

Le repérage radio-acoustique et la propagation du son dans la mer

par M. LACOMBE

du Service Hydrographique de la Marine française

Depuis les environs de 1930, diverses nations ont employé, pour faire le point hors de vue de terre dans les missions hydrographiques, la méthode du repérage radio-acoustique (Radio acoustic ranging). Elle repose sur la propagation dans l'eau du bruit de l'explosion d'un pétard, par exemple de 500 grammes de mélinite, qui est lancé par le bâtiment dont la position est inconnue. On mesure le temps que met l'onde sonore de l'explosion à parcourir la distance qui sépare le point d'explosion d'un microphone immergé relié à un poste d'écoute et d'enregistrement; celui-ci est installé à terre, sur la côte, ou sur un bâtiment mouillé placé avec précision en vue de terre. L'instant initial d'explosion est repéré, pratiquement sans aucun retard, par un signal radioélectrique très bref qu'émet à l'explosion le bâtiment au large et qu'enregistre le poste d'écoute. Les enregistrements de ces instants sont faits avec une précision de l'ordre de 1/100 de seconde. Connaissant la « vitesse du son dans l'eau » on en déduit la distance du point d'explosion. L'emploi simultané de trois postes résoud le problème du point.

Cette méthode a rendu de très grands services dans certaines régions. Dans d'autres, elle s'est heurtée à deux difficultés *de principe* qui l'ont rendue imprécise, capricieuse ou même inutilisable.

Son emploi impose en effet deux conditions :

1°) L'audition à grande distance de l'explosion du pétard;

2°) La connaissance de la vitesse horizontale moyenne de l'onde sonore qui impressionne en premier le microphone; de là dépend presque intégralement la précision de la détermination faite.

Les rayons lumineux subissent des déviations en franchissant la surface de séparation de milieux d'indices de réfraction différents, c'est-à-dire des milieux où les vitesses de propagation de la lumière sont différentes. De même, si l'on définit les « rayons sonores » comme des trajectoires orthogonales des surfaces d'onde atteintes aux divers instants par le son, ces rayons subissent eux aussi des déviations en traversant les couches d'eau où la vitesse du son varie, c'est-à-dire où l'indice de réfraction sonore varie.

Or la vitesse de propagation du son dans l'eau, voisine de 1500 m/sec., peut varier dans de très larges limites. Elle dépend en effet des caractéristiques suivantes du milieu marin, classées par ordre d'importance pratique décroissante :

Température, pression (profondeur), salinité,

Elle croît avec chacun de ces trois facteurs; aux environs de 15° une variation de température de 1° entraîne une variation de vitesse de 3 m/sec. environ, ce qui est très considérable.

Quel est le comportement des rayons sonores dans un milieu hétérogène comme la mer, autrement dit, quelles sont les lois de l'acoustique géométrique, par analogie avec celles de l'optique géométrique, dans une mer supposée stratifiée en couches horizontales homogènes?

Un rayon sonore est défini par le site A qu'il a à son départ de la source sonore, immergée à une profondeur où la vitesse est V. On trouve très simplement que le rayon de courbure R du rayon sonore en chaque point de

sa trajectoire est donné par la formule :
$$R = \frac{V_0}{\cos \alpha_0} \frac{1}{\frac{dV}{dx}}$$

soit $R \frac{dV}{dx} = \text{constante}$ pour un rayon déterminé, ou x est la profondeur et V la vitesse à cette profondeur.

Le signe de dV/dx , qui est le gradient vertical de vitesse, détermine le sens de la courbure de la trajectoire. Les minima et maxima de la vitesse entraînent une inflexion du rayon. Si le *gradient de vitesse est positif*, c'est-

à-dire si la vitesse du son croît avec la profondeur, le rayon sonore est courbé vers le haut. *S'il est négatif*, c'est-à-dire si vitesse et profondeur varient en sens inverse, le rayon sonore est courbé vers le bas. Si le *gradient est constant*, la trajectoire sonore est un *cercle*.

Comme on peut toujours décomposer la mer en tranches horizontales où le gradient de vitesse soit constant, on trace facilement les trajectoires des divers rayons sonores connaissant le site des rayons à l'entrée et à la sortie de chaque couche : ces sites sont aisément lus en fonction des vitesses sur une abaque traduisant graphiquement les lois de la réfraction.

Quelle est en moyenne la répartition verticale réelle des vitesses du son dans la mer? En général, et surtout en saison chaude, la température diminue rapidement à partir de la surface d'où diminution importante de la vitesse du son dans une couche superficielle qui atteint fréquemment 50 mètres : c'est *la couche de gradient superficiel négatif fort*.

Puis, la température diminue de moins en moins vite quand on s'enfonce et, comme la vitesse du son croît avec la pression, c'est-à-dire la profondeur, on atteint un niveau, très variable suivant les mers et les saisons, où existe un *minimum* de la vitesse du son. A cette profondeur, les rayons présentent un point d'inflexion.

Dans les *deux cas* d'une source et de microphones immergés dans la *couche superficielle de gradient négatif fort et à une immersion voisine du minimum de la vitesse*, quelle est la forme de la trajectoire sonore?

Premier cas. — La source immergée peu profondément émet des rayons qui se courbent très rapidement vers le bas; le site moyen d'un rayon qui est horizontal au départ de la course atteint souvent 10° et le rayon vient heurter le fond à faible distance. Là, il se réfléchit en subissant une perte considérable d'énergie; la propagation se fait par réflexions successives sur le fond, ce qui explique la faiblesse des portées obtenues dans ce cas dans les mers chaudes avec des pétards peu immergés et quelle que soit

pratiquement l'importance de la charge utilisée. Les rayons émis sous les divers sites suivent des trajets divers et mettent des temps différents pour atteindre le microphone; les rayons de site initial fort en valeur absolue subissent des réflexions sur le fond et aussi sur la surface. Il résulte de là que le signal bref de l'explosion est perçu au poste d'écoute sous forme d'un bruit prolongé, exactement comme est perçu le bruit du tonnerre provenant d'un orage lointain.

Donc, dans ce cas, les deux difficultés de principe signalées plus haut sont présentes :

1°) On rencontre de mauvaises conditions de propagation;

2°) On a une grosse indétermination sur la vitesse du son à choisir, qui est illustrée par la longueur du signal. En outre, cette vitesse diffère beaucoup de la vitesse qu'il paraît le plus logique de choisir, qui est celle existant à l'immersion de la source : ceci est dû au site moyen important du rayon et au fait que, sur une grande partie du trajet, ils cheminent en profondeur, c'est-à-dire là où la vitesse du son est nettement inférieure à ce qu'elle est à l'immersion du pétard.

Si on peut admettre que le milieu est isotrope horizontalement, on peut s'affranchir de cette deuxième difficulté puisque le point inconnu est à l'intersection des deux cercles lieux des points dont le rapport des distances aux trois microphones pris deux à deux est égal au rapport des temps de parcours mesurés. Mais cette hypothèse est inadmissible dans les zones où les fonds sont tourmentés : car l'expérience confirme ce que permet de prévoir l'acoustique : la vitesse du son à choisir dans les diverses directions autour d'un point diffère d'une direction à l'autre suivant le profil du fond et dépend de la distance. Il faut ajouter d'ailleurs que l'influence du fond peut être telle que, suivant l'azimut du point d'explosion vu du poste d'écoute, l'audition du signal à distance donnée peut ne pas être assurée dans tous les azimuts.

On donnera plus bas quelques chiffres illustrant ces divers points.

Deuxième cas. — Pétard et microphones sont immergés au voisinage du minimum de la vitesse; le son prend des vitesses supérieures au-dessus et au-dessous de la source. Par analogie avec l'optique, on voit immédiatement que les rayons de site initial faible subiront des réflexions totales successives entre deux plans de profondeurs bien définies par les valeurs de site initial et celles des gradients supérieur et inférieur. Par conséquent l'énergie sonore restera cantonnée entre deux plans dans un « *chenal sonore* » limité supérieurement et inférieurement. Ces réflexions totales n'étant accompagnées en principe d'aucune déperdition d'énergie, les portées obtenues seront très grandes, à la condition naturellement qu'aucune crête sous-marine ne vienne couper ce chenal sonore entre la source et le microphone. Les conditions de propagation sont donc bonnes.

Comme dans tout le chenal sonore, compte tenu des faibles variations de vitesse pratiquement rencontrées en profondeur, tous les rayons ont un site moyen faible, la vitesse horizontale moyenne du son dans le chenal diffère peu de la valeur du minimum de la vitesse : il y a peu d'étalement du signal dans le temps, donc concentration d'énergie dans un temps plus court et l'enregistrement du signal est plus sûr.

Donc, *en l'absence de fonds tourmentés*, on trouve dans ce cas d'excellentes conditions de propagation et une faible incertitude sur la vitesse du son.

Illustrons ces conclusions par quelques chiffres extraits des documents de la Mission Hydrographique Française de Tunisie de 1937 :

La répartition moyenne des vitesses était la suivante :

Surface	1530.8	m/sec.	
10 m.	1528.6	—	
50 m.	1513.4	—	
150 m.	1507.6	—	minimum de la vitesse.

Propagation : 1°) Pétard et microphones immergés à 10 mètres. Le rayon de site initial 0° rencontre un fond de 350 mètres à 2500 mètres environ de la source; le rayon de site initial $+3^\circ$ qui est le rayon le plus privilégié, tangent à la surface, touche ensuite le fond à 2900 mètres de la source. De tels rayons ne peuvent parvenir à 20000 mètres au-dessus d'un fond uniforme de 350 mètres qu'après quatre réflexions sur le fond. En fait, au-dessus d'un profil accidenté réel, il fallait huit réflexions pour que le rayon le plus privilégié atteigne cette distance. On conçoit que, du point de vue propagation, les résultats aient été insuffisants et qu'il ait fallu faire appel à un autre procédé pour poursuivre les travaux;

2°) Aucune expérience d'immersion profonde du pétard et des microphones n'a été faite.

Choir de la vitesse du son :

Au-dessus d'un fond uniforme de 350 mètres; le tableau suivant donne en fonction des immersions la vitesse du son, la vitesse horizontale moyenne des rayons 0° et 4° ou 5° et l'erreur relative faite sur la distance à supposer qu'on ait pris comme vitesse celle existant à l'immersion du pétard.

Immersion, pétard et micros.	Vitesse à cette immersion.	V. Hor. moy. rayon 0°	Erreur relative faite.	rayon 5° ou 4°	Erreur relative faite.
V. Hor. moy.					
10 m.	1528.6	1497.6	2.03 %	1490.8	2.50 %
50 m.	1513.4	1505.0	0.56 %	1500.6	0.87 %
150 m.	1507.6	1507.6	0	1506.6	0.87 %
(4°)					

La précision nécessaire est de l'ordre de 0.1 %.

L'erreur relative de distance, pour la dernière immersion, est très acceptable.

Au-dessus du profil de fond réellement rencontré, la

variation de la vitesse à choisir avec la distance, pour une immersion de 10 mètres du pétard et des microphones est :

		Vitesse à		
Distance :	Vit. à 10 m.	choisir	Différ. :	Err. relat.
5000 m.	1528.6	1515	4	0.9 %
10000	»	1511	2	1.1 %
15000	»	1509	4	1.3 %
20000	»	1505	1	1.5 %
25000	»	1504		1.6 %

Ce tableau était applicable pour un seul azimut autour d'un poste d'écoute. Il aurait fallu en établir d'analogues pour tous les azimuts, d'où une complication pratique considérable.

Il résulte de l'étude précédente que le repérage radio-acoustique :

Est applicable, dans les mers froides avec une immersion faible du pétard et des microphones : conditions de propagation et précision obtenue sont alors bonnes ;

Dans les mers chaudes, *au-dessus de fonds importants et réguliers*, à condition qu'il existe un chenal sonore ; pétard et microphones doivent être immergés de façon à se trouver dans un chenal sonore ; la grandeur de l'immersion entraîne des difficultés pratiques, mais conditions de propagation et précision sont bonnes.

Est inapplicable quelles que soient les immersions des pétards et des microphones, dans les mers chaudes au-dessus de fonds accidentés.

Ainsi se trouvent expliqués les résultats très divers obtenus avec le repérage, ainsi que les apparents caprices de la propagation.

Il y a, en effet, un abîme entre la portée de 800 kilomètres obtenue au printemps 1925 par l'ingénieur hydrographe français Marti, qui enregistra sur la côte africaine l'explosion d'une charge sur la côte française et celle de 30 kilomètres au maximum, obtenue en août 1937, dans le canal de Sicile, au-dessus de fonds très accidentés, malgré les progrès de la technique.

Ainsi, les mesures, si classiques en océanographie, de température et de salinité, qui permettent à elles seules l'étude de tant de problèmes de circulation océanique et de biologie, se sont trouvées avoir un intérêt capital dans la prédiction « à priori » des possibilités du repérage radio-acoustique qui, avant guerre, semblait le nec plus ultra dans le problème du point hors de vue de terre. Il n'en est plus de même aujourd'hui.

Mais au fur et à mesure des progrès de la technique et des moyens d'investigation, le champ de l'océanographie physique s'élargit et s'étend à des domaines plus vastes. Qu'il nous soit permis, à ce propos, de rendre hommage à la personne du Professeur PICCARD et à ses collaborateurs à qui vont tous nos vœux de réussite et toute notre admiration pour l'œuvre qu'il poursuit avec succès depuis tant d'années, dans les milieux les plus extrêmes, malgré les bouleversements profonds qu'a subis l'Europe dans les six dernières années.