

The cover features a textured, painterly illustration of a deep blue canyon. A yellow submersible with two bright headlights is positioned in the lower-left foreground, appearing to be in the canyon. The canyon walls are rendered in various shades of blue and white, with visible cracks and textures. The overall atmosphere is dark and mysterious.

JACQUES KORNPROBST
CHRISTINE LAVERNE

PRÉFACE DE
JEAN-FRANÇOIS MINSTER

À LA CONQUÊTE
DES GRANDS FONDS

éditions
Quæ

JACQUES KORNPBST
CHRISTINE LAVERNE

À LA CONQUÊTE
DES GRANDS FONDS
Techniques d'étude de la géologie marine

PRÉFACE DE
JEAN-FRANÇOIS MINSTER

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles cedex
www.quae.com

© Éditions Quæ, 2011
ISBN 978-2-7592-0897-5

Le code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction même partielle du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

SOMMAIRE

Remerciements	6
Préface	9
Avant-propos	11
LE RELIEF DES FONDS MARINS	15
LE PLOMB-SONDE ET LA BATHYMÉTRIE	15
LES SONDAGES ACOUSTIQUES	16
LES CARTES BATHYMÉTRIQUES	21
LA MORPHOLOGIE DES FONDS OCÉANIQUES	23
LE CHAMP DE PESANTEUR	27
LA GRAVITATION UNIVERSELLE	27
ANOMALIES DE BOUGUER ET ISOSTASIE	27
LES DONNÉES ALTIMÉTRIQUES SATELLITAIRES	31
NATURE LITHOLOGIQUE DES FONDS : DRAGAGES ET CAROTTAGES	35
À LA RECHERCHE DES BONS MOUILLAGES	35
LES DRAGAGES : UNE COLLECTE SYSTÉMATIQUE	35
LE CAROTTAGE	42
STRUCTURE ET DYNAMIQUE DES FONDS MARINS : L'APPROCHE SISMIQUE	45
SÉISMES NATURELS ET SISMICITÉ ARTIFICIELLE	45
LA SISMICITÉ NATURELLE DES ZONES OCÉANIQUES	47
LES MÉTHODES SIMIQUES D'ÉTUDES GÉOLOGIQUES ET STRUCTURALES	51
LA STRUCTURE SISMIQUE À TROIS COUCHES DE LA CROÛTE OCÉANIQUE	53
ATTÉNUATION DES ONDES SIMIQUES SOUS LES DORSALES	56
LES MARGES CONTINENTALES	57
LES ÉTUDES MAGNÉTIQUES ET PALÉOMAGNÉTIQUES	63
LE CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE	63
VARIATION DANS LE TEMPS DU CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE	69
LES ANOMALIES MAGNÉTIQUES EN MER	74
L'EXPANSION OCÉANIQUE À PARTIR DES DORSALES	76

VERS LES ABYSSES AVEC SUBMERSIBLES ET ROBOTS	79
LES SUBMERSIBLES	79
LES ROBOTS	100
UN BILAN SCIENTIFIQUE IMPORTANT	105
LES GRANDS BATHYSCAPHES	105
L'EXPÉDITION FAMOUS	106
ALVIN, CYANA ET LES FUMEURS NOIRS	109
KAIKO : VOYAGE AUX EXTRÉMITÉS DE LA MER	113
VEMANAUTE, VALIDATION DU MODÈLE OPHIOLITIQUE	117
ÉCHANTILLONNAGE ET FORAGES PROFONDS	119
LES PLATES-FORMES FIXES ET MOBILES	119
LES PLATES-FORMES FLOTTANTES	120
LES NAVIRES DE FORAGE	122
LE PROJET MOHOLE ET L'ANCRAGE DYNAMIQUE	124
DE NOHOLE AU DEEP SEA DRILLING PROJECT (DSDP)	128
ODP ET LE <i>JOIDES RESOLUTION</i>	132
IODP : UNE ESCADRE AU SERVICE DE LA SCIENCE	137
QUELQUES AVANCÉES SCIENTIFIQUES RÉALISÉES GRÂCE AUX FORAGES OCÉANIQUES	141
DES DONNÉES EN QUANTITÉ SUR LES SÉDIMENTS	141
LA CROÛTE IGNÉE	148
LES PÉRIDOTITES DU MANTEAU SUPÉRIEUR	159
BASALTES, GABBROS ET HARZBURGITES : UNE ÉTROITE PARENTÉ !	162
LA DIVERSITÉ DES BASALTES OCÉANIQUES	164
Et demain ?	171
Pour en savoir plus	175



La cloche à plongeurs
(XIX^e siècle).

REMERCIEMENTS

Les auteurs sont particulièrement reconnaissants à Georges Bronner pour l'importance de sa contribution à la photogravure et à l'infographie des aquarelles de cet ouvrage. Nous remercions très vivement tous ceux qui ont pris la peine de lire tout ou partie du manuscrit et de nous faire part de leurs commentaires : Gilbert Boillot, Georges Ceuleneer, Gilles Chazot, Philippe Lagny, Jean-François Lénat, Catherine Protoyerides, Monique Seyler, Jean-Pierre Valet, Danielle Velde, Philippe Vidal et Ivan Vlastelic. Tous ceux qui nous ont aimablement fourni informations, documents et images ont également droit à notre gratitude et tout spécialement Paul Asimow, Andrew Barclay, Sara Bazin, Amanda Bielskas, Alain Bonneville, Valérie Bosse, Michel Campillo, Mathilde Cannat, Michel Cara, Julie Carlut, Philippe Charvis, Jean-Pierre Chopin, Pierre Choukroune, Arnaud Chulliat, Georges Clauzon, Miriam Colwell, Kari Cooper, Jean-Pierre Couturié, Philippe Dupont, Javier Escartin, Gilbert Féraud, Alain Foucault, Jean Francheteau, Jean-Luc Froger, Dominique Gibert, Jean Goslin, Shaun Hardy, Stan Hart, Thierry Juteau, Benoît Ildefonse, Kenneth Koga, Estelle Koga, Bernard Labadens, Philippe Labazuy, Jean Laherrere, Serge Lallemand, Alain Laverne, Yves Lancelot, François-Dominique de Larouzière, Marie-France Loutre, Marie Marineaux, Jean Mascle, Yves Mathieu, Catherine Mével, Stéphane Monteil, Bjorn Mysen, Catherine Netter, Jean-Michel Nivaggioli, Guy Pautot, Bernard Pierrot, Pierre Recoules, Judith Ronda, Rolland Schlich, Ken Sekimoto, Jean-Claude Sibuet, Edward Stolper, Eleonor Stützman, Brian Upton, Dave Vanko, Jean-Claude Vilminot.



Mise à l'eau du *Nautilus*
au petit matin.



La joie d'être en mer ! Rien à l'horizon
mais la Terre à 5 000 mètres au-dessous.



PRÉFACE

On dit parfois que nous connaissons moins bien le fond des océans que la surface de la Lune. Il est vrai que les sites qui ont pu être étudiés en détail sont peu nombreux et très petits. Il est vrai aussi qu'il existe des zones aussi grandes que la France où l'on ne dispose de pratiquement aucune observation autre que les données satellites. Et pourtant que de progrès techniques au cours des dernières décennies ! Quelle variété d'outils d'observation disponible aujourd'hui ! Que d'évolutions dans notre appréhension du fond des océans, de sa géologie, de sa géophysique ou de sa géochimie !

Jacques Kornprobst et Christine Laverne nous décrivent les techniques d'étude des grands fonds océaniques. Leur ouvrage est essentiellement organisé par grandeur : le relief, la pesanteur, le géoïde, la nature des roches, la structure des fonds, le magnétisme des roches, leur aspect visuel, l'analyse des échantillons et des carottages. Chacun de ces chapitres décrit les techniques mises en œuvre et leur évolution depuis plus d'un siècle jusqu'aux années récentes ; chaque technique a contribué à la compréhension du fond des mers et de leur histoire géologique. L'ouvrage est donc un kaléidoscope historique, technique et géologique du fond des mers. Il est d'ailleurs particulièrement intéressant d'identifier à la fois l'évolution relativement continue des techniques et de la géologie marine et les sauts qui ont été franchis lors de grandes campagnes d'observation. C'est bien par cette convergence de techniques et de thématiques et par ces évolutions de paradigme qu'avancent toutes les disciplines, tout particulièrement les sciences des milieux naturels : l'ouvrage nous amène progressivement à la vision dynamique actuelle de l'évolution des grands fonds océaniques où toutes les disciplines et les techniques apportent leur contribution.

L'ouvrage est remarquablement bien construit et documenté. Le texte est de lecture aisée et très illustré. La référence fréquente aux contributions des équipes et technologies françaises me semble pertinente, car elles ont joué un grand rôle dans la géologie marine au cours des dernières décennies.

Je crois que cet ouvrage sera particulièrement utile aux étudiants de licence et aux enseignants du second degré, car la mise en perspective de cette partie de la géologie est de nature à rendre très compréhensible toute la géologie.

On ne peut que féliciter Jacques Kornprobst et Christine Laverne de ce travail.

Jean-François Minster

Correspondant de l'Académie des sciences
Directeur de la recherche scientifique, Total



Gribouille veut voir le fond de l'eau.



AVANT-PROPOS

Les mers et les océans couvrent les deux tiers de la surface de la Terre, soit environ 340 millions de kilomètres carrés. Le fond de cet immense domaine est resté longtemps inaccessible à l'observation des géologues et des géographes qui en étaient réduits à des supputations. Ainsi, on a longtemps cru que les reliefs des fonds océaniques étaient analogues à ceux des domaines émergés, mais simplement recouverts d'eau salée. Toutefois, il est apparu que la plupart des îles océaniques sont d'origine volcanique. De là est née l'idée que volcans et roches volcaniques, recouverts ou non de sédiments, forment l'essentiel du fond des océans alors que les continents sont en majeure partie constitués de granites et de roches sédimentaires.

Comment avoir une idée plus précise de la nature et de la structure des matériaux qui constituent le sous-sol des abysses ? Nous allons, au fil des pages, décrire l'évolution des méthodes qui permettent d'avoir aujourd'hui une vision plutôt fine des fonds marins, très utile pour la compréhension de la dynamique de la Terre et pour l'exploitation des ressources encore cachées sous les flots. Cette présentation nous conduit à utiliser ici et là des notions qui n'ont pas encore été définies dans le texte. Nous renvoyons alors le lecteur ou la lectrice à l'encadré dans lequel les données de base sont proposées [1].

Tous les aspects de la géologie marine ne sont pas exposés ici dans le même détail, et certains sont même plutôt occultés. En effet, la taille de cet ouvrage ne nous permet pas d'être vraiment complets et, de plus, nos connaissances ne sont pas si profondes. Mais nous avons essayé de donner une vision aussi large que possible de l'approche géologique des fonds marins.





Surtsey, une île océanique née au sud de l'Islande entre 1963 et 1967.



LE RELIEF DES FONDS MARINS

La connaissance du relief des fonds marins est une nécessité pour la navigation. Approcher les côtes et gagner les ports ; reconnaître les bancs où se rassemblent les poissons ; déjouer des obstacles lors de la pose de câbles télégraphiques ; toutes ces activités ont incité les navigateurs à développer des méthodes destinées à la mesure des profondeurs, c'est-à-dire à la bathymétrie. Les géologues et les géographes voulaient avoir une idée de la forme des reliefs sous-marins, qui les renseignerait sur les fonds abyssaux, à la manière dont la géomorphologie apporte des informations sur la structure et la nature des surfaces émergées, sur la Terre comme sur les planètes. Les zoologues, botanistes et biologistes voulaient caractériser les profondeurs auxquelles des êtres vivants étaient capables de prospérer. Ces différents intérêts ont contribué à la mise au point de différentes méthodes destinées à mesurer la profondeur de la mer.

LE PLOMB-SONDE ET LA BATHYMÉTRIE

Une façon simple d'évaluer la profondeur consiste à laisser filer une ligne lestée d'un poids ; lorsque ce dernier touche le fond – le sondeur ressent dans le bras un « toc » – on mesure la longueur de filin utilisée en remontant la ligne et en comptant les brassées. Cette méthode est dite du « plomb-sonde » ; elle est employée depuis l'Antiquité et encore de nos jours, pour la navigation côtière sur petits-fonds.

Charles de Beautemps-Beaupré a généralisé l'emploi du plomb-sonde pour réaliser des cartes bathymétriques des côtes de France, de 1810 à 1820. Ces cartes indiquaient les profondeurs en brasses pour chaque site de sondage, sans dessiner le relief sous-marin. Des profondeurs faibles autorisaient des sondages à bras, ou à l'aide de petits treuils. L'éloignement des côtes et la mesure des profondeurs en haute mer exigeaient des moyens de levage plus puissants pour ramener

*Page de gauche
Sondage au plomb-sonde.
« Et là où ça sera trop profond,
laisse un peu mesurer les autres. »
Marcel Pagnol, Fanny.*

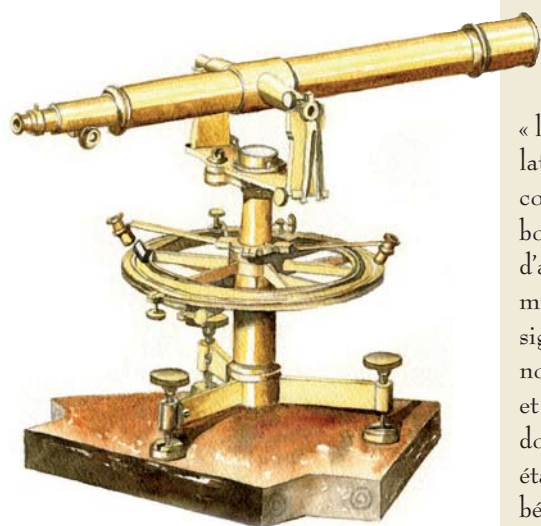


sur le pont des câbles de plusieurs kilomètres de longueur, représentant des charges de plusieurs tonnes. La corde de chanvre a été abandonnée au profit de la « corde à piano », mince câble d'acier très résistant permettant l'emploi de plombs assez pesants. Il a fallu attendre les treuils à vapeur, puis électriques, pour multiplier les données bathymétriques. Sur ces treuils, le « toc » de l'impact du plomb sur le fond – se traduisant par une chute de tension sur le câble – était enregistré par un dynamomètre dont le jeu bloquait le tambour afin d'éviter le foisonnement de la corde. Une incertitude sur les profondeurs réelles était liée à la dérive des bateaux en surface : la ligne s'éloignant de la verticale, les profondeurs étaient surévaluées.

LES SONDAGES ACOUSTIQUES

Des échos sonores sous la mer !

Des expériences menées au début du XIX^e siècle par Jean-Daniel Colladon, à l'aide d'une cloche et d'un cornet acoustique, ont montré que, contrairement aux ondes électromagnétiques comme les ondes radio ou la lumière qui sont



Cercle hydrographique de Borda.

Localisation des sondages en mer

[1]

L'étude bathymétrique des atterrages permettait une localisation facile des points de sondage, par relèvement de repères (ou amers : phares, balises, moulins, clochers) situés à terre, à l'aide d'un compas de relèvement (compas muni d'un viseur ou alidade), ou d'un cercle hydrographique (sextant horizontal permettant de mesurer l'écart angulaire entre deux ou plusieurs amers). Les positions des sondages en haute mer étaient imprécises, surtout en longitude (donnée par « l'estime » et par d'acrobatiques points astronomiques au sextant) alors que la latitude était obtenue plus facilement en mesurant la hauteur du soleil à midi. Au cours de la Seconde Guerre mondiale, des systèmes de radionavigation « hyperboliques » ont été développés pour faciliter l'approche des côtes aux convois d'armement. Le « Decca » est le plus connu. Une station principale est située au milieu d'un triangle constitué par trois autres stations. Toutes émettent des signaux radios synchrones, à des fréquences qui sont des multiples d'une fréquence nominale unique ; les différences de marche entre l'émission de la station principale et celles de chacune des trois sous-stations, dessinent un triple réseau d'hyperboles dont les intersections définissent la position du récepteur. La portée de ces systèmes était limitée à quelques dizaines de kilomètres. Il faut attendre les années 80 pour bénéficier de positionnements satellitaires très précis avec, en particulier, l'apparition du réseau GPS (Global Positioning System) à partir de 1978.

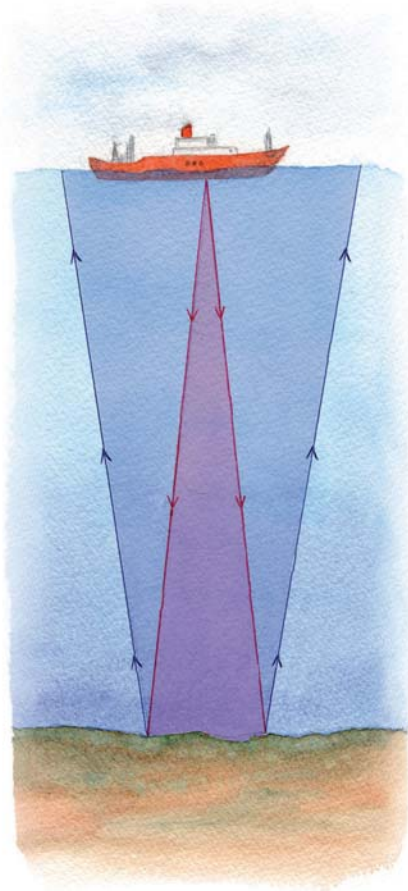


absorbées en quelques centaines de mètres, les ondes sonores, dont la fréquence est beaucoup plus basse, se propagent à grande distance dans l'eau, à une vitesse d'environ 1 500 mètres par seconde. Elles sont réfléchies par les obstacles et leurs échos peuvent être reçus par des hydrophones (microphones adaptés à la réception du son sous l'eau). Ces propriétés ont donné lieu à des applications pratiques à usage maritime. Des « sonnettes » immergées sur la côte est américaine avertissaient de la proximité du littoral les navires munis des récepteurs idoines. Un détecteur d'iceberg a été développé sur ce principe à la suite du naufrage du *Titanic* (1912), capable de détecter une masse de glace dérivante à une distance de plusieurs milles nautiques.

La propagation des ondes sonores est donc apparue, dès le début du xx^e siècle, comme un moyen d'investigation des fonds marins, en particulier pour la mesure des profondeurs : il suffit de mesurer le temps nécessaire à un son pour parcourir la distance aller et retour entre la surface et le fond, pour en déduire la profondeur. Des sondages acoustiques ont été réalisés avec deux types de sources : explosion de petites charges de dynamite juste au-dessous de la surface de la mer ; ou impulsions sonores assez puissantes (pings) générées par des microphones électriques (transducteurs). En 1925 et 1926, le navire océanographique allemand *Meteor* dresse une carte des fonds de l'Atlantique basée sur 33 000 sondages acoustiques. Un sondage pour 3 000 kilomètres carrés : imaginez le relief de la France décrit par 180 points cotés !

Les ultrasons et les sonars

Les ondes sonores, audibles par l'oreille humaine, sont partiellement absorbées par les obstacles qu'elles rencontrent. Les échos en provenance du fond sont donc amortis et le signal bathymétrique perd en netteté. L'idée d'utiliser des ultrasons appartient au prince Albert 1^{er} de Monaco. De grands progrès ont été accomplis au début de la guerre de 1914-1918, lors d'expériences menées sur la détection des sous-marins. Sous l'égide d'un comité interallié (France, Grande-Bretagne, États-Unis) appelé ASDIC (Allied Submarine Detection Investigation Committee), le physicien Paul Langevin met au point un appareil qui permet, en 1918, d'obtenir des échos sur des sous-marins en marche, distants de plusieurs milles nautiques, et d'en déterminer l'azimut. Une lame de quartz piézo-électrique (comme celles qui équipent les montres à quartz) sert à la fois d'émetteur et de récepteur. Excitée par un courant électrique, elle émet un faisceau étroit d'ondes ultrasonores. L'écho en provenance de la cible entraîne en retour la vibration de cette lame, générant un courant électrique qui est enregistré sous la forme d'un signal. La paix revenue, ces travaux ont été poursuivis en secret par les états-majors et « l'asdic », muni d'un système Doppler qui analyse



Échosondeur ou sonar :
trajet des ondes ultrasoniques.
La profondeur est comptée
en temps double.

les mouvements de la cible, se montrera très performant au cours de la Seconde Guerre mondiale. Il faudra attendre la paix pour que cette technologie soit utilisée à des fins civiles.

Au début des années 1930, des appareils qui émettent des faisceaux ultrasoniques et en reçoivent les échos sont développés dans différents pays. Ces échosondeurs, les sonars (Sound Navigation and Ranging), fonctionnent en continu, au rythme d'une impulsion ultrasonique par seconde environ, au cours de la marche des navires qui les portent ou les remorquent. Les échos du fond sont enregistrés graphiquement sur un tambour tournant et fournissent un profil des profondeurs en fonction du temps. La précision est variable, suivant l'ouverture du cône ultrasonique : un cône large (15°) renvoie un écho qui, à 3 000 mètres, lisse la profondeur sur près d'un demi-kilomètre carré. La précision est bien meilleure avec un cône étroit. En revanche, il ne permet d'explorer qu'un étroit sillon sur le fond. Le dépouillement des enregistrements est compliqué. Il faut reconstituer la route réelle du navire en fonction du temps, avec beaucoup d'incertitude sur la position. Il faut interpréter l'écho qui apparaît en « temps double » : durée totale du temps de parcours de l'onde ultrasonore vers le fond et du retour de l'écho au récepteur. La distance précise entre le sonar et le fond ne peut être calculée qu'en prenant en compte la vitesse réelle des ondes ultrasonores qui dépend de la température, de la salinité et de la pression, c'est-à-dire de la... profondeur !

Pour une meilleure résolution : le sonar multifaisceau

Le sonar a été utilisé pour dresser des cartes précises. En théorie, il suffit de resserrer les lignes de navigation et de porter un soin extrême à la détermination à chaque instant de la position du navire. L'utilisation des « tables traçantes », qui enregistrent en temps réel les variations de cap et de vitesse (par rapport à l'eau et non par rapport au fond !) du bateau, a beaucoup amélioré les connaissances sur les routes réellement suivies. Mais l'estime reste incertaine, et les balancements du navire sous l'effet du roulis et du tangage apportent de sérieux facteurs d'incertitude lorsqu'une bonne précision est recherchée. Le développement des sondeurs multifaisceaux, à partir de 1978, permet de réaliser des documents de haute qualité.

Le sondeur multifaisceau est un sonar, embarqué ou remorqué. Il possède une antenne qui émet une impulsion ultrasonique pour étudier les fonds de profondeur moyenne (jusqu'à 3 000 mètres), ou simplement sonique pour cartographier les grands fonds (afin de minimiser la déperdition d'énergie de l'onde au cours de sa propagation dans l'eau). L'onde incidente (un ping d'une durée de quelques millisecondes) est dirigée très en avant de la proue du navire. L'ouverture du faisceau est de l'ordre de 2° , longitudinalement (dans le sens de la marche du