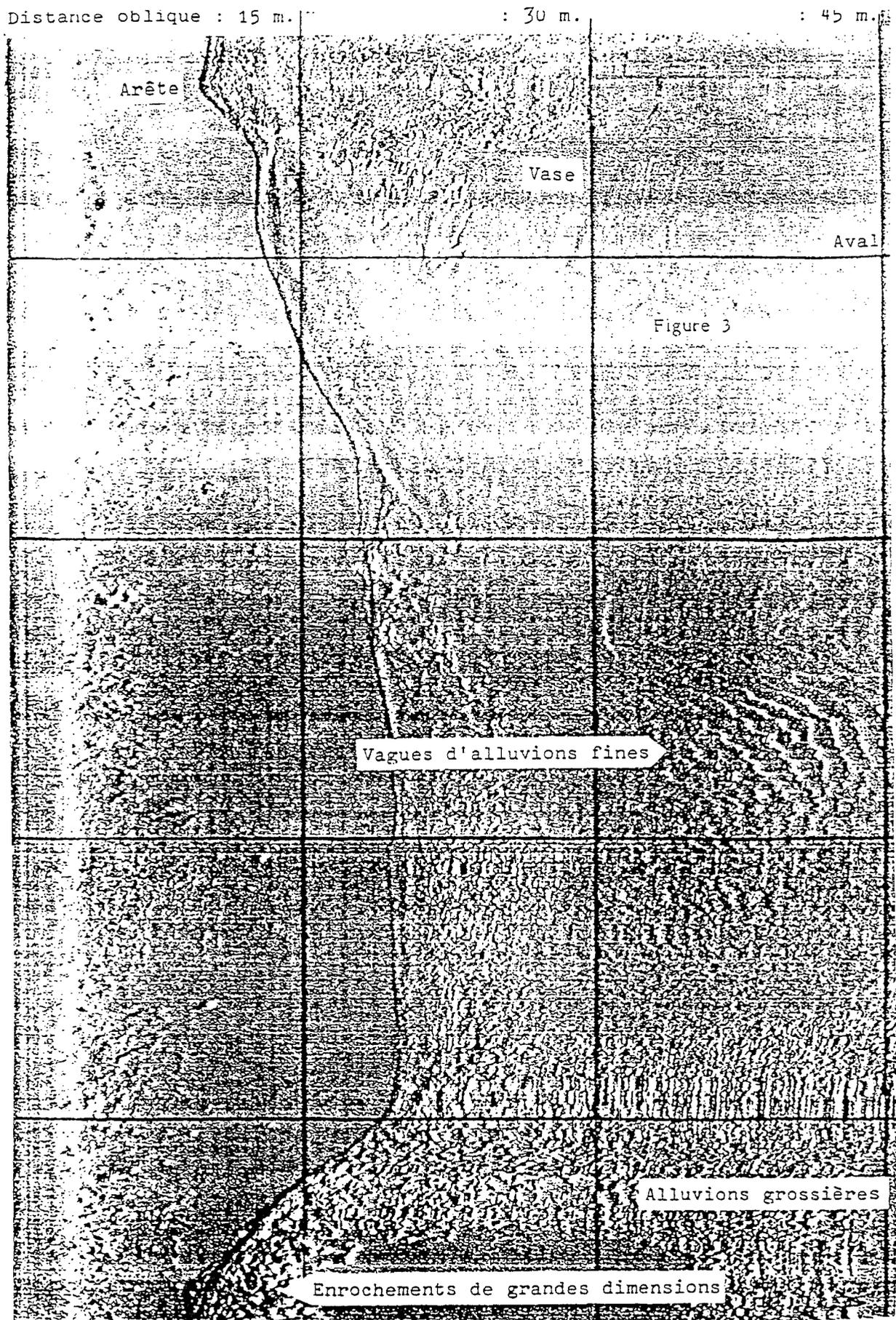


Fig. 3 : Enregistrement au sonar latéral

Une autre manière efficace de procéder consiste à opérer avec un dispositif réciproque, le géophone unique étant posé sur le fond (sa position parfaitement repérée) et la source se déplaçant le long de la ligne de tir. Cette manière de faire permet de multiplier le nombre de points de mesures (si le bateau traînant la source est assez lent, la succession des points de mesure peut être considérée comme pratiquement continue) et donc de travailler avec un dispositif optimum. La figure 4 illustre ce type de mise en œuvre.

La sismique réfraction en mer est plus lourde à utiliser que la sismique réflexion et son interprétation est plus délicate. Cependant, elle conduit à une détermination des vitesses plus sûre et elle donne souvent de bons résultats là où la sismique réflexion n'en fournirait pas.

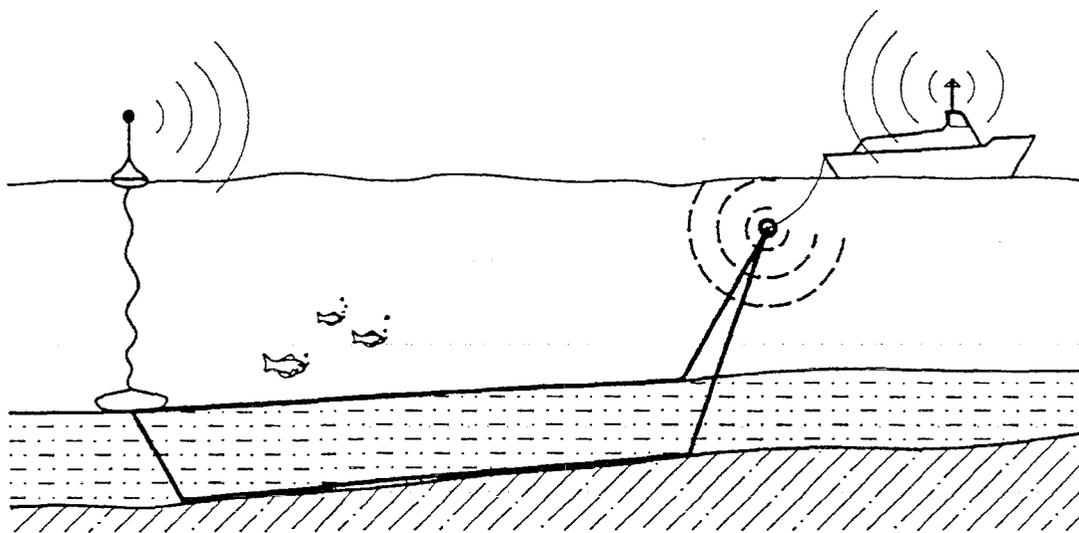


Fig. 4 : Schéma de mise en œuvre de la sismique réfraction avec un dispositif réciproque.

4. LES METHODES ELECTRIQUES

1. La prospection électrique par courant continu en mer.

Les méthodes électriques sont très mal connues comme méthodes de reconnaissance géophysique en mer. A cela, il y a plusieurs raisons :

L'eau de mer est un très bon conducteur de l'électricité (sa résistivité vaut environ $0,25 \text{ W.m}$), on peut donc craindre que la plus grande partie du courant reste dans l'eau et ne pénètre pas suffisamment dans les sédiments pour que les mesures contiennent de l'information sur ces derniers. Ceci n'est vrai que partiellement, en effet les sédiments sont gorgés d'eau de mer et leur résistivité est elle aussi très faible, si bien que le courant électrique y circule bien. Cependant, si la profondeur de l'eau est grande devant la taille des dispositifs de mesure et l'épaisseur des matériaux à reconnaître, il est vrai que pour la raison invoquée, la méthode n'est pas applicable. Il y a donc une limite en profondeur pour l'emploi de la prospection électrique par courant continu, cette limite peut être évaluée à environ 15 m.

La deuxième raison pour laquelle la méthode n'est pas très connue provient du quasi monopole de la sismique réflexion en matière de prospection géophysique sous l'eau, monopole lié à sa relative facilité de mise en œuvre et aux excellents résultats publiés.

La figure 5 montre le principe de la méthode. Sur ce schéma, le dispositif de mesure est traîné au fond de l'eau. Cette manière de faire présente l'avantage de la facilité de mise en œuvre : le câble multiconducteur, le long duquel sont réparties les électrodes d'injection de courant et les électrodes de mesure du potentiel, est plus dense que l'eau. Il se pose donc naturellement sur le fond et la résistance que le frottement sur le fond oppose à l'avancement du bateau assure la forme rectiligne du dispositif dont la géométrie est donc parfaitement connue. De plus le dispositif est ainsi à l'abri du mauvais temps, ce qui permet de travailler même par mer agitée.

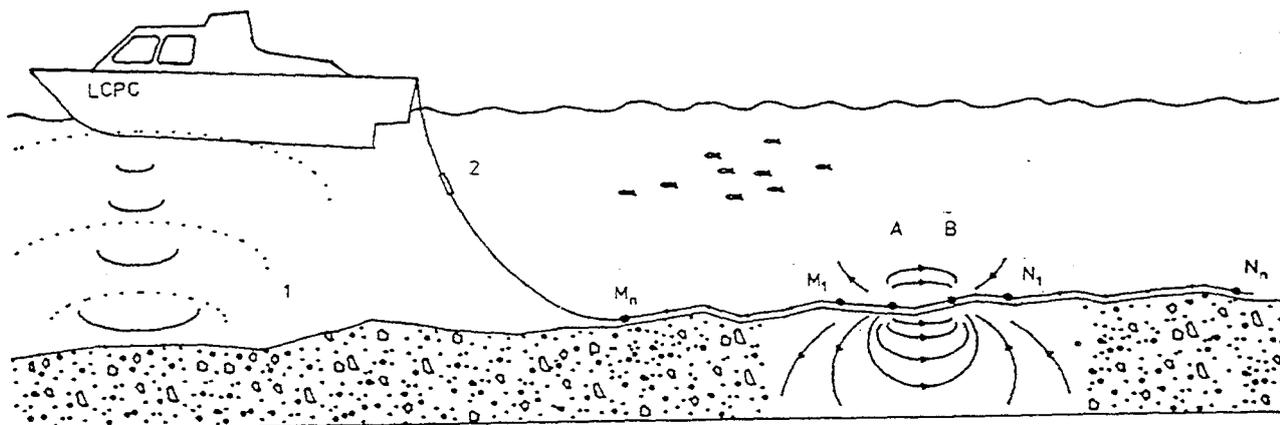


Fig. 5 : Schéma illustrant la mise en œuvre de la prospection électrique par courant continu avec électrodes au fond de l'eau. Le courant est injecté par les électrodes A et B et circule à la fois dans l'eau et dans les matériaux subaquatiques. Les paires d'électrodes $M_1, N_1, \dots, M_i, N_i, \dots, M_n, N_n$, servent à mesurer n résistivités apparentes. Simultanément, on mesure la résistivité de l'eau au moyen d'une petite sonde (repère 2) et la profondeur au moyen d'un écho-sondeur (repère 1). Ces $n + 2$ données sont interprétées pour connaître la structure géoélectrique du milieu. L'ensemble est déplacé en continu à une vitesse de quelques kilomètres par heure.

Aucune raison théorique n'impose cependant d'employer un dispositif posé sur le fond. Un dispositif flottant est tout aussi efficace, à condition d'en maîtriser la géométrie.

L'interprétation repose sur le fait que la structure électrique du milieu peut être assimilée à un empilement de couches très conductrices reposant sur un substratum isolant. On utilise donc un dispositif long devant la profondeur de l'eau et celle supposée du substratum, si bien que la résistivité apparente mesurée dépend simplement de la conductance longitudinale ⁽¹⁾ de

(1) Rappel : la conductance longitudinale C d'une couche d'épaisseur h et de résistivité ρ est le rapport $C = h/\rho$. S'il y a plusieurs couches empilées, la conductance longitudinale de l'ensemble est la somme des conductances de chacune des couches.

l'empilement conducteur. On mesure la conductance longitudinale de l'eau, on déduit donc celle des sédiments meubles. On peut ensuite en dresser la carte qui se lit comme une carte d'épaisseurs et que quelques informations complémentaires permettent de transformer effectivement en carte d'épaisseurs (ces informations peuvent consister en la connaissance de la résistivité des sédiments ou de celle de l'épaisseur du sédiment en quelques points).

La figure 6 donne le principe du calcul de la conductance longitudinale du sédiment.((3)), la figure 7 le résultat d'une campagne dans un fleuve d'eau saumâtre ((4)).

La prospection électrique par courant continu sert donc à dresser la carte de l'épaisseur des sédiments meubles formant le fond de la mer. Elle n'est applicable que si l'eau a une profondeur inférieure à 15m. Mais c'est dans ce cas que la sismique réflexion est souvent moins efficace. Les deux méthodes sont donc bien complémentaires.

2. Mesure de la résistivité in situ : densité du matériau.

Les sédiments meubles sont constitués d'une matrice, que l'on peut considérer comme isolante, et d'eau de mer très conductrice. Pour un matériau de granulométrie donnée, la résistivité dépend uniquement de la teneur en eau et donc de la masse volumique du matériau. Cette remarque est parfois mise à profit pour mesurer en place la densité des sédiments meubles formant le fond marin. Pour cela on dispose sur la tige, recouverte d'un isolant, d'un cône pénétrométrique un petit dispositif à quatre électrodes (deux électrodes d'injection et deux de mesure du potentiel) qui servent à mesurer in situ la résistivité du matériau. Naturellement, il faut aussi mesurer la résistivité de l'eau interstitielle et des étalonnages sont nécessaires pour passer à la densité du matériau.

On dispose donc d'une méthode efficace pour connaître la densité réelle du matériau puisqu'elle est mesurée en place avec le minimum possible de perturbation.

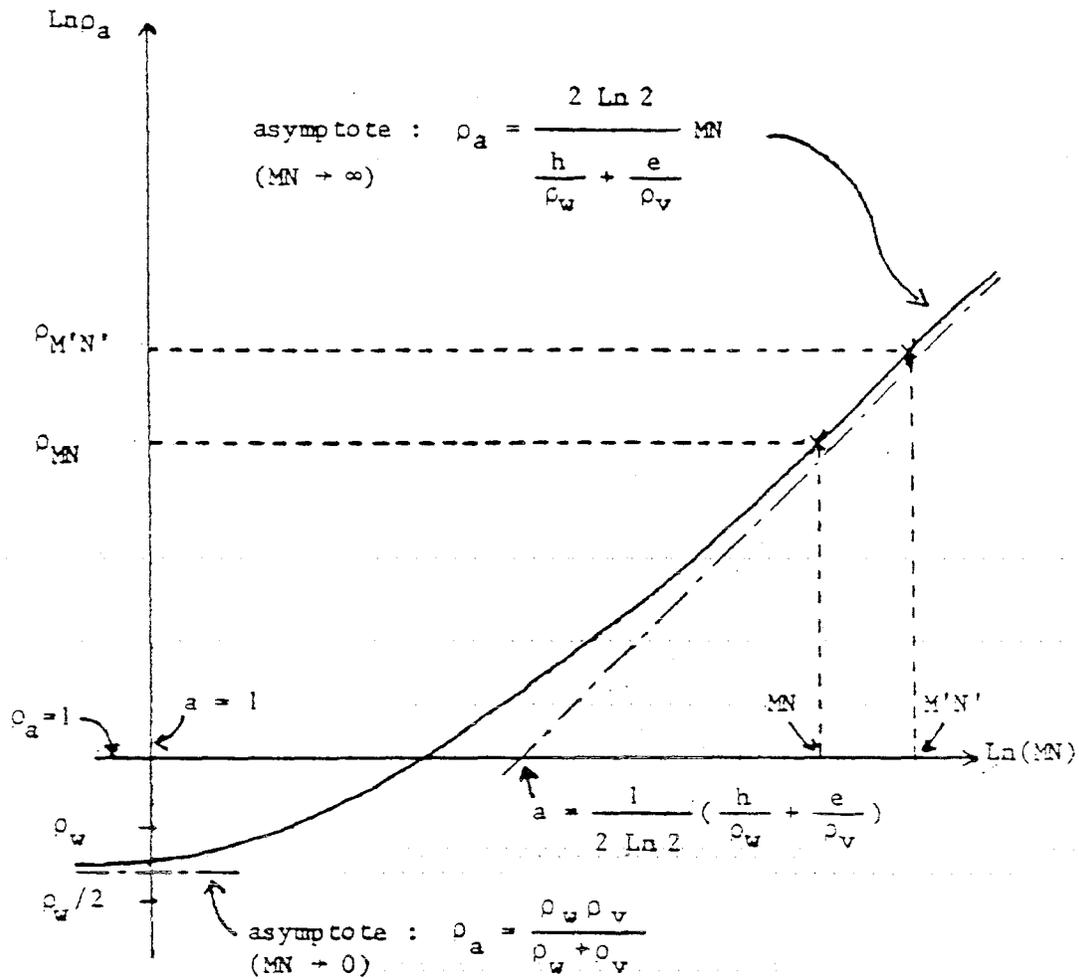


Fig. 6 : Courbe de sondage électrique théorique illustrant les bases de l'interprétation des enregistrements de résistivité apparente par traîné des électrodes au fond de l'eau. Milieu marin. Dispositif de type Wenner.

5. CONCLUSION

Nous avons fait un rapide tour d'horizon critique des méthodes géophysiques les plus souvent utilisées pour la reconnaissance en mer à faible profondeur d'eau.

Nous n'avons pas évoqué les méthodes géophysiques de forage, particulièrement les diagraphies. Elles sont en effet peu employées en mer car leur mise en œuvre semble poser des difficultés trop importantes. Pourtant, elles apportent des renseignements fort utiles quant à l'identification et aux propriétés des matériaux.

Fin 1991, Halleux (5) a fait un inventaire très complet des méthodes géophysiques applicables en eau douce, son travail peut facilement être étendu à la mer, par faible profondeur d'eau, à l'exception naturellement de la méthode radar.

La Géophysique mériterait, à notre avis, d'être davantage connue et plus employée qu'elle ne l'est car, associée à des forages judicieusement positionnés en fonction de ses résultats, elle permet de lever bien des inconnues sur la nature, les propriétés, et la répartition des matériaux du sous-sol marin pour un investissement ne représentant que quelques pourcents du prix des travaux et qui évite souvent des dépassements de coût pouvant atteindre plus de 100%. C'est donc un investissement toujours très rentable.

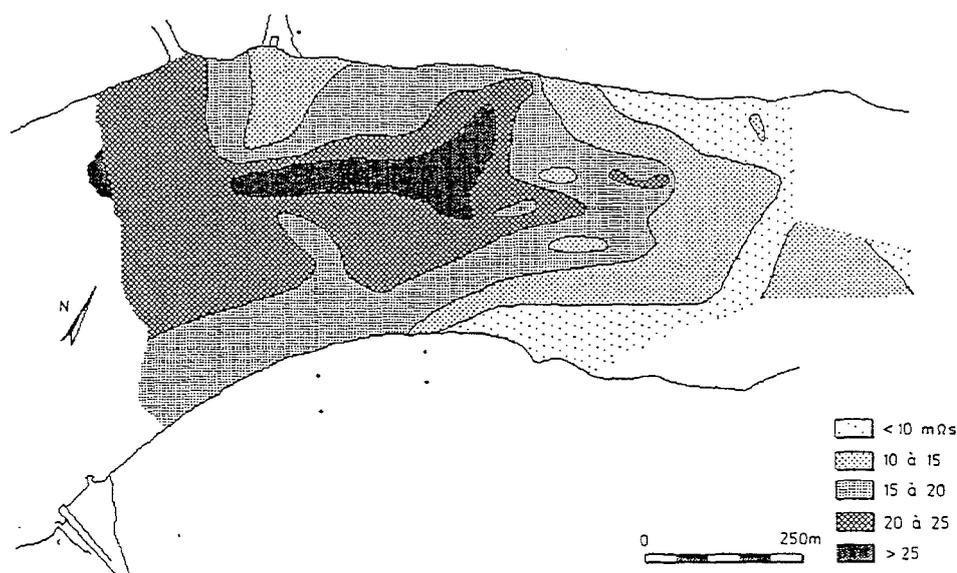


Fig. 7 : Fleuve d'eau saumâtre. Carte de la conductance longitudinale C des sédiments meubles. Cette carte peut être lue comme un carte d'épaisseur.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) Mac Quillin R., Bacon M., Barclay W., (Viallix J.R. traducteur), 1976, Introduction à l'interprétation sismique, SCM, Paris.
- (2) Cressard A.P., Augis C., 1984, Granulats marins en France, Bull. AIGI, 29, pp 41-47.
- (3) Lagabrielle R., 1986, Nouvelles applications de méthodes géophysiques à la reconnaissance en Génie Civil, Rapports des Laboratoires, GT 17, LCPC, Paris.
- (4) Lagabrielle R., Chevalier M., 1991, Prospection électrique par courant continu en site aquatique, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 171, pp 57-62.
- (5) Halleux L., 1991, Prospection géophysique en eau douce..., Thèse de doctorat, Université de Liège.