

## Cartographie sous-marine : état de l'art et problèmes. *Seafloor mapping : state of the art and problems.*

Vincent Renard

Géosciences Marines,  
IFREMER

### ABSTRACT

*From its early days in the 20's, the seafloor mapping technique has gone through a rapid evolution. From discrete pings in the first echosounders, it has gone to sequenced and imbricated pulsing ; from wide beam aperture to narrow beam ; from analog output to digital ; from single beam to multiple beam arrays.*

*The side looking sonars have been developed for greater swath coverage, digital processing of the signals has improved the quality of the images and interferometric techniques have been used to determine the depth of the bottom features. A review of the systems existing today is presented.*

*Documents such as graphs, block diagrams, images, maps, sections, created from data acquired at sea level suffer from a filtering or smoothing effect that restricts the representativity of the measured parameters and therefore limits their interpretation. The greater the depth of the seafloor, the greater the filtering. It is due not only to the nature of the measured phenomenon but also the characteristics of the sensors, to their operation and to the data processing. Filtering in the domain of bathymetry is analysed, its causes and effects are examined and remedies are proposed.*

*As far as the measurement is concerned, moving the sensors on vehicles cruising at limited elevation above seafloor would allow to detect shorter wavelengths and to produce documents more representative of the true nature of the seafloor morphology and structure.*

*As far as data processing is concerned, more care should be paid to the effect of filtering, to better estimate errors and to develop new methods of analysis and representation.*

*A better knowledge of the distribution of all the wavelengths of the seafloor morphology particularly lacking in the meter to kilometer range, is necessary in order to understand seafloor processes and to develop models of the seafloor.*

## **1. LES FONDS MARINS**

En dehors de la zone littorale, les fonds marins sont plongés dans l'obscurité totale. Seuls les spécialistes y ont accès et peuvent les observer grâce à l'utilisation de submersibles équipés de puissants projecteurs. Leur vision reste cependant limitée à quelques mètres de distance. A plus grande distance, seules des mesures acoustiques faites à partir de la surface ou d'engins remorqués en surface ou près du fond permettent d'étudier les fonds marins et de les représenter sous forme de cartes qui complétées par la connaissance que l'on possède sur leur origine et sur les processus qui les gouvernent permettent de se les imaginer

### **1.1. Nature des fonds marins**

Alimentés par une pluie continue de micro-organismes pélagiques, s'accumulant à des taux faibles (quelques cm par millier d'années) mais depuis des millions d'années, les grands fonds ressemblent à de vastes paysages désertiques faits de grandes dépressions bordées de massifs surélevés. Les sédiments s'y déplacent sous l'action de courants souvent faibles, mais parfois suffisants pour modeler des rides dont certaines ont des dimensions importantes. Lorsque leur vitesse augmente ces courants peuvent avoir des effets catastrophiques créant des avalanches sous-marines, creusant des canyons, transportant les sédiments venus de terre vers la profondeur où ils se mélangent aux sédiments pélagiques.

### **1.2. Morphologie et structure**

Ces paysages sous-marins déserts sont modelés par les reliefs d'une croûte sous-jacente qui apparaît à nu là où elle se forme, c'est-à-dire à l'axe des dorsales océaniques, ou sous forme de volcans laissant apparaître des laves de morphologie variée, laves en coussin, laves drapées... La croûte peut également affleurer dans les zones tectonisées sous forme de roches cristallines ou métamorphiques, le long des grands abrupts que représentent les marges des continents vestiges de la dérive qui les a séparés. La croûte qui affleure ainsi est intensément structurée, découpée par un réseau de failles dont le détail a pu être décrit localement par plongée en submersible.

Les fonds océaniques présentent donc à l'échelle de quelques mètres une morphologie et une structure bien connues par les plongées en submersible et assez voisines dans leur dimensions aux reliefs terrestres équivalents. Pour les étudier dans toutes leurs dimensions allant de celles de l'observation directe à celles des grandes chaînes sous-marines en passant par toutes les dimensions intermédiaires, il faut avoir recours à des méthodes indirectes basées d'une part sur la seule énergie qui se propage dans l'eau au-delà de la limite de la lumière, l'énergie acoustique, d'autre part et plus récemment sur l'altimétrie qui à partir de satellites mesure les reliefs de la surface des océans elle-même modelée par l'attraction des reliefs sous-marins.

## **2. LE SONDAGE ET L'IMAGERIE ACOUSTIQUES**

### **2.1. Historique**

L'énergie acoustique se propage dans l'eau en fonction de lois physiques bien établies. Cette énergie est réfléchiée par les fonds marins sous forme d'échos dont les temps de propagation permettent de déduire les distances. La nature des échos permet quant à elle une certaine caractérisation des cibles renvoyant l'énergie.

La première utilisation de l'énergie acoustique a été de sonder les fonds marins

remplaçant ainsi avantageusement les fils à sonder encore utilisés au début de ce siècle. La technique de sondage a rapidement évolué du mono-faisceau, large d'abord étroit ensuite, vers le multi-faisceaux avec des couvertures de plus en plus étendues.

La seconde utilisation a été le mode en balayage fournissant des images ou échogrammes, utiles non seulement pour détecter les obstacles, ou repérer les épaves mais aussi pour mettre en évidence la structure et la morphologie ainsi que les variations des caractéristiques des fonds marins à l'exclusion toutefois du relief.

Ce n'est que depuis une dizaine d'années que grâce surtout au développement d'antennes nouvelles, les deux modes d'utilisation, sondage et balayage ont été combinés. De nouveaux systèmes réunissant à la fois les avantages de la bathymétrie multi-faisceaux et de l'échographie par balayage latéral et permettant de fournir une image caractérisant à la fois les reliefs et la variabilité de l'écho ont été développés. Ces images restituées en pseudo-couleurs sont ce qui correspond le mieux à une vision directe des fonds marins.

## 2.2. Revue des systèmes acoustiques existants

### 2.2.1. Sonars latéraux : *Tableau 1*

Le *tableau 1* recense les équipements les plus connus basés sur le balayage latéral. Les systèmes sont classés par fréquence croissante du signal.

Deux gammes de fréquences sont privilégiées : une gamme basse de 4 à 12kHz et une gamme haute de 100 à 200kHz, la première pour les systèmes grands fonds à bande large et à remorquage surface, la seconde pour les petits fonds du plateau continental mais aussi pour les systèmes remorqués près du fond par grande profondeur. L'utilisation préférentielle de ces fréquences correspond au souci de certains d'obtenir une couverture la plus large possible (la dizaine de kilomètres et au-delà) au détriment de la résolution (quelques dizaines de mètres) et d'autres d'obtenir une résolution très élevée (inférieure au mètre) au détriment de la portée (inférieure au kilomètre). Un seul système, le SeaMarc 1 utilise la fréquence intermédiaire de 30kHz cherchant ainsi un difficile compromis entre portée et résolution.

Les quelques systèmes utilisant l'interférométrie à partir de bases de réception multiples pour déduire la bathymétrie en plus de l'image balayée sont indiqués dans la dernière colonne du tableau.

### 2.2.2. Systèmes multifaisceaux : *Tableau 2*

Le *tableau 2* recense les systèmes de bathymétrie multi-faisceaux. Le nombre de faisceaux varie de 15 pour le Seabeam à plus de 100 pour les systèmes les plus récents. La couverture moyenne est de deux fois la profondeur bien que certains atteignent huit fois cette dernière. L'ouverture angulaire moyenne des faisceaux varie entre 1° et 5°, certains ayant une ouverture angulaire fixe, d'autres variable.

Les systèmes du *tableau 2* peuvent être regroupés en trois classes :

- les sondeurs grands fonds opérant de 16 à 12kHz, jusqu'à des profondeurs maximales de 6000 jusqu'à 12000 mètres
- les sondeurs fonds intermédiaires opérant de 36 à 24 kHz jusqu'à des profondeurs maximales de 1000 à 3000 mètres
- les sondeurs petits fonds opérant de 200 à 50 kHz jusqu'à des profondeurs maximales de 10 à 800 mètres.

Les systèmes possédant l'option de travailler en mode image sont indiqués dans la dernière colonne. Ce mode exploite les variations d'amplitude du signal reçu par les divers faisceaux et les restitue en balayage en fonction du temps comme un sonar latéral.

## 2.3. Caractéristiques générales des systèmes

### 2.3.1. Fréquence et portée

La fréquence est la caractéristique principale des systèmes acoustiques sous-marins. Elle conditionne la portée car l'absorption du son dans l'eau augmente proportionnellement au carré de la fréquence.

### 2.3.2. Nature des échos

#### Réflexion spéculaire

Près de l'incidence normale avec le fond ( $\pm 5^\circ$ ) les échos présentent de fortes amplitudes de courte durée comparable à celle du signal émis (quelques millisecondes) liées à la réflexion spéculaire. Ces échos utilisés dans les systèmes mono-faisceau permettent une détection facile du fond ; ils sont cependant source de problèmes dans les systèmes multi-faisceaux car leur fortes amplitudes peuvent créer des interférences avec les lobes secondaires des faisceaux.

#### Rétrodiffusion

Au-delà de l'incidence normale, les échos sont dûs à la rétrodiffusion des fonds marins. Les amplitudes sont beaucoup plus faibles que la réflexion spéculaire et dépendent de la nature du fond, de son relief et de l'angle d'incidence. Leur durée pouvant atteindre plusieurs dixièmes de secondes dépend de l'aire effectivement insonifiée sur le fond. La détection du fond à partir de ces échos est assez délicate. Certaines solutions intègrent le signal et en calcul le baricentre, d'autres analysent les relations de phase entre deux faisceaux voisins. Si pour un fond plan la sonde calculée correspond bien à la profondeur d'un point précis de la zone insonifiée, dans des fonds à fort relief le problème est plus complexe ; la sonde calculée correspond-elle à la valeur moyenne de la zone insonifiée ou bien existe-t-il des effets non-linéaires créant des biais, de l'aliasing ou du bruit ? Comme la dimension des empreintes augmente avec la profondeur ces problèmes peuvent pour un même relief fournir des réponses différentes.

### 2.3.3. Dessin des antennes

Suivant la fréquence, le choix de la largeur angulaire du faisceau détermine la taille des antennes. Pour les antennes à faisceaux multiples, l'installation sur la coque d'un navire pose de nombreux problèmes dont le masquage par les bulles d'air qui est très délicat à résoudre et a conduit à devoir modifier la coque de certains navires. Pour les petits fonds les antennes rétractables résolvent ce problème.

Pour les sonars latéraux, la stabilité et la bonne navigation du poisson supportant les antennes est primordiale et constitue le problème le plus épineux à résoudre et empêche à ce jour de concevoir des antennes à ouverture synthétique.

## 3. CARTOGRAPHIE

### 3.1. Géométrie des faisceaux acoustiques

Le *tableau 3* donne quelques caractéristiques géométriques pour un système multifaisceaux d'ouverture angulaire constante de  $1^\circ$  : taille de l'empreinte sur le fond, couverture latérale, couverture longitudinale à 10 noeuds.

#### 3.1.1. Dimensions des empreintes

La taille de l'empreinte acoustique sur le fond est une caractéristique essentielle des systèmes acoustiques. Ses dimensions sont définies par l'intersection du lobe central de chaque faisceau tronqué à 3db avec le fond. Elles peuvent varier en fonction de la vitesse du son à la face active des antennes qui fait dévier les faisceaux et en fonction du profil de vitesse du son dans l'eau qui crée une réfraction des rayons acoustiques obliques.

Si l'on admet que la sonde corresponde à la valeur moyenne du relief de l'empreinte et non pas à la sonde d'un point privilégié de l'empreinte (ce qui créerait de l'aliasing) les longueurs d'onde minimales théoriques de ce relief que l'on pourra détecter sont de deux fois la dimension de l'empreinte, en pratique il vaut mieux adapter un facteur de 2,5 fois : par 3000 mètres de fond, seuls les reliefs de plus de 150 mètres de longueur d'onde pourront être détectés par le faisceau central, et de plus 250 mètres pour le faisceau à 45° et plus de 500 mètres pour le faisceau à 60°. Pour une ouverture angulaire de 2° (qui correspond à la moyenne d'ouverture des systèmes) ces valeurs sont à doubler. Les longueurs d'onde minimales détectables par les systèmes multifaisceaux grands fonds varient donc dans de larges limites atteignant plusieurs centaines de mètres, voire quelques kilomètres.

### 3.1.2. Distribution des sondes

De la géométrie des empreintes, il découle que les sondes des systèmes à couverture large ne sont pas distribuées de façon uniforme sur une grille régulière mais que leur répartition varie en fonction des faisceaux et en fonction de la profondeur.

Pour le Seabeam limité à 20° d'ouverture latérale l'augmentation latérale de la taille de l'empreinte est limitée mais pour les systèmes à 45° qui couvre deux fois la profondeur d'eau, la taille de l'empreinte varie du simple au double entre les faisceaux extrêmes et le vertical.

La distribution longitudinale des données (calculée comme le rapport pour une empreinte donnée du nombre de sondes le long de la route au nombre de sondes transverses à la route) varie également en fonction de la vitesse du navire, de l'ouverture et du nombre de faisceaux ainsi que du numéro d'ordre des faisceaux (voir *tableau 3*) A 10 noeuds cette distribution est de l'ordre de 2,6 pour un système à un seul faisceau vertical. Pour un système multi-faisceaux d'ouverture totale de 20° il passe de 2,1 pour le vertical à 2,4 pour le faisceau extrême. Pour le Seabeam, ces valeurs sont à multiplier par l'ouverture du faisceau (2,66°) soit près de 5,6 pour le faisceau vertical et plus de 6,5 pour le faisceau extrême : pour ce système, la distribution est donc assez uniforme. Par contre, pour un système à 60 faisceaux de 1° elle tomberait en-dessous de 1 (0,7) pour le vertical ce qui n'est pas acceptable car les empreintes sur le fond ne seraient plus jointives, atteindrait 1 à 30° et serait de 2,8 pour le 60ième faisceau. Pour les systèmes à large couverture et pour maintenir une distribution toujours supérieure à 1, il faut donc soit ralentir le navire, soit augmenter l'ouverture angulaire des faisceaux centraux ou encore avoir recours à l'imbrication des émissions ou à l'utilisation de plusieurs fréquences.

Pour le Seabeam, la plus grande abondance de sondes le long de la route est mise à profit pour réduire le bruit par en faisant une moyenne.

### 3.2. Interpolation et maillage

Il est fréquent que dans une zone d'étude donnée les profondeurs s'étalent sur plusieurs milliers de profondeur (9000 pour la fosse du Japon,...). Etant donné les fortes variations qui en découlent dans la distribution des données dans le plan, il est nécessaire que les algorithmes d'interpolation et de maillage en tiennent compte, soit en adaptant les algorithmes en fonction de la profondeur, soit en réduisant les données à une profondeur de référence. L'interpolation à maillage constant pratiquée couramment conduit en général à moyenniser les mesures de façon assez arbitraire et à perdre de l'information.

### 3.3. Imagerie et contourage

Les données maillées sont représentées de façon courante sous forme de contours à intervalles discrets. Ce mode de représentation est limité graphiquement par l'espacement minimum entre deux courbes. Or cette espace varie en fonction de l'échelle choisie et non de la morphologie du fond ce qui conduit soit à masquer les détails des reliefs suite à un intervalle trop grand soit à donner l'illusion du détail suite à un intervalle trop petit.

Les cartes devraient illustrer la présence de longueurs d'onde six fois plus petites à 1000

mètres qu'à 6000. Dans la pratique il est rare d'observer ce phénomène ce qui indique que soit les échelles ont été choisies trop petites soit que les données ont été moyennées par le maillage ou lissées par le contourage. Il resterait l'explication que les grands fonds présentent effectivement des reliefs plus atténués ce qui semble plausible dans les zones de dépôt sédimentaire mais moins dans les zones d'accrétion de croûte océanique ou dans les zones tectoniques.

La représentation sous forme d'images et de bloc-diagrammes où la cellule élémentaire correspond à l'empreinte de chaque point de mesure et où aux valeurs de sonde correspond une échelle de gris ou de couleur très étendue (éventuellement répétée par intervalle) offre une représentation sans discontinuité plus proche de la réalité que les lignes de contour.

#### **4. DISCUSSION**

L'étude des reliefs sous-marins a fait d'énormes progrès depuis la mise au point d'une gamme étendue de systèmes multi-faisceaux et de sonars latéraux. L'avantage de ces systèmes est de fournir une vision latérale des reliefs sous-marins qui lors du déplacement du navire se transforme en vision en trois dimensions. Cependant, de par ses caractéristiques chaque outil s'adresse à une gamme particulière de profondeurs et de longueurs d'onde du relief. Les zones du plateau continental ont été privilégiées pour des raisons industrielles (génie civil et ressources minérales, cartographie des zones économiques exclusives,...) et les résolutions obtenues sont à la hauteur du besoin et ceci grâce à une gamme de profondeurs assez limitée.(10-200 mètres) Dans les grands fonds quelques sonars latéraux (tels le Deep-Tow ou le SAR) ont montré la richesse de détail de la morphologie sous-marine jusqu'aux longueurs d'onde métriques. Cependant aucun système n'existe à ce jour pour mesurer les reliefs compris entre ceux que l'on observe directement à partir de submersibles et ceux que nous dévoilent les systèmes multifaisceaux (plus d'un kilomètre par 6000 mètres pour l'ouverture du Seabeam par exemple). Cette gamme de longueurs d'onde (du mètre au kilomètre) est de très grande importance car, ainsi qu'à terre, c'est à l'échelle de ces longueurs d'onde que se caractérisent et s'identifient plusieurs processus qui agissent sur notre planète. Ainsi, la morphologie des dépôts sous-marins, rides, méga-rides ou la morphologie des édifices et des effusions volcaniques, ou l'intense failage des zones en extension, ou la déformation liée au grands décrochements ou aux zones en collision.

Avant de pouvoir modéliser les fonds marins, il est nécessaire de connaître la loi de distribution du relief (fractale ou ?) en fonction de la longueur d'onde. La première étape consisterait à établir cette distribution ce que ne permettent pas les systèmes actuels vu la dépendance entre leur résolution et la profondeur.

#### **5. SYSTEMES FUTURS**

Malgré les options nouvellement développées de pouvoir faire de l'imagerie avec les systèmes multi-faisceaux et de la bathymétrie avec les sonars latéraux, les performances de ces systèmes hybrides sont actuellement inférieures à celles d'un système s'adressant à l'une ou à l'autre des fonctions. Ainsi en plus de ces systèmes hybrides, il reste la solution déjà utilisée de mettre en oeuvre deux systèmes séparés l'un sur coque pour la bathymétrie multi-faisceaux, l'autre sur poisson remorqué pour l'imagerie latérale. Une telle solution présente cependant un inconvénient majeur par rapport aux systèmes hybrides qui est celui de conduire à une navigation séparée pour chacun des deux systèmes ce qui crée des problèmes lors de la superposition des données de bathymétrie à celles d'imagerie. Une plus grande expérience et une meilleure évaluation des performances réelles des nouveaux systèmes hybrides permettront de mieux orienter l'évolution des systèmes.

Afin d'étudier la gamme des longueurs d'onde métrique au kilométrique par grands fonds, il est nécessaire de concevoir des systèmes bathymétriques remorqués naviguant plus près du fond et à élévation constante. Pour une ouverture angulaire de  $1^\circ$ , une élévation de 200 mètres par rapport au fond permettrait de mesurer la bathymétrie des reliefs de longueurs d'onde supérieures à 10 mètres. La portée et la vitesse d'un tel système seraient réduites mais il ne s'agit pas bien sûr de couvrir systématiquement tous les fonds marins mais bien de caractériser les reliefs dans les zones liées à un processus ou un environnement particulier.

## 6. CONCLUSION

En conclusion, l'étude des fonds marins a progressé rapidement grâce à l'apparition des systèmes mutli-faisceaux et aux sonars latéraux grande portée. Les caractéristiques des systèmes sont cependant telles qu'elles laissent dans l'ombre toute une gamme de longueurs d'onde située entre le mètre et le kilomètre.

Cette gamme de longueurs d'onde ne pourra pas être délaissée très longtemps car elle devrait permettre d'une part de décrire dans le détail les processus qui modèlent les fonds océaniques, d'autre part de connaître la distribution des reliefs en fonction des diverses longueurs d'onde pour aboutir à une modélisation des fonds océaniques.



Tableau 1

## SYSTEMES MULTI-FAISCEAUX TRANSDUCTEURS SUR COQUE FAISCEAUX CROISES

Nom du Système	Société et Pays	Fréquence en kHz	Profondeurs en m	Faisceaux	Ouverture	Couverture	Side Scan Image
<b>Grande Profondeur</b>							
SASS	GIC, NAVY, EUA	12	-11 000	60 90	1,5° 1°	2,0 prof	
BOTASS	SPERRY, NAVY, EUA	12	-11 000	91	1°	2,0	
Seabeam	GIC, EUA	12	50 - 11 000	16	2,6°	0,7	
SEABEAM 2000	GIC, EUA	12	50 - 11 000	45	2°	2,0	
EKHOS 15/625	HOLLMING, Finlande	12	- 5 000	15	2,6°	0,75	
HS 10	FURUNO, Japon	12	-11 000	45	2°	2,0	
EM 12	SIMRAD, Norvège	13	100-12 000	76	3,5-5°	2,0	option
EM-12 Dual	SIMRAD, Norvège	13	100-12 000	81	3,5-5°	8,0	option
EKHOS XD	HOLLMING, Finlande	15	60 - 6 000	53			
HYDRO-SWEEP	KRUPP-ATLAS, RFA	15,5	- 10 000	59	2,2-4,3°		
<b>Petits Fonds</b>							
BSSS	GIC, EUA	36	10 - 600	22	5°	2,5	
HYDRO-CHART II	GIC, EUA	36	10 1 500	17	3,5-6,2°	2,5	
EKHOS-XD	HOLLMING, Finlande	45	6 - 600	60	2°	2,0	
EM 100	SIMRAD, Norvège	95	6-100 6-200 6-400 6-600	64 27 32 32	1° 3,8° 2,5° 2°	8,0 2,4 1,7 0,8	option
EM 1000	SIMRAD, Norvège	95	5-100 100-400 400-800	72/120 48/96 48	2,5°/1,25° 2,5°/1,25° 1,25°	7,4 3,4 1,15	option
S&A	FURUNO, Japon	150	1-100	120	1°	3,0	
FANSWEEP	KRUPP-ATLAS, RFA	200	1-100	52	2,5°	3,5	

Tableau 2

## Sonars à Balayage latéral avec et sans bathymétrie par interférométrie

Nom du système	Fréquence en kHz	Portée max en km	Résolution en mètres	Profondeur opération	Vitesse	couverture en km <sup>2</sup> /jour	Interférométrie
			portée max				
Swath Map EUA	3,5	37	>100	sur coque	20	66 000	
Gloria II RU	6,2/6,8	22,5	100	50 m	10	20 000	
Sea Marc II EUA	11/12	10	10	200m	8	3 000	oui
Sea Marc I EUA	27/30	2,5	5	<6000	2-5	1 160	
TAMU EUA	11/12	5,0		100m	8		oui
	72	2,0			8		
Klein EUA	50	0,5	0,5	surface	16	710	
Klein	100	0,4	0,4	surface	16	570	
EDO 4075 EUA	100	0,6	0,5	surface	15	104	
EKG S360 EUA	105	0,5	1,0	surface	15	670	
Deep Tow EUA	110	1,0		<7 000	2	170	
AMS 120 EUA	120	0,75		surface	8		oui
TG URSS	115/135	0,2		?			oui
Sea Marc / S EUA	150	1,0		<1 500	2	97	oui
SAR France	170/190	0,75	0,75	< 6 000m	2	130	
Bathyscan RU	300	0,2		surface	16	280	oui
Klein EUA	500	0,2	0,2	surface	16	280	



Tableau 3																				
Numéro de Faisceau		1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	88
Ouverture angulaire 1°																				
Taille de l'empreinte sur le fond en mètres																				
Profondeur																				
500		9	9	9	9	10	11	12	13	15	17	21	26	34	47	71	122	263	958	4777
1000		17	18	18	19	20	21	23	26	29	34	41	52	68	94	142	245	527	1916	9555
3000		52	53	54	56	59	63	69	77	88	103	124	155	203	283	427	734	1580	5747	28664
6000		105	105	108	112	118	126	138	154	176	206	248	311	407	565	854	1468	3160	11494	57327
10000		175	176	179	186	196	211	230	257	293	343	414	518	678	942	1424	2446	5267	19156	95545
Couverture latérale en multiple de la profondeur																				
		0,0	0,2	0,4	0,5	0,7	0,9	1,2	1,4	1,7	2,0	2,4	2,9	3,5	4,3	5,5	7,5	11,3	22,9	57,3
Temps de propagation aller-retour en secondes																				
Profondeur																				
500		0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0	2,4	2,9	3,7	5,0	7,6	15,3	38,2
1000		1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,3	2,6	3,0	3,4	4,0	4,8	5,9	7,4	10,0	15,2	30,5	76,4
3000		4,0	4,1	4,2	4,5	4,9	5,5	6,1	6,9	7,8	8,9	10,3	12,1	14,4	17,6	22,3	30,1	45,5	91,5	229,1
6000		8,0	8,1	8,5	9,1	9,9	10,9	12,2	13,8	15,6	17,9	20,7	24,2	28,8	35,2	44,7	60,2	91,1	183,1	458,3
10000		13,3	13,5	14,1	15,1	16,5	18,2	20,4	22,9	26,0	29,8	34,5	40,4	48,1	58,7	74,5	100,4	151,8	305,1	763,8
Déplacement navire entre deux cycles à 10 noeuds en mètres																				
Profondeur																				
500		3	3	4	4	4	5	5	6	7	7	9	10	12	15	19	25	38	76	191
1000		7	7	7	8	8	9	10	11	13	15	17	20	24	29	37	50	76	153	382
3000		20	20	21	23	25	27	31	34	39	45	52	61	72	88	112	151	228	458	1146
6000		40	41	42	45	49	55	61	69	78	89	103	121	144	176	223	301	455	915	2291
10000		67	68	71	76	82	91	102	115	130	149	172	202	240	294	372	502	759	1525	3819
Couverture longitudinale à 10 noeuds																				
		2,62																		
		2,58	2,59																	
		2,47	2,48	2,54																
		2,31	2,32	2,37	2,46															
		2,12	2,13	2,18	2,26	2,38														
		1,91	1,93	1,97	2,04	2,15	2,31													
		1,71	1,72	1,76	1,83	1,93	2,07	2,26												
		1,52	1,53	1,56	1,62	1,71	1,84	2,01	2,24											
		1,34	1,35	1,38	1,43	1,51	1,62	1,77	1,97	2,25										
		1,17	1,18	1,20	1,25	1,32	1,41	1,55	1,72	1,97	2,30									
		1,01	1,02	1,04	1,08	1,14	1,22	1,34	1,49	1,70	1,99	2,40								
		0,87	0,87	0,89	0,92	0,97	1,04	1,14	1,27	1,45	1,70	2,05	2,57							
		0,73	0,73	0,75	0,77	0,82	0,88	0,96	1,07	1,22	1,43	1,72	2,15	2,82						
		0,59	0,60	0,61	0,63	0,67	0,72	0,78	0,88	1,00	1,17	1,41	1,76	2,31	3,21					
		0,47	0,47	0,48	0,50	0,53	0,57	0,62	0,69	0,79	0,92	1,11	1,39	1,82	2,53	3,82				
		0,35	0,35	0,36	0,37	0,39	0,42	0,46	0,51	0,58	0,68	0,82	1,03	1,35	1,88	2,84	4,87			