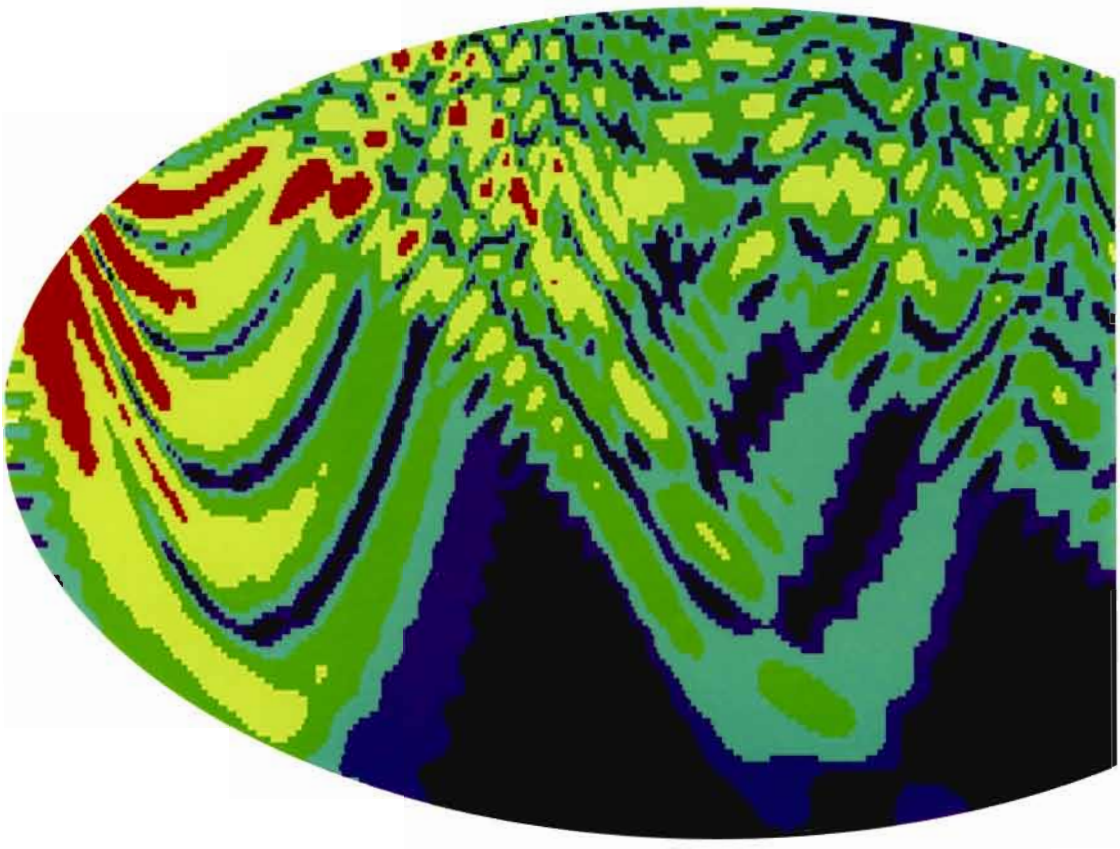
Xavier Lurton

Acoustique sous-marine

Présentation et applications

EXCLU DU PRÊT



Ingénierie - Technologie

IFREMER

2001

C 112
LUR
A

EXCLU DU PRÊT

Acoustique sous-marine

Présentation et applications

Xavier Lurton

IFREMER
Bibliothèque
Centre de Brest
BP 70 - 29280 PLOUZANÉ

IFREMER

IFREMER-Bibliotheque de BREST

0BR34408

6d45

« Les moindres bruits se transmettaient avec une vitesse
à laquelle l'oreille n'est pas habituée sur la terre.
En effet, l'eau est pour le son un meilleur véhicule que l'air,
et il s'y propage avec une rapidité quadruple.
(...) Des bruits profonds, nettement transmis par ce milieu
liquide, se répercutaient avec une majestueuse ampleur ».

Jules Verne,
Vingt Mille Lieues sous les Mers

Préface

L'acoustique sous-marine est née au début de ce siècle avec les expériences de Paul Langevin, et a définitivement prouvé sa grande importance au plan militaire à l'occasion du second conflit mondial. Il y a eu depuis, une évolution considérable des techniques de détection acoustique ; par ailleurs, les applications civiles à l'océanographie, à la prospection et à l'exploitation du pétrole offshore se sont développées récemment en constituant le moyen privilégié quasi unique d'exploration à grande distance du monde marin.

L'ouvrage que propose Xavier Lurton arrive à point pour décrire cette aventure du vingtième siècle et donner dans l'esprit du lecteur ses lettres de noblesse à une science qui n'a pas encore dit son dernier mot. L'auteur, ingénieur pendant huit ans à la société Thomson, et depuis dix ans à l'Ifremer, a participé à l'élaboration des calculs sophistiqués de propagation acoustique qu'exigent les sonars modernes de détection. Il s'intéresse maintenant au développement et à l'exploitation de systèmes acoustiques appliqués à l'océanographie et aux techniques d'intervention sous-marine. Cette carrière, tout entière vouée à l'acoustique sous-marine, le désignait parfaitement pour écrire ce livre. Cet ouvrage, que j'ai lu avec beaucoup de plaisir, n'est pas seulement une œuvre de vulgarisation. Il y a certes le souci d'éviter tout calcul et de rendre la lecture accessible à tous. Mais il y a aussi la présentation simple et démystifiée des phénomènes très particuliers rencontrés en acoustique sous-marine ainsi que des termes qui constituent le jargon habituel des acousticiens. Beaucoup de scientifiques ou d'étudiants non spécialistes de cette discipline pourront découvrir simplement la complexité de la propagation acoustique dans la mer, la façon d'évaluer la performance d'un système de détection ou d'imagerie, etc. Quant à la panoplie des grandes expériences de communication ou de tomographie et des instruments modernes tels le sondeur multifaisceaux ou le sonar latéral bathymétrique qui ont accéléré considérablement l'exploration du monde sous-marin, leur évocation devrait susciter de nouvelles vocations.

Il reste aussi que si la détente, heureusement ressentie par le monde, a diminué considérablement l'effort de recherche militaire et tari une source essentielle de l'évolution technologique de l'acoustique sous-marine, il appartient désormais à ceux qui en ont le pouvoir, politiques ou grands commis de l'État, ainsi qu'aux instituts de recherche tels l'Ifremer, d'assumer la relève pour assurer la poursuite du progrès scientifique nécessaire à l'exploration du monde marin, la partie encore la plus mal connue de notre planète. Puisse la lecture de ce livre les y encourager, c'est la grâce que je leur souhaite.

Pierre Alais
Professeur à l'université Pierre et Marie Curie

Sommaire

Préface 5

Chapitre I. : **Le développement de l'acoustique sous-marine**

Pourquoi l'acoustique sous-marine ? 11
Points de repères historiques 15
Les principales utilisations de l'acoustique sous-marine 17

Chapitre II : **Propagation des ondes acoustiques sous-marines**

Ondes acoustiques 23
Pertes de propagation 27
Trajets multiples et influence de la célérité 31
Réflexion par la surface et le fond 40
Rétrodiffusion des ondes par une cible 43
Bruit ambiant 48
Bruits rayonnés par les navires 50
Déformations et fluctuations des signaux acoustiques sous-marins 52

Chapitre III : **Principes généraux de fonctionnement des systèmes acoustiques sous-marins**

Les transducteurs électroacoustiques sous-marins 57
Directivité des transducteurs et antennes 61
Signaux et traitements 67
Évaluation des performances 73
Deux archétypes de systèmes ASM : le sondeur et le sonar latéral 76

Chapitre IV : **Applications de l'acoustique sous-marine**

Navigation 83
Applications militaires 85
Acoustique et pêche 89
Géologie marine 92
Océanographie physique 99
Intervention sous-marine 102

Perspectives et conclusion 107

Bibliographie 110

Chapitre I

Le développement de l'acoustique sous-marine

Pourquoi l'acoustique sous-marine ?

La mise au point de moyens de transmission et de communication à grandes distances (téléphone, radio, télévision) est un des succès technologiques majeurs du monde moderne, qui a eu des répercussions sociales et culturelles gigantesques. La plupart de ces systèmes de télécommunication utilisent la propagation des *ondes électromagnétiques ;* de même nature que la lumière, ces ondes sont apparues, depuis la découverte de leurs propriétés au XIX^e^ siècle et le début de leur utilisation au XX^e^, comme un formidable moyen de transmission d'informations, mais aussi un puissant outil d'exploration et de surveillance de notre environnement à travers leur utilisation dans le *radar.* Se propageant dans le vide et dans l'atmosphère, elles ont vu leur domaine d'application s'étendre avec la conquête spatiale et la généralisation des satellites de télécommunications et de télédétection.

Toutefois le domaine sous-marin (correspondant à 70 % de la surface du globe terrestre...) échappe à peu près totalement à l'utilisation des ondes électromagnétiques, car l'eau - et surtout l'eau salée -, du fait de son caractère dissipatif lié à sa forte conductivité, provoque une atténuation extrêmement importante qui les rend rapidement inopérantes. Le seul vecteur permettant de transporter sous la mer des informations avec des caractéristiques assez facilement exploitables est constitué par les *ondes acoustiques,* qui sont des vibrations mécaniques du milieu de propagation. Se propageant dans l'eau de mer de manière très favorable, ces ondes vont permettre de compenser, dans une certaine mesure, la quasi-absence des ondes électromagnétiques et lumineuses dans l'océan.

Les ondes sonores font partie de notre environnement « aérien » quotidien : nous maîtrisons intuitivement leurs caractéristiques physiques, et nous les utilisons en permanence, de manière naturelle ou artificielle, et essentiellement pour des opérations de communication (bien qu'elles participent aussi à nos facultés d'orientation). Dans l'eau les choses sont quelque peu différentes. Les ondes acoustiques y possèdent de meilleures caractéristiques de transmission que dans l'air : elles ont une vitesse de propagation plus importante, peuvent atteindre des niveaux beaucoup plus élevés, et surtout y subissent moins d'atténuation et peuvent donc se propager à de grandes distances. Toutefois ceci est compensé par d'autres contraintes : en particulier les signaux utiles sont perturbés par beaucoup de bruit ambiant et d'échos parasites.

L'environnement sonore sous-marin est donc très différent de l'aérien, il doit être abordé de manière spécifique, et présente bien d'autres potentialités. Par exemple, les cétacés, qui sont les êtres vivants les plus évolués présents dans l'océan, utilisent abondamment l'émission d'ondes sonores, pour communiquer entre eux, mais aussi pour explorer leur environnement et pour localiser leurs proies, faculté sans équivalent chez les animaux terrestres (sauf la chauve-souris).

La facilité de propagation des ondes acoustiques dans l'eau a été constatée depuis longtemps, mais leur utilisation effective est assez récente, puisque les premières

réalisations pratiques viables n'ont vu le jour qu'au début du XX^{e} siècle, lorsque l'évolution technologique l'a permis. Depuis, leurs applications sont allées en s'amplifiant, et l'on peut dire que l'acoustique sous-marine permet aujourd'hui d'assurer dans l'océan l'essentiel du rôle dévolu aux ondes radar et radio dans l'atmosphère et l'espace (avec toutefois des performances souvent inférieures) :

• *détecter et localiser* des obstacles ou des cibles ; c'est la fonction première des systèmes *sonar,* concernant surtout les applications militaires de chasse aux submersibles et aux mines, mais aussi la pêche ;

• *mesurer* soit les caractéristiques des différents constituants du milieu marin (relief du fond, organismes vivants, courants et structures hydrologiques...), soit la position et la vitesse d'un mobile sous-marin ;

• *transmettre* des signaux, qui peuvent être des données acquises par des appareillages scientifiques immergés, des messages entre sous-marins et navires de surface, ou des commandes de systèmes téléopérés.

Ces systèmes acoustiques sont majoritairement de type *actif,* c'est-à-dire qu'ils utilisent l'émission d'un signal qui leur est propre, et qui sera soit réfléchi sur une cible soit transmis directement à un récepteur ; mais des systèmes *passifs* existent également, destinés à l'interception et l'exploitation des signaux sonores émis par la cible elle-même.

Influence du milieu de propagation

Le milieu de propagation (l'eau de mer), même s'il est très favorable à la propagation d'ondes acoustiques, impose néanmoins de nombreuses limitations :

• *atténuation* des signaux transmis, due en particulier à l'*absorption* des ondes sonores dans l'eau, qui va limiter les portées possibles pour un système donné ;

• propagation perturbée par les *variations de célérité* du son, et par les *réflexions* des signaux sur les interfaces (surface et fond), d'où :
- *insonification inhomogène* du milieu : les ondes sonores sous-marines ne se propagent pas « en ligne droite »,
- existence de *trajets multiples* générateurs d'échos parasites retardés et d'interférences ;

• *déformations* des signaux transmis : fluctuations dues aux inhomogénéités du milieu et aux interférences entre trajets multiples ainsi qu'aux réflexions sur la surface et le fond de la mer, changements de fréquence *(effet Doppler)* dus aux mouvements des sonars et des cibles ;

• *bruit ambiant* dans l'océan, dont le niveau tend à masquer le signal utile ; ce bruit est causé par l'agitation de surface, le trafic maritime, les organismes vivants, la pluie, auxquels il faut rajouter le *bruit propre* du système acoustique et surtout de son porteur (navire, ou engin sous-marin).

Par ailleurs les caractéristiques du milieu de propagation sont très variées et fluctuantes, à la fois dans l'espace et dans le temps : variations géographiques et saisonnières de la température et de la salinité, relief du fond, houle, courants et

tourbillons, marées, ondes internes, mouvements des systèmes acoustiques et des cibles... Tout ceci concourt à donner aux signaux acoustiques sous-marins un caractère fluctuant largement aléatoire.

Dans toutes les applications des systèmes actifs pour la détection et la localisation, le signal émis est renvoyé par une cible. Ce processus de *rétrodiffusion* est toujours très compliqué ; il dépend de la structure physique de la cible et de ses dimensions, ainsi que de l'angle d'arrivée et de la fréquence du signal. À l'écho obtenu sur la cible cherchée se superpose en général un continuum de signaux rétrodiffusés par des diffuseurs présents dans le milieu de propagation et aux interfaces, et qui vont masquer le signal utile ; c'est le phénomène de *réverbération*.

Le rôle très complexe que joue donc le milieu marin sur la transmission des signaux constitue la principale difficulté d'utilisation de l'acoustique sous-marine, et justifie l'effort important qui a été mené depuis un demi-siècle dans l'étude et la modélisation de la *propagation acoustique sous-marine*, qui constitue actuellement une des branches les plus actives de l'acoustique physique. On notera, pour se référer encore une fois à des techniques comparables, que la propagation des ondes électromagnétiques fait l'objet de beaucoup moins de littérature, si l'on considère l'énorme importance de leur utilisation relativement à celle de l'acoustique sous-marine et la relative facilité de l'expérimentation dans l'atmosphère ou l'espace comparée aux conditions sous-marines.

Structure des systèmes sonar

L'ensemble des systèmes de détection/localisation d'une cible, ou d'un obstacle immergé, à l'aide d'un signal acoustique sont couramment désignés par le terme générique de *sonar* (de l'acronyme anglais un peu douteux *SOund NAvigation and Ranging*). Le sonar ainsi présenté est donc l'équivalent, en acoustique sous-marine, du radar *(RAdio Detection And Ranging)* en électromagnétisme. La détection et la localisation d'une cible par un système sonar sont basées sur la réception :

- soit de l'écho d'un signal émis par le système et réfléchi sur la cible (sonar actif) ;
- soit directement du bruit rayonné par la cible (sonar passif).

Dans le premier cas, le sonar doit disposer d'un système d'émission de signaux acoustiques de forte puissance. Les signaux émis, et éventuellement renvoyés par la cible, se propagent dans l'océan, où ils sont affaiblis, déformés et bruités. La réception s'effectue sur une antenne, souvent constituée de plusieurs capteurs *(hydrophones)* dont les sorties sont conjuguées de manière adéquate. Les signaux passent ensuite dans une chaîne de traitement adaptée, destinée à améliorer le rapport signal à bruit, et font l'objet d'une décision de détection. Ils sont finalement utilisés pour la mesure (par exemple à des fins de localisation) et éventuellement l'identification ou la caractérisation de la cible. La structure générale de fonctionnement d'un système sonar est schématisée en figure 1.

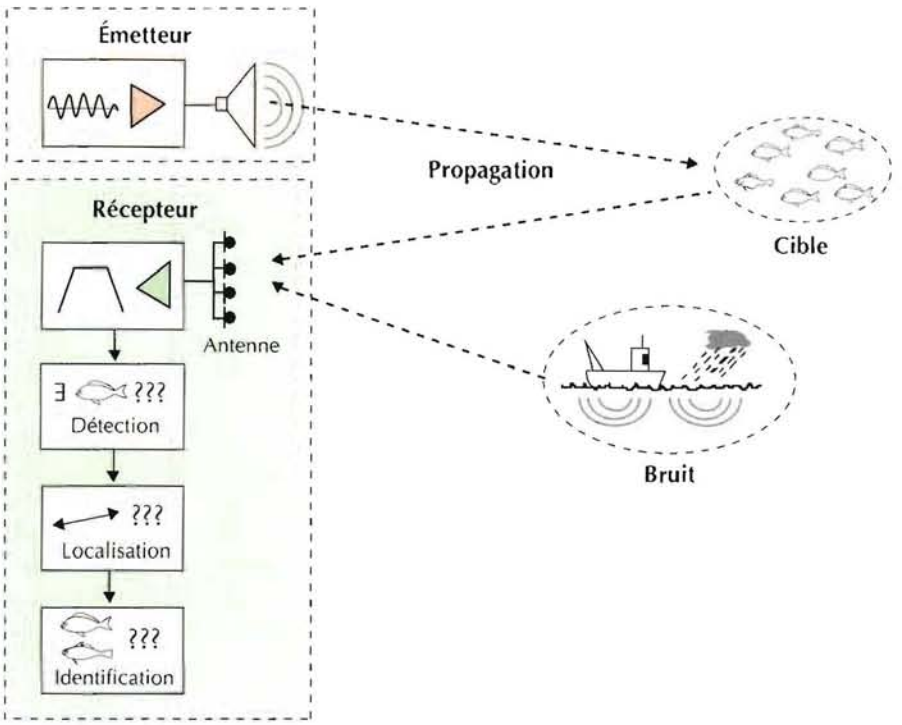


Figure 1 - Structure générique d'un système sonar.

Traitement des signaux

Au-delà des contraintes incontournables imposées par le milieu physique, la structure des signaux employés et les traitements associés conditionnent largement les performances des systèmes acoustiques sous-marins. Les principales applications du traitement des signaux sonar sont :

- *la détection* (identifier la présence d'un signal noyé dans du bruit) ;
- *la mesure de paramètres* du signal (en général le temps de propagation et la direction angulaire d'arrivée de l'onde) destinés le plus souvent à la localisation ;
- *l'identification* et *la caractérisation* de la cible (la reconnaître ou estimer certains de ses paramètres).

La localisation spatiale est effectuée à partir d'antennes, qui font l'objet de méthodes de traitement spécifiques pour la mesure d'angles ou de distances. De très nombreux travaux théoriques et appliqués dans les différents domaines du *traitement du signal sonar* ont été entrepris depuis plusieurs décennies. En ce qui concerne le sonar actif, une grande partie correspond à la transposition des résultats antérieurs ou contemporains obtenus dans le domaine du radar ; les progrès ont été plutôt d'ordre technologique, avec en particulier la généralisation du traitement numérique des signaux. Les techniques de sonar passif sont par contre très spécifiques, et ont fait l'objet de beaucoup de travaux théoriques et de développements originaux.

Points de repères historiques

Les pionniers

Historiquement, la possibilité d'utiliser les ondes acoustiques pour détecter des navires à distance en écoutant simplement dans l'eau le bruit qu'ils produisent a, semble-t-il, été connue depuis très longtemps ; on en trouve mention, par exemple, dans des écrits de Léonard de Vinci ! Les réalisations pratiques en sont néanmoins relativement récentes, puisque les premiers matériels acoustiques sous-marins utilisés de manière effective ont été les systèmes de détection passive mis au point lors de la Première Guerre mondiale par les Alliés pour faire face au type nouveau de guerre navale imposé par les sous-marins allemands ; il s'agissait simplement d'écouteurs immergés orientables, permettant à un opérateur de détecter un bruiteur et de déterminer grossièrement sa direction.

Parallèlement l'idée de la possibilité de détection acoustique active d'obstacles à la navigation ou de cibles a été étudiée dès le début du xx^{e} siècle, l'effort de recherche étant stimulé entre autres par le naufrage du *Titanic* en 1912. Fessenden réalisa cette même année un premier prototype de source électroacoustique sous-marine, basée sur un transducteur électrodynamique. Paul Langevin démontra, lors d'expériences historiques entre 1915 et 1918 dans la Seine et en mer, la faisabilité de la transmission de signaux, puis de la détection acoustique active de sous-marins avec localisation en distance et angle ; chose nouvelle et essentielle, il utilisait un *transducteur piézo-électrique* fonctionnant à 38 kHz, dont le principe allait être quasi universellement repris dans les développements ultérieurs.

La Seconde Guerre mondiale

La technologie des systèmes sonar se perfectionna de manière décisive pendant l'entre-deux-guerres, puisqu'elle bénéficia alors de l'apparition de l'électronique de première génération et des progrès de l'industrie naissante de la radio. Au début de la Seconde Guerre mondiale la technologie du sonar actif était suffisamment bien au point pour pouvoir être utilisée opérationnellement à grande échelle sur les navires alliés (les fameux systèmes *asdic* de la Royal Navy) et jouer un rôle déterminant dans la bataille de l'Atlantique opposant navires alliés et sous-marins allemands. À partir de leur entrée en guerre, les États-Unis allaient consentir un énorme effort de recherche scientifique et technologique dans ce domaine (au même titre que dans ceux du radar ou de l'arme nucléaire), et faire considérablement progresser les performances des systèmes sonar actifs, mais aussi les approches théoriques de la propagation des ondes sonores sous-marines et les théories liées à la détection et à la mesure des signaux dans le bruit. Une grande partie des connaissances et théories de base utilisées aujourd'hui en acoustique sous-marine date de cette époque.

L'Après-Guerre

L'effort de recherche scientifique et technologique se poursuivit après la fin des hostilités en 1945, pendant la « Guerre Froide » entre les blocs Ouest et Est. La course

aux armements nucléaires stratégiques, qui ne s'est ralentie qu'avec l'éclatement de l'URSS au début des années quatre-vingt-dix, a ainsi justifié pendant plusieurs décennies un énorme effort de développement des systèmes acoustiques sous-marins, tant à l'Ouest qu'en Union Soviétique, où de vastes programmes de recherche et d'expérimentation furent à leur tour lancés. Une nouvelle impulsion fut en particulier donnée, à la fin des années cinquante, avec l'apparition des sous-marins nucléaires lanceurs de missiles stratégiques, suivie de celle des sous-marins nucléaires d'attaque, qui amenèrent à une révision complète de la doctrine de guerre sous-marine : le sonar, qui était jusque-là un outil de surveillance locale de convois de navires ou de couloirs de navigation, devait maintenant être à même de contrôler de vastes zones océaniques.

Priorité fut alors donnée, dans les années soixante, aux techniques de détection passive, qui permettaient à l'époque des portées beaucoup plus importantes que les sonars actifs. Une révolution technologique importante se produisit avec l'introduction des méthodes de traitement numérique des signaux à partir de la fin des années soixante, qui permirent d'augmenter énormément les capacités et la souplesse des systèmes sonar et de profiter de l'évolution des performances des calculateurs. L'extrême degré de sophistication qu'atteignirent les sonars passifs dans cette période trouva néanmoins sa parade dans les progrès faits en matière de discrétion acoustique des sous-marins ; la tendance fut une nouvelle fois inversée dans les années quatre-vingt, avec un retour vers les techniques de sonar actif étendues au domaine des basses fréquences, permettant des portées importantes. Les conflits des années quatre-vingt et quatre-vingt-dix (guerres des Malouines, du Golfe) ont confirmé l'importance cruciale de la maîtrise des techniques sonar face aux menaces des sous-marins d'attaque et des mines.

Évolution dans les domaines civils

Parallèlement, l'océanographie et l'industrie allaient profiter largement des développements de l'acoustique sous-marine. L'utilisation de *sondeurs* acoustiques pour la mesure de la hauteur d'eau et la détection d'obstacles supplanta vite la méthode traditionnelle du fil à plomb, et se généralisa pendant l'entre-deux-guerres. Ces systèmes sont aujourd'hui à la fois des instruments scientifiques et des outils indispensables d'aide à la navigation qui bénéficient à ce titre d'une diffusion de produits électroniques grand public. L'utilisation de ces mêmes sondeurs pour la détection des bancs de poissons fut proposée dès 1926 ; l'acoustique sous-marine est depuis lors progressivement devenue indispensable aux techniques de la pêche maritime. La mise en œuvre de sonars latéraux pour relever des « images acoustiques » précises du fond de l'océan devint incontournable pour la géologie marine à partir de leur invention par Edgerton en 1963.

La cartographie acoustique des fonds connut une étape importante avec l'apparition dans les années soixante-dix des sondeurs multifaisceaux ; le principe de

l'imagerie par sonar latéral, intégré à partir de la fin des années quatre-vingt aux sondeurs multifaisceaux, permet aujourd'hui de réaliser des relevés cartographiques de remarquable qualité comportant à la fois le relief du fond et l'image de sa *réflectivité*, donc de certains aspects de sa nature. Également concernées par la cartographie acoustique, l'industrie pétrolière *offshore* et l'intervention sous-marine ont suscité le développement de méthodes acoustiques spécifiques de *positionnement* de mobiles sous-marins et de *transmission de données*.

Dans le domaine de l'océanographie physique, la propagation des ondes acoustiques est utilisée depuis les années soixante-dix pour mesurer des perturbations hydrologiques de moyenne échelle. Cette technique, la *tomographie acoustique océanique*, est en pleine expansion aujourd'hui. Des variantes en sont proposées pour la surveillance permanente de l'évolution de la température moyenne des grands bassins océaniques dans le cadre des études globales du climat de la Planète.

Les principales utilisations de l'acoustique sous-marine

Les principales applications de l'acoustique sous-marine, représentées ici rapidement, font l'objet de descriptions détaillées au chapitre IV.

Applications militaires

L'essentiel de l'effort de recherche et d'industrialisation dans le domaine de l'acoustique sous-marine est lié à des applications militaires ; les systèmes sont destinés essentiellement à la détection, la localisation et l'identification de deux types de cibles : sous-marins et mines.

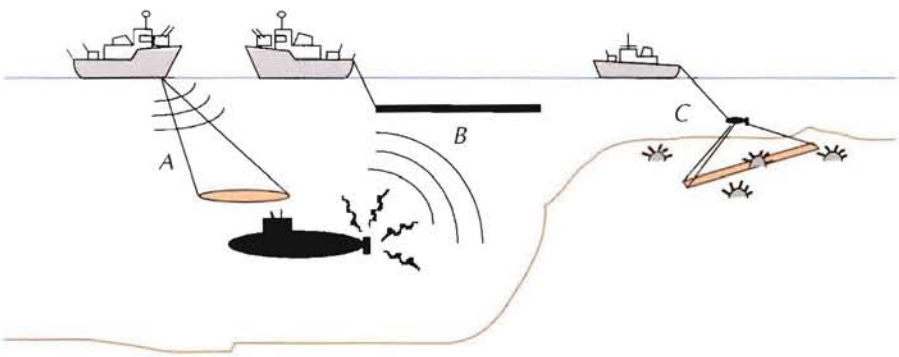


Figure 2 - Applications militaires - A : sonar actif - B : sonar passif - C : sonar actif chasse mines.

Les sonars militaires peuvent être classés en deux grandes catégories selon leur principe de fonctionnement :

• les *sonars actifs* émettent un signal et recueillent les échos renvoyés par une cible qui est en général un sous-marin en plongée ; la mesure du retard permet d'estimer la distance sonar-cible, et la réception sur une antenne appropriée permet de compléter la localisation par détermination de la direction angulaire. Par ailleurs l'analyse de l'écho permet d'obtenir certaines indications sur la cible elle-même, par exemple sa vitesse grâce à l'effet Doppler. Les sonars chasse-mines constituent une variété particulière de sonar actif : très performants en résolution, ils sont destinés à repérer et identifier des mines posées, voire enfouies, sur le fond de l'océan en zones littorales ;

• les *sonars passifs*, qui n'ont pas d'équivalent en applications civiles, sont destinés à intercepter les bruits (éventuellement les signaux de sonars actifs) rayonnés par le navire cible ; leur intérêt est leur discrétion totale de fonctionnement, qui permet de les mettre en œuvre aussi bien sur les sous-marins eux-mêmes que sur les navires qui les traquent. L'acquisition du bruit rayonné par la cible permet, outre la simple détection, de localiser celle-ci à partir de l'analyse de la structure spatiale du champ acoustique reçu sur une antenne de dimensions suffisantes, et de l'identifier à partir de sa *signature acoustique*.

Applications civiles

L'acoustique sous-marine à vocation civile est un secteur d'activité industrielle et scientifique relativement modeste mais très varié et en phase de croissance, tiré par les besoins en instrumentation scientifique des grands programmes d'étude et de surveillance de l'environnement, ainsi que par les développements de l'ingénierie offshore et de la pêche industrielle.

Les principales catégories d'applications sont :

• les *sondeurs bathymétriques*, sonars spécialisés dans la mesure de la hauteur d'eau : ils émettent un signal verticalement vers le bas dans un faisceau étroit, et mesurent le retard de l'écho renvoyé par le fond ; ce type de matériel est aujourd'hui extrêmement répandu, jusque sur les bateaux de plaisance ;

• les *sondeurs et sonars de pêche*, destinés à la détection et à la localisation de bancs de poissons, analogues dans le principe aux sondeurs bathymétriques mais pourvus de fonctionnalités supplémentaires spécifiques pour recevoir et traiter les échos venant de toute la hauteur d'eau ;

• les *sonars latéraux* servant à l'imagerie acoustique du fond, permettant des observations d'une grande précision : installé sur un engin remorqué près du fond, le sonar émet, dans une direction très proche de l'horizontale, une impulsion brève qui « court » le long du fond ; le signal réverbéré en fonction du temps reproduit alors l'image des irrégularités, obstacles et changements de structure ; ces systèmes sont utilisés soit en géologie marine soit pour la recherche de mines ou d'épaves ;

• les *sondeurs multifaisceaux* de cartographie, utilisés à bord des navires océanographiques pour le relevé précis de la topographie des fonds marins : un éventail de faisceaux élémentaires, transversal à l'axe du navire, permet de balayer rapidement une large bande de terrain sur le fond et d'en mesurer le relief ; si l'ouverture angulaire est suffisamment large, le sondeur peut fournir des images acoustiques comme un sonar latéral ;

• les *sondeurs profileurs de sédiments* liés à l'étude de la structure interne stratifiée des fonds marins ; ce sont des sondeurs monofaisceaux analogues à ceux utilisés en bathymétrie, mais dont la fréquence très basse permet une pénétration du fond sur des profondeurs de plusieurs dizaines voire centaines de mètres ; dans le même domaine d'application les systèmes de *sismique*, utilisant des sources explosives ou percussives et de grandes antennes de réception, peuvent explorer le sous-sol sur plusieurs kilomètres de profondeur, et sont largement utilisés en prospection pétrolière ;

• les *systèmes de communication* (téléphone sous-marin...) et de transmission de données numérisées (télécommandes, images, résultats de mesures...) ; ils sont limités dans leurs performances par les faibles bandes passantes disponibles et par les difficultés imposées par la propagation sous-marine ; des débits de plusieurs kilobits par seconde sont toutefois possibles à des distances de plusieurs kilomètres ;

• les *systèmes de positionnement* destinés par exemple à l'ancrage dynamique des navires de forage pétrolier ou à la localisation de submersibles ou d'engins remorqués ; le mobile est localisé, par exemple, à partir de la mesure des temps de trajet des signaux provenant de plusieurs émetteurs fixes installés sur le fond ; de nombreuses variantes de configuration sont en fait possibles ;

• les *systèmes à effet Doppler* utilisant le changement de fréquence des échos par rapport au signal émis, pour mesurer soit la vitesse du sonar (et de son porteur) par rapport à un milieu fixe (*loch Doppler*) soit celle de l'eau par rapport à un instrument fixe (*courantomètre Doppler*) ;

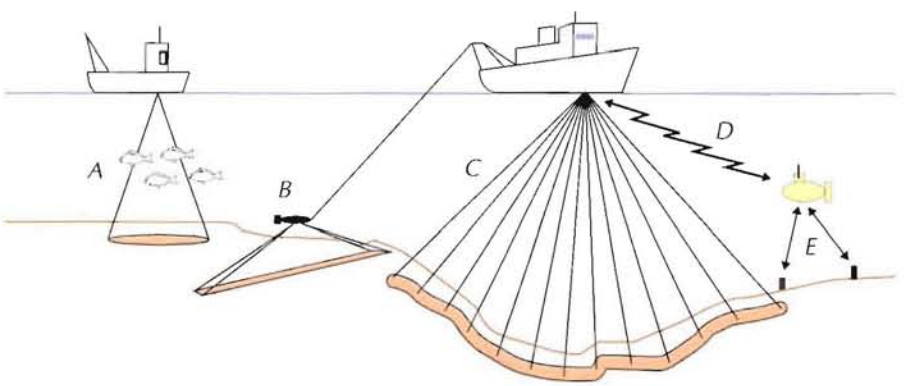


Figure 3 - Quelques applications civiles - A : sondeur de bathymétrie ou de pêche - B : sonar latéral - C : sondeur multifaisceaux - D : transmission de données - E : positionnement acoustique.

• les *réseaux de tomographie acoustique* permettant la mesure, entre des émetteurs et des récepteurs fixes, soit des temps de trajets (sur de grandes distances) soit des fluctuations d'amplitudes (sur de faibles distances) pour évaluer la structure de perturbations hydrologiques à partir de l'estimation des variations de la célérité.

L'acoustique sous-marine apparaît donc aujourd'hui comme une technologie essentielle dans la maîtrise des océans, tant du point de vue scientifique que militaire ou industriel. Autorisant de multiples types d'applications (détection, localisation, transmission, et mesure) à des échelles très variées, elle répond, en dépit des fortes limitations imposées par l'environnement naturel et artificiel, à l'essentiel des besoins actuels.

Chapitre II

Propagation des ondes acoustiques sous-marines

Ondes acoustiques

Pression acoustique

Les ondes acoustiques sont provoquées par la propagation d'une perturbation mécanique : une compression-dilatation locale d'un élément du milieu se transmet à un élément adjacent du fait de son élasticité, et ainsi de proche en proche se propage en s'éloignant de la source de la perturbation (fig. 4). Une telle onde nécessite un support matériel élastique pour pouvoir se propager (gaz, liquide ou solide) ; les caractéristiques mécaniques de ce support fixent la rapidité (dite *célérité*) de propagation de la perturbation.

L'onde acoustique est donc caractérisée par l'amplitude du « mouvement sur place » local de chaque élément du milieu de propagation autour de sa position d'équilibre, par la *vitesse particulaire* correspondante et par la *pression acoustique* (variation autour de la pression statique moyenne) qui en résulte.

Dans la pratique c'est la pression acoustique qui est la grandeur la plus employée en acoustique sous-marine : les *hydrophones* utilisés comme récepteurs sont des capteurs de pression. L'unité de mesure de pression est le pascal (1 Pa = 1 N/m^2). La dynamique (différence entre les valeurs maximales et minimales) des pressions acoustiques rencontrées est extrêmement élevée : le bruit de fond mesuré dans des conditions calmes peut correspondre à quelques dizaines de micropascals (µPa), alors que le niveau sonore près d'une source de forte puissance peut atteindre 10^{12} µPa !

Célérité et densité

La célérité de propagation de l'onde acoustique est imposée par les caractéristiques du milieu de circulation. Elle dépend de la masse volumique ρ et du module d'élasticité E de ce milieu, par la relation $c = \sqrt{E/\rho}$.

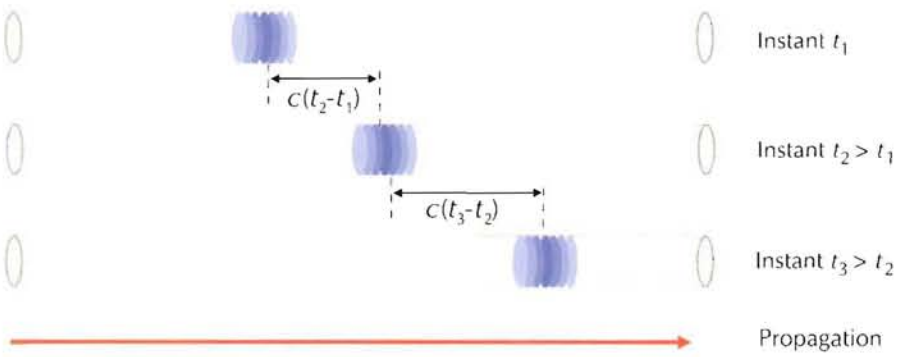


Figure 4 - Propagation d'une surpression locale dans un guide d'ondes, au cours du temps.

La célérité de l'onde acoustique dans l'eau de mer a une valeur voisine de 1 500 m/s (généralement entre 1 450 et 1 550 m/s, dépendant de la pression, de la salinité et de la température). La masse volumique de l'eau de mer est de l'ordre de 1 030 kg/m^3. Dans un sédiment, la célérité vaut typiquement entre 1 500 et 2 500 m/s, et la masse volumique de 1300 à 2000 kg/m^3. Les valeurs correspondantes dans l'air, à titre de comparaison, sont d'environ 340 m/s et 1,3 kg/m^3.

Fréquence et longueur d'onde

Les signaux acoustiques ne sont généralement pas des perturbations instantanées, mais des vibrations entretenues que l'on peut caractériser par leur *fréquence* (nombre de vibrations par seconde, exprimé en hertz, noté Hz) ou leur *période* (durée d'une vibration élémentaire). La gamme des fréquences utilisées en acoustique sous-marine s'échelonne entre 10 Hz et 1 MHz, selon les applications, ce qui correspond à des périodes entre 0,1 s et 1 µs. La *longueur d'onde* traduit l'intervalle spatial entre deux points du milieu animés du même état vibratoire (avec un déphasage de 2π) ; autrement dit, c'est la distance parcourue par l'onde pendant une période du signal, qui vaut donc $\lambda = cT = c/f$. Pour une célérité de 1 500 m/s, les longueurs d'ondes acoustiques sous-marines seront donc de 150 m à 10 Hz, de 1,5 m à 1 kHz et de 1,5 mm à 1 MHz.

Ces valeurs très variées de la fréquence correspondent évidemment à des phénomènes physiques assez différents ; les principales contraintes à considérer sont :

- l'amortissement du son dans l'eau, qui augmente très rapidement avec la fréquence ;
- la taille des sources sonores, qui devient prohibitive en basses fréquences ;
- la résolution spatiale, d'autant meilleure que la fréquence est élevée ;
- la réponse acoustique de la cible, qui dépend de la fréquence.

Le choix d'une fréquence pour une application donnée doit prendre en compte ces aspects, et résulte en général d'un compromis. Les gammes de fréquences utilisées par les principales catégories de systèmes ASM sont représentées dans le tableau ci-dessous.

Fréquence (kHz)	**0.1**	**1**	**10**	**100**	**1 000**
Distances Maximales (km)	**1 000**	**100**	**10**	**1**	**0.1**
Sondeurs multifaisceaux					
Sonars latéraux					
Transmission & positionnement					
Sonars militaires actifs					
Sonars militaires passifs					
Sondeurs et sonars de pêche					
Océanographie acoustique					
Sondeurs de sédiments					
Sismique					

Gammes de fréquences des principaux systèmes ASM, et portées approximatives (ces dernières non valables pour sonars passifs, sismiques et sondeurs de sédiments).

Intensité et puissance

La propagation d'une onde sonore met en jeu une certaine *énergie acoustique*, que l'on peut décomposer en une partie *cinétique* (correspondant au mouvement particulaire) et une partie *potentielle* (due au travail des forces élastiques de pression). Comme pour la pression acoustique, les ordres de grandeur de l'intensité et de la puissance sont très variables. Un émetteur sonar de forte puissance peut délivrer une puissance acoustique de plusieurs dizaines de kilowatts ; un sous-marin nucléaire silencieux rayonne une puissance de quelques milliwatts !

L'intensité acoustique (I) est la valeur moyenne du flux d'énergie par unité de surface et de temps ; elle est égale à la moyenne du produit de la pression acoustique par la vitesse particulaire, soit pour une onde plane d'amplitude p_0 :

$$I = \frac{p_0^2}{2\rho c} \qquad \text{(en W/m}^2\text{)}$$

La puissance acoustique P reçue par une surface *(S)* est l'intensité corrigée de la surface considérée, soit :

$$P = I \times S = \frac{p_0^2 S}{2\rho c} \qquad \text{(en W)}$$

Notation logarithmique

Du fait de leur dynamique très importante, les grandeurs acoustiques (pressions, énergies) sont le plus souvent quantifiées logarithmiquement et notées en *décibels* (dB). En toute rigueur le décibel traduit le décuple du logarithme décimal du rapport de deux puissances $10 \log (P_1/P_2)$, mais on étend son utilisation à d'autres grandeurs physiques correspondantes : en pression acoustique le même rapport est $20 \log (p_1/p_2)$, puisque P_i est proportionnel à p_i^2. On prendra donc 10 log pour les grandeurs homogènes à une énergie (puissance, intensité) et 20 log pour celles homogènes à une pression acoustique.

Avec cette notation, un écart de 3 dB entre deux signaux correspond donc à un rapport 2 de leurs énergies, et de $\sqrt{2}$ pour leurs amplitudes ; un écart de 10 dB correspond à un rapport 10 en énergie et $\sqrt{10} \approx 3{,}1$ en amplitude. Un écart de 1 dB (limite pratique de précision de mesures en acoustique sous-marine) correspond à environ 10 % de variation de la pression acoustique.

Niveaux absolus

Pour donner en décibels un *niveau absolu* de pression ou d'intensité, on doit utiliser des grandeurs de référence ; par exemple la référence de pression acoustique sous-marine est le micropascal :

$$p_{dB} = 20 \log \left(\frac{p}{p_{ref}}\right) \qquad \text{avec} \qquad p_{ref} = 1\ \mu\text{Pa}$$

La pression acoustique absolue est donc exprimée en décibels par rapport à 1 micropascal (dB/µPa).

Cette référence absolue de pression est différente de celle utilisée dans l'air, qui est de 20 µPa (valeur moyenne du seuil d'audition humaine à 1 kHz). Noter également que la référence de pression en ASM a été longtemps le *microbar*, qui vaut 10^5 µPa.

L'équation d'onde et ses solutions

Les ondes acoustiques dans les liquides et les gaz obéissent aux lois de la mécanique des fluides ; on montre que leur propagation est décrite de manière générale par l'équation de Helmholtz :

$$\Delta p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2(x, y, z)} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

exprimée ici pour la pression p d'une onde se déplaçant au cours du temps t dans l'espace (x, y, z), et où $c\ (x, y, z)$ est la célérité locale de propagation de l'onde. Dans un milieu de célérité constante $c\ (x, y, z) = c$, si la propagation est restreinte à la seule direction x, l'équation devient :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

Par exemple pour une onde sinusoïdale de fréquence f_0 la pression acoustique solution de l'équation ci-dessus sera de la forme :

$$p(t) = p_0 \exp(2\pi j f_0 (t - \frac{x}{c}))$$

La propagation s'effectuant ici selon la seule direction x, il s'agit d'une *onde plane*, dont les fronts d'onde (surfaces de phase égale) sont des plans orthogonaux à x. La vitesse particulaire $v\ (t)$ est obtenue à partir de la pression par $p = \rho c v$, où ρ est la masse volumique. Le produit ρc, qui traduit le rapport entre vitesse particulaire et pression acoustique, est appelé *impédance caractéristique* du milieu de propagation.

Lorsque l'on considère la propagation selon les trois directions de l'espace supposé isotrope, on montre que la solution est une *onde sphérique* :

$$p(t) = \frac{p_0}{R} \exp(2\pi j f_0 (t - \frac{R}{c}))$$

La variable d'espace considérée est ici la distance sphérique R depuis la source. Les fronts d'onde sont dans ce cas des sphères centrées sur la source située en $R = 0$, et l'amplitude de l'onde décroît en $1/R$.

Ondes longitudinales et transversales

Les ondes pour lesquelles le déplacement particulaire s'effectue dans la même direction que la propagation sont dites *longitudinales* (ou *de compression*), et sont celles rencontrées dans les fluides (liquides et gaz). Les milieux *solides* peuvent de plus supporter des ondes *transversales* (ou de *cisaillement*), pour lesquelles le déplacement et la direction de propagation sont orthogonaux ; ils sont caractérisés par deux valeurs de célérité (longitudinale et transversale), ce qui complique bien sûr les modélisations. Les ondes transversales sont prises en compte en acoustique sous-marine pour décrire la propagation dans les sédiments suffisamment consolidés, ainsi que les phénomènes de diffusion par des cibles solides.

Pertes de propagation

Le premier phénomène auquel sont soumises les ondes acoustiques lors de leur propagation est une *perte d'intensité* correspondant d'une part à un effet géométrique de *divergence* et d'autre part à *l'absorption* de l'énergie acoustique par le milieu de propagation lui-même. Cette perte de propagation (ou de transmission) est un paramètre capital du fonctionnement d'un système acoustique, puisqu'elle va conditionner l'amplitude du signal reçu, donc les performances du récepteur, qui dépendent directement du rapport signal à bruit.

Pertes par divergence géométrique

La propagation d'une onde acoustique depuis une source sonore correspond à un étalement de l'énergie acoustique émise sur une surface de plus en plus importante. L'énergie se conservant, l'intensité diminue proportionnellement à l'inverse de cette surface. C'est le phénomène de perte par divergence géométrique (qui n'est pas spécifique aux ondes acoustiques, et qui affecte de manière analogue les ondes électromagnétiques).

Le cas le plus simple (et le plus utile) est celui d'un milieu illimité homogène et d'une source de petite dimension rayonnant également dans toutes les directions (*point-source*). L'énergie émise est conservée, mais se répartit sur des sphères (fig. 5) de rayons de plus en plus grands.

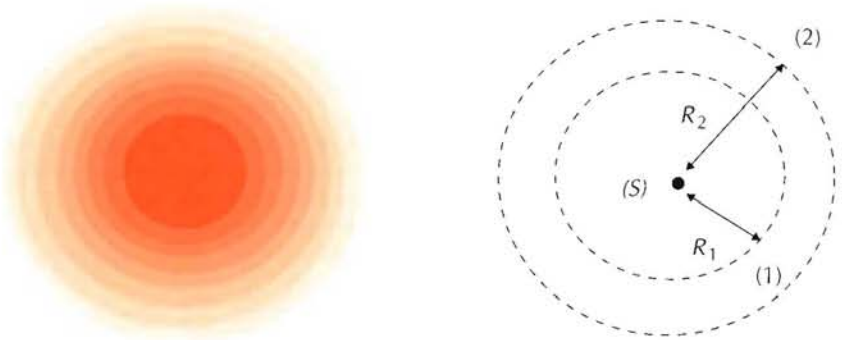


Figure 5 - Divergence sphérique.

La décroissance de l'intensité acoustique locale entre deux points 1 et 2 est l'inverse du rapport des surfaces des deux sphères correspondantes :

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{4\pi R_1}{4\pi R_2}\right)^2 = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2$$

où R_i est le rayon sphérique depuis la source. L'intensité décroît donc en $\frac{1}{R^2}$ et la pression en $\frac{1}{R}$; où l'on retrouve l'amplitude de l'onde sphérique présentée plus haut.

La perte par divergence exprimée en décibels vaut donc $PT = 20 \log R$. La perte est ici référencée par rapport à la distance conventionnelle de 1 m, et l'expression correcte est $PT = 20 \log (R/1\ \text{m})$; toutefois le «/1 m» est systématiquement omis.

Pertes par amortissement

Le milieu de propagation est *dissipatif* et absorbe une partie de l'énergie de l'onde sonore, qui est dissipée par viscosité ou par réaction chimique. L'amortissement est souvent le plus important facteur limitatif de la propagation acoustique. Sa valeur dépend fortement du milieu de propagation et de la fréquence. Dans l'eau de mer, il est dû à :

- la *viscosité* de l'eau pure ;
- la *relaxation des molécules de sulfate de magnésium* $MgSO_4$, au-delà de 100 kHz ;
- la *relaxation des molécules d'acide borique* $B(OH)_3$ au-delà de 1 kHz.

Cette propriété dissipative de l'eau se traduit par une *décroissance exponentielle de l'amplitude* avec la distance, qui va s'ajouter à l'effet de divergence géométrique ; par exemple dans le cas d'une onde sphérique, l'expression de la pression devient :

$$p(R,t) = p_0 \exp(-\beta R) \frac{\exp(2\pi j f_0 (t - \frac{R}{c}))}{R}$$

où l'effet de l'amortissement est contenu dans le paramètre β. Cette décroissance supplémentaire de la pression correspond à une diminution proportionnelle à la distance du niveau exprimé en décibels, que l'on traduit par un *coefficient d'amortissement* α exprimé en décibels par mètre (dB/m), relié à β par $\alpha = 20\,\beta \log e$. Noter que l'amortissement du son dans l'eau de mer est le plus souvent exprimé en dB/km. Le coefficient d'absorption s'écrit sous la forme suivante :

$$\alpha = A_1 P_1 \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} + A_2 P_2 \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} + A_3 P_3 f^2$$

Les deux premiers termes de cette expression font apparaître les contributions des phénomènes de relaxation ; le troisième terme correspond à la viscosité de l'eau pure. Les différents coefficients dépendent des valeurs de la température, de la pression et de la salinité.

Relaxation moléculaire

Ce phénomène consiste en la dissociation de certains composés ioniques en solution, du fait de la variation locale de pression créée par le passage de l'onde acoustique. Si la période de celle-ci est supérieure au temps nécessaire à la molécule pour se recomposer *(temps de relaxation)*, le phénomène se reproduit à chaque alternance et dissipe de l'énergie en permanence. L'atténuation due à ce phénomène apparaît donc pour des fréquences inférieures à la *fréquence de relaxation* caractéristique du composé concerné.

La figure 6 donne l'évolution du coefficient d'amortissement du son en fonction de la fréquence, calculé pour plusieurs températures. L'influence de l'amortissement augmente très rapidement avec la fréquence et ses ordres de grandeur sont très variables, ainsi qu'il apparaît dans le tableau ci-dessous :

F (kHz)	0,1	0,3	1	3	10	30	100	300	1 000
α (dB/km)	0,001	0,01	0,07	0,1	1	5	30	100	500

Si on considère la limitation de distance de propagation correspondant uniquement à la perte par amortissement, on voit que, pour 1 kHz et moins, l'absorption du son n'est pas un facteur limitatif. À 10 kHz, un coefficient de 1 dB/km interdit des portées de plus de quelques dizaines de km, alors qu'à 100 kHz on ne dépasse guère 1 km. Les systèmes travaillant dans la gamme du MHz sont limités à moins de 100 m de portée.

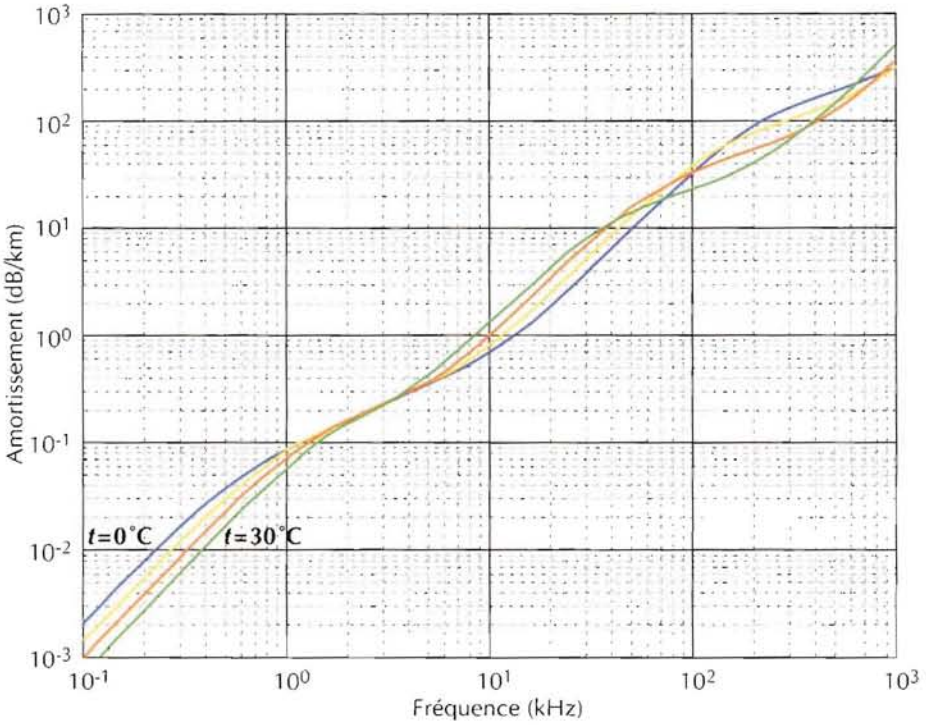


Figure 6 - Amortissement du son dans l'eau de mer en fonction de la fréquence (salinité 35 ‰, température 0 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C).

Perte conventionnelle de propagation

La divergence sphérique corrigée de l'atténuation par amortissement est systématiquement utilisée en première approche pour l'évaluation des pertes de propagation et des performances des systèmes acoustiques sous-marins ; soit en décibels :

$$PT = 20 \log R + \alpha R$$

Tous les systèmes exploitant un écho de cible subissent des pertes de propagation sur les *trajets aller et retour* ; la perte totale à considérer est alors :

$$2PT = 40 \log R + 2\alpha R$$

Cette formule simple est souvent suffisante pour l'évaluation des performances des systèmes ASM. Toutefois dans certaines applications, du fait des variations spatiales de célérité qui imposent des réfractions aux trajectoires des ondes et surtout de la présence des interfaces qui génèrent des trajets multiples concurrents, la divergence géométrique ne rentre pas dans le cas limite de la propagation sphérique, et l'on doit, pour évaluer les pertes effectives, faire appel à un modèle de propagation (rayons, modes, ou autres) adapté à la configuration étudiée.

La figure 7 présente l'évolution de la perte totale de propagation (divergence + amortissement) en fonction de la fréquence et de la distance. Elle fait apparaître la faible influence de l'amortissement aux fréquences inférieures au kHz et son rôle prédominant aux fréquences élevées.

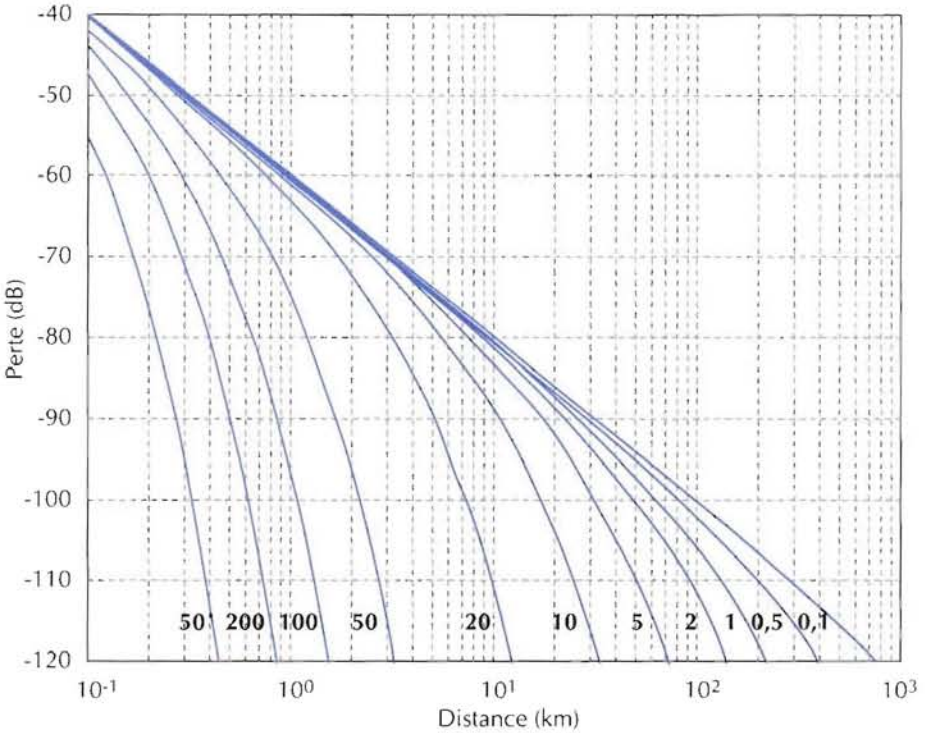


Figure 7 - Perte totale de propagation en fonction de la distance pour différentes fréquences.

Absorption par les bulles

Une cause de pertes supplémentaires de propagation, très difficile à prédire et à quantifier, mais qui peut avoir un effet rédhibitoire sur le fonctionnement des systèmes acoustiques sous-marins, est la présence de bulles d'air, soit à proximité du transducteur, soit sur le trajet des ondes sonores. Lorsque cela se produit, un système acoustique peut se trouver complètement inopérant, du fait de plusieurs phénomènes, isolés ou conjoints : absorption des signaux émis dans la couche de bulles, niveau de bruit supplémentaire provoqué par l'éclatement des bulles, masquage des transducteurs de réception. La présence de nuages de bulles dépend de nombreux facteurs : forme de la coque et vitesse du porteur, position et géométrie de l'implantation des transducteurs, conditions météorologiques, activité biologique, présence de sillages de navires... Beaucoup de travaux théoriques et expérimentaux sur les bulles et leur influence ont été conduits depuis un demi-siècle. La présence des bulles dans le milieu de propagation est incontrôlable et inévitable ; par contre l'effet des bulles apparaissant sous la coque du porteur d'un système sonar est, au moins en partie, prévisible, et sa minimisation doit être soigneusement recherchée.

Trajets multiples et influence de la célérité

Trajets multiples

Du fait de la limitation du milieu de propagation par la surface et le fond, les signaux émis subissent des réflexions successives sur les interfaces. Par ailleurs les variations de célérité du milieu peuvent provoquer des déformations des trajets des ondes sonores. Du fait de ces différents phénomènes, un signal donné peut se propager d'une source à un récepteur selon plusieurs trajets sonores distincts, correspondant à des directions et des durées différentes ; le signal principal « direct » arrive accompagné d'une traînée d'échos dont l'amplitude va diminuant avec l'augmentation du nombre de réflexions subies. La structure temporelle du signal à traiter s'en trouve évidemment plus ou moins perturbée, et les performances d'un système peuvent être très affectées par ces signaux parasites, spécialement dans les applications liées à la transmission de données. Le nombre de trajets multiples notables est très variable selon les configurations : au mieux il n'y en a aucun, au pire on peut en recevoir plusieurs dizaines, voire quelques centaines dans des configurations de propagation à très grandes distances ; ils ne sont alors pas identifiables individuellement, et se traduisent par une traînée continue.

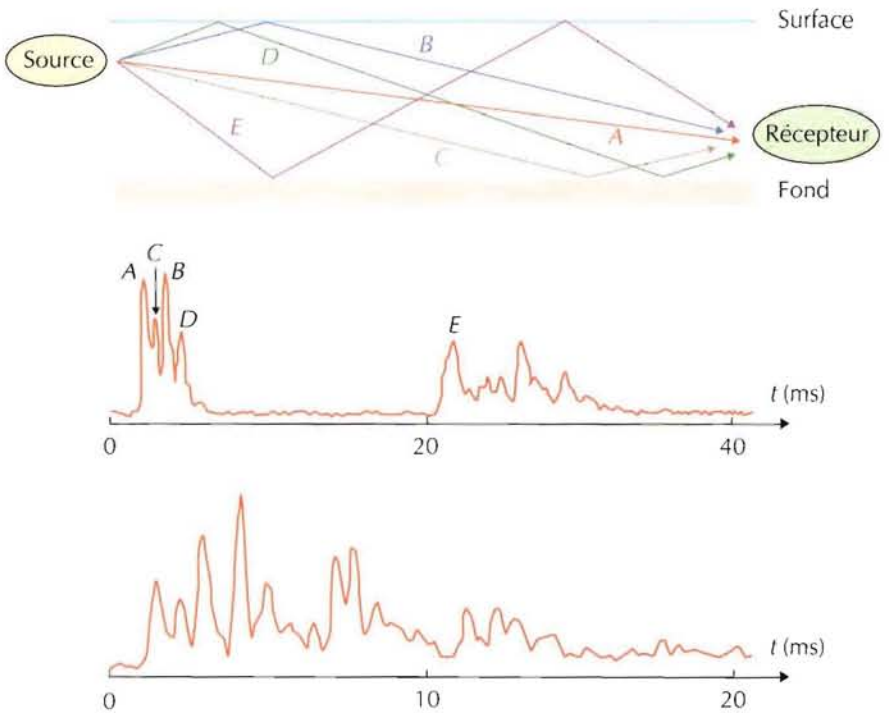


Figure 8 - En haut : structure de trajets multiples - A : trajet direct - B : réfléchi-surface - C : réfléchi-fond - D : surface-fond - E : fond-surface. En bas : exemples de signaux temporels comportant des trajets multiples, enregistrés dans des zones littorales de faible hauteur d'eau.

Célérité du son dans l'eau de mer

L'eau de mer est constituée d'un mélange d'eau pure et de sels dissous (NaCl, $MgSO_4$...) ; le pourcentage massique de ceux-ci définit la *salinité* (exprimée en ‰). Celle-ci est susceptible de variations assez importantes selon la zone géographique : la valeur moyenne est d'environ 35 ‰ (océans Atlantique, Pacifique et Indien) avec des valeurs régionales assez différentes pour les mers « fermées », provoquées par la prédominance des phénomènes d'évaporation ou d'apport d'eau douce (38,5 ‰ en Méditerranée, 14 ‰ en Baltique). En un point donné, la variation avec l'immersion est en général faible (de l'ordre de 1 à 2 ‰), mais peut être notable dans certaines configurations locales : estuaires, fonte de glaces...

La température décroît globalement de la surface vers le fond. Ses variations spatiales et temporelles concernent surtout la couche superficielle (brassage, soleil, courants, apports extérieurs) jusqu'environ 1 000 m ; en dessous la température moyenne reste stable, décroissant lentement en fonction de l'immersion et variant peu d'un endroit à un autre. Dans les mers fermées la température est constante au-delà d'une immersion assez faible (200 m en Méditerranée). De plus, la structure thermique fine est très variable et provoque de rapides fluctuations locales.

Par ailleurs, l'eau de mer contient de nombreuses *inhomogénéités* : bulles près de la surface (dues à l'agitation, aux sillages...), organismes vivants (poissons, plancton...), particules minérales en suspension... qui sont autant de causes de diffusion des ondes sonores, surtout en hautes fréquences. Enfin les *ondes* et *marées internes*, liées aux variations de la densité de l'eau avec l'immersion, causent des fluctuations des profils de célérité.

Calcul de la célérité

La célérité du son dépend à la fois de la température, de la salinité et de l'immersion, et varie dans le même sens que ces trois grandeurs. Ainsi, la pression hydrostatique provoque une augmentation linéaire de la célérité avec la profondeur d'environ 16 m/s par kilomètre. De nombreux modèles de célérité du son existent dans la littérature (Lovett, Del Grosso, Chen & Millero...). On peut utiliser en première approche la formule proposée par Medwin :

$$c = 1449{,}2 + 4{,}6t - 0{,}055t^2 + 0{,}00029t^3 + (1{,}34 - 0{,}01t)(S - 35) + 0{,}016z$$

où c est la célérité en m/s, t est la température en °C, z l'immersion en m, et S la salinité en ‰.

Mesure de la célérité

Deux types de systèmes de mesure de la célérité sont couramment utilisés. Le *bathycélérimètre* effectue directement une mesure de la célérité (en général par mesure de phase) pour une onde de haute fréquence sur une distance parfaitement calibrée ; ce type d'appareillage est évidemment extrêmement délicat, du fait qu'il doit être insensible à des conditions d'emploi très variées en température et en pression hydrostatique, qui induisent des contraintes mécaniques importantes sur la structure. Le *bathythermographe* ne mesure que la température de l'eau en fonction de l'immersion. Ceci implique, pour pouvoir calculer la célérité, de connaître par ailleurs le profil de salinité. Celui-ci peut être mesuré simultanément par un dispositif de mesure de conductance intégré dans le même appareil ; mais souvent on se réfère en fait à des bases de données qui donnent des valeurs moyennes de salinité avec une précision suffisante. Le bathythermographe est l'instrument le plus utilisé dans la pratique ; les modèles les plus répandus aujourd'hui permettent d'effectuer la mesure depuis un navire en route avec des sondes consommables.

Profil bathycélérimétrique

Il est souvent possible de faire l'approximation d'une *stratification horizontale* du milieu : la célérité ne dépend alors que de l'immersion, ce qui simplifie beaucoup la modélisation des phénomènes de propagation. On appelle *profil bathycélérimétrique* cette loi de dépendance, qui comporte plusieurs parties bien caractéristiques (fig. 9) :

- une strate homogène *(mixed layer)* de célérité constante est souvent présente dans les premiers mètres d'immersion ; elle est due au brassage par l'agitation de la surface ;
- une *isotherme* est une couche d'eau à température constante, où la célérité augmente linéairement du fait de la pression hydrostatique ;
- un *chenal de surface* correspond à une augmentation de la célérité depuis la surface, en général dû à une couche superficielle isotherme ;
- une *thermocline* est une variation monotone de la température avec l'immersion ; le plus souvent elle est décroissante et provoque alors une diminution de la célérité vers les immersions croissantes ; elle peut être saisonnière (près de la surface) ou permanente ;
- un *chenal profond* correspond à un minimum de célérité (par exemple entre une thermocline et une couche isotherme profonde).

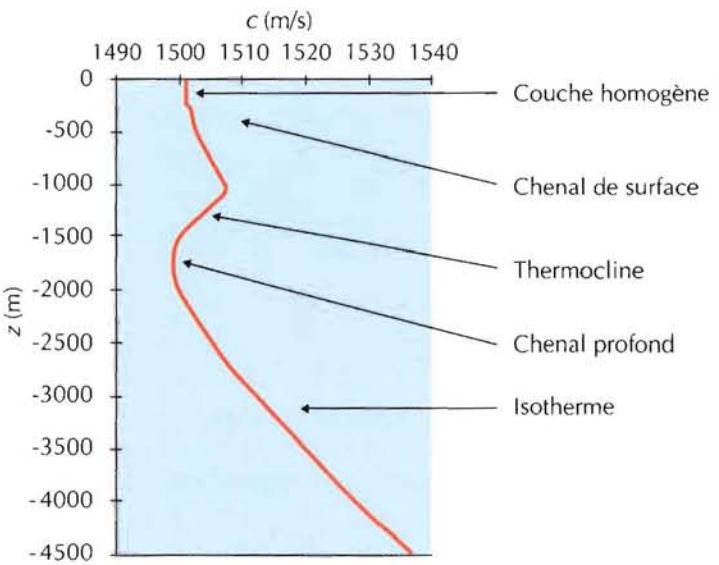


Figure 9 - Structure d'un profil bathycélérimétrique en Atlantique nord-est. Noter l'augmentation de célérité autour de 1 000 m, liée à la présence d'eau méditerranéenne.

Ces différents constituants peuvent se combiner pour constituer des profils de formes très variées, en fonction des conditions locales. Des phénomènes locaux peuvent venir encore compliquer les choses : par exemple, aux hautes latitudes, la présence en surface d'eau très froide issue de la fonte de la banquise ; ou l'intrusion par le détroit de Gibraltar des eaux méditerranéennes dans l'Atlantique nord-est, où elles viennent constituer une strate plus salée et chaude entre 1 000 m et 2 000 m d'immersion ; ou, en zone littorale, les apports d'eau douce par les estuaires de fleuves. Enfin il faut considérer que la variabilité horizontale de la célérité, bien qu'inférieure à l'évolution en profondeur n'est pas forcément négligeable.

Réfraction par un profil bathycélérimétrique

Considérons l'interface entre deux milieux fluides homogènes de célérités différentes (c_1 *et* c_2) ; lors du changement de milieu de propagation, la modification des caractéristiques d'une onde plane est particulièrement intéressante. Le changement de célérité provoque une réflexion spéculaire de l'onde dans le premier milieu (selon une direction symétrique par rapport à la normale au point d'incidence) et une réfraction de l'onde dans le second milieu, selon un angle donné par la célèbre *loi de Snell-Descartes :*

$$\frac{\sin \theta_1}{c_1} = \frac{\sin \theta_2}{c_2}$$

Cette relation n'est viable que si $\sin\theta_2 \leq 1$, donc pour $\sin\theta_1 \leq c_1 / c_2$. L'angle limite donné par $\theta_c = \arcsin(c_1 / c_2)$ est appelé *angle critique* de l'interface. Aux valeurs supérieures à cet angle (incidences très rasantes) on dit qu'il y a *réflexion totale* : la transmission dans le second milieu est alors impossible.

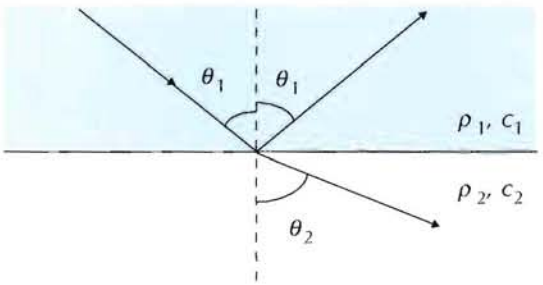


Figure 10 - Réflexion et réfraction d'une onde plane par un changement de célérité à une interface.

La loi de Snell-Descartes appliquée à un empilement de strates isocélères, d'indices $i = 1,2\ldots$ devient :

$$\frac{\sin \theta_i}{c_i} = \frac{\sin \theta_{i+1}}{c_{i+1}} \ ;$$

elle permet de décrire le comportement d'une onde se propageant dans un milieu à célérité non constante, selon une coordonnée z : la relation de réfraction se généralise en :

$$\frac{\sin \theta(z)}{c(z)} = cte$$

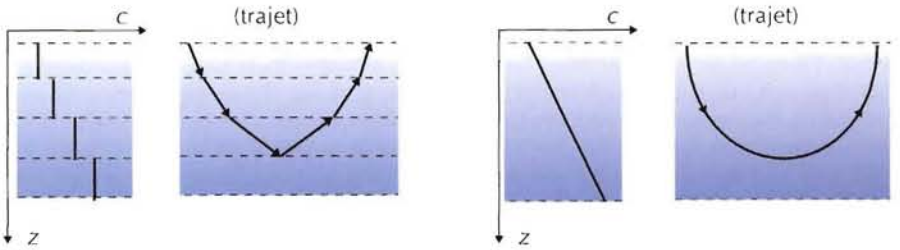


Figure 11 - Réfraction d'une onde par un changement de célérité discontinu (à gauche) et continu (à droite).

Un changement progressif de la célérité du milieu de propagation provoque donc une déviation de la direction initiale de l'onde : l'orientation du vecteur d'onde est fonction de la célérité locale. Si le gradient de célérité est vertical (ce qui est le cas le plus courant), une augmentation de la célérité tend à réfracter l'onde vers l'horizontale. Si la célérité augmente suffisamment, on arrive à une réfraction totale de l'onde. Une diminution de la célérité tend au contraire à augmenter l'angle de rasance de l'onde. On appelle *rayon acoustique* une onde ainsi caractérisée par sa trajectoire entre deux points.

À partir de constructions géométriques élémentaires (par exemple en utilisant le fait qu'une loi linéaire de célérité provoque une trajectoire circulaire du rayon) on peut construire les trajets sonores pour des configurations de célérité assez complexes. On appelle *champ sonore* ou *tracé de rayons* ce type de représentation, très utilisé pour l'interprétation des phénomènes acoustiques sous-marins.

Toutes ces caractéristiques du champ acoustique sont d'une grande importance d'une part pour leur exploitation tactique en guerre sous-marine, et d'autre part en océanographie physique où des méthodes existent pour remonter de la structure du champ acoustique aux caractéristiques du milieu.

Exploitation des champs sonores

Sans entrer dans les détails, on retiendra que dans une strate affectée d'un gradient linéaire de célérité $g = \frac{dc}{dz}$, un rayon d'angle d'incidence θ à l'entrée dans la strate (fig. 11) subit une réfraction de trajectoire en arc de cercle, dont le rayon de courbure est donné par $\rho_c = \frac{c}{g \sin \theta}$ où c est la célérité au point de la trajectoire correspondant à l'angle θ ; on voit apparaître dans cette formule l'invariant de Snell-Descartes. La généralisation à des lois de célérité plus complexes peut être effectuée en raccordant entre elles des strates élémentaires de gradients constants ; ceci permet de tracer les trajectoires des ondes sonores pour des conditions de célérité quelconques. On notera par ailleurs que, au-delà du simple tracé des trajectoires, la *méthode des rayons* permet d'accéder à l'intensité acoustique transmise (la perte par divergence est estimée en calculant l'écartement entre deux rayons voisins) et aux temps de trajets (par intégration le long des trajectoires).

Les phénomènes de réfraction par le profil de célérité conditionnent largement la propagation acoustique à grandes distances. La figure 8 donne un exemple de trajets sonores dans une lame d'eau à célérité constante (trajets rectilignes) ; la figure 12 présente des champs sonores pour des milieux

à célérité variable (trajets incurvés). Le premier cas est celui d'une augmentation de célérité depuis la surface vers le fond (chenal de surface ou profil de célérité hivernal dans un bassin océanique fermé). Les trajets les plus horizontaux sont totalement réfractés vers le haut, et se propagent par réflexions successives sur la surface ; on peut montrer qu'ils sont d'autant plus lents qu'ils sont proches de l'horizontale, car leur faible longueur curviligne ne suffit alors pas à compenser le fait qu'ils se propagent dans des couches à faible célérité. Bien que ce profil de célérité soit très simple, on constate qu'il provoque une nette complication de la structure du champ sonore par rapport au cas isocélère.

Les deux exemples suivants correspondent à une bathycélérimétrie comportant un minimum autour de l'immersion 1 000 m ; ce type de profil à chenal profond est rencontré dans la majorité des grands bassins océaniques. Lorsque la source est proche de la surface, on voit apparaître un mode d'insonification très inhomogène, laissant de larges zones non atteintes par les signaux émis *(zones d'ombre)* séparées par des zones d'insonification intense (*zones de convergence*). L'intérieur des zones d'ombres ne peut être insonifié que par réflexion sur le fond, ce qui est énergétiquement moins favorable qu'un trajet direct ; inversement à l'intérieur des zones de convergence la détection d'une source est très favorisée.

Lorsque la source est placée au voisinage du minimum de célérité, on constate une forte concentration d'énergie au voisinage de l'axe du chenal profond : les trajets partant de la source sont réfractés successivement par les deux gradients constituant le chenal, et se propagent par alternance de ces réfractions. Ce type de propagation, dit *SOFAR* (pour *Sound Fixing And Ranging*), permet d'obtenir des portées extrêmement importantes : du fait de l'absence de pertes d'énergie par réflexion aux interfaces d'une part, et de la concentration d'un grand nombre de trajets multiples d'autre part, la perte par divergence géométrique est minimisée, et la seule limitation est celle imposée par l'amortissement dans l'eau ; en utilisant des fréquences assez basses pour rendre ce dernier négligeable, des portées de plusieurs milliers de kilomètres peuvent être obtenues. Découvert pendant la Seconde Guerre mondiale et utilisé depuis pour des opérations de localisation à très grandes distances, ce remarquable phénomène de propagation est aujourd'hui exploité pour des expérimentations d'océanographie acoustique faisant appel à des transmissions de signaux destinés à évaluer les variations de la célérité sonore à l'échelle de bassins océaniques (voir chap. IV, Océanographie physique).

Résolution de l'équation d'onde

La simplicité des solutions élémentaires présentées dans les paragraphes ci-dessus (onde sphérique, réfraction d'ondes planes) ne doit pas occulter le fait que la résolution de l'équation de Helmholtz dans le cas général est l'un des problèmes théoriques essentiels de la propagation acoustique sous-marine. Le problème est de formaliser des solutions répondant à l'équation différentielle dans le cas d'un champ de célérité variant avec les coordonnées d'espace $c\ (x, y, z)$ et en présence de conditions aux limites imposées par les interfaces (surface et fond de la mer). Posé dans sa généralité, le problème est extrêmement complexe ; un certain nombre d'hypothèses vont permettre d'obtenir des solutions particulières exploitables pratiquement.

En hautes fréquences (pour que les caractéristiques du milieu ne varient pas significativement à l'échelle de la longueur d'onde), on peut transformer l'équation de Helmholtz en une forme approchée (dite *équation iconale*) qui permet d'éliminer la dépendance fréquentielle et de décrire dans l'espace les trajectoires des rayons sonores (par analogie avec les rayons lumineux considérés en optique) dont le comportement suit les variations locales de la célérité ; on en a donné une ébauche de description ci-dessus en présentant la réfraction et les champs sonores. Pratiquement, on commence par effectuer un calcul de champ sonore, par des tirs de rayons au départ de la source en balayant l'espace avec un pas angulaire suffisamment fin ; pour déterminer le champ en un point récepteur donné, on recherche par interpolation les trajets passant par ce point, et on en évalue alors les caractéristiques complètes (perte et retard de propagation). La méthode géométrique est très performante pour l'étude de la propagation de signaux à spectre large, et particulièrement

pour la modélisation des temps de propagation. Du fait de son caractère physiquement intuitif, et de ses facilités pratiques de mise en œuvre, on la trouve utilisée très largement dans toutes les applications de l'ASM mettant en jeu des calculs précis de relations temps-distances (mesures de bathymétrie, tomographie acoustique océanique).

Pour des signaux permanents en basses fréquences et à spectre étroit, on utilise de préférence, pour le calcul des champs sonores, une des différentes méthodes ondulatoires :

- la *décomposition modale* du champ est possible lorsque la célérité ne dépend que de la seule immersion z ; on peut alors séparer l'équation d'onde en deux équations distinctes, l'une décrivant la propagation dans le plan horizontal, et l'autre traduisant le comportement du champ en fonction de l'immersion et des limitations par les réflexions sur la surface et sur le fond ; on fait apparaître que ce dernier phénomène résume la structure utile du champ acoustique en quelques modes de résonance (leur nombre dépend du rapport entre la hauteur d'eau et la longueur d'onde du signal) qui contiennent l'essentiel de l'énergie du champ. La solution s'écrit alors comme la somme des contributions de ces modes, plus ou moins excités par la source considérée ;
- *l'approximation de l'équation parabolique* permet de traiter le cas où une variation de la célérité en distance s'ajoute à celle en immersion ; si cette variation latérale reste faible, on montre que l'équation différentielle de Helmholtz se ramène alors à une équation approchée en r et z, de type dit parabolique, qui est résolue numériquement de proche en proche en fonction de la distance horizontale à partir d'une valeur initiale du champ créé près de la source. Permettant de traiter des milieux plus réalistes qu'avec l'hypothèse de stratification, cette méthode a connu un large développement dans les années quatre-vingt ;
- il existe enfin des méthodes de résolution directe de l'équation d'onde par des procédés numériques. Dans le cas d'un milieu stratifié, on peut montrer que le champ acoustique peut s'exprimer comme une transformée de Fourier-Bessel de la fonction de Green décrivant le comportement en z, et calculer numériquement cette transformée. On peut aussi, en très basses fréquences, effectuer des calculs du champ acoustique par éléments finis, où le milieu de propagation est discrétisé selon un maillage dont tous les points ont des mouvements élémentaires liés par des relations de continuité issues des lois fondamentales de la mécanique. L'emploi de ces dernières méthodes reste très minoritaire.

On présente en figure 13 une série d'exemples d'applications d'une méthode ondulatoire. Il s'agit des mêmes configurations que celles de la figure 12, mais traitées ici par la méthode modale pour une fréquence de 50 Hz. Le niveau de pression acoustique peut être calculé de manière très précise, et les présentations graphiques ainsi obtenues sont toujours très spectaculaires ; elles font apparaître à la fois les effets de réfraction par le profil de célérité (qui s'interprètent comme dans le cas du tracé de rayons) et les franges d'interférences provoquées par la sommation des différentes composantes modales du champ (ce dernier effet étant spécifique au caractère monochromatique du signal considéré). Dans la pratique, toutefois, ces calculs ondulatoires restent très spécialisés et ne sont utilisés pratiquement que pour des types de signaux particuliers (essentiellement les raies spectrales exploitées en sonar militaire passif), ou comme solutions théoriques de référence.

Que l'on considère des descriptions géométriques ou aléatoires, la modélisation doit dans tous les cas être complétée par la prise en compte du caractère fluctuant et aléatoire des caractéristiques du milieu de propagation, qui amène à considérer le champ acoustique résultant de manière statistique et à bâtir des modèles en conséquence. Les principaux phénomènes physiques aléatoires à prendre en compte dans les modèles de propagation sont les fluctuations de célérité autour des profils bathycélérimétriques moyens et les reliefs des interfaces.

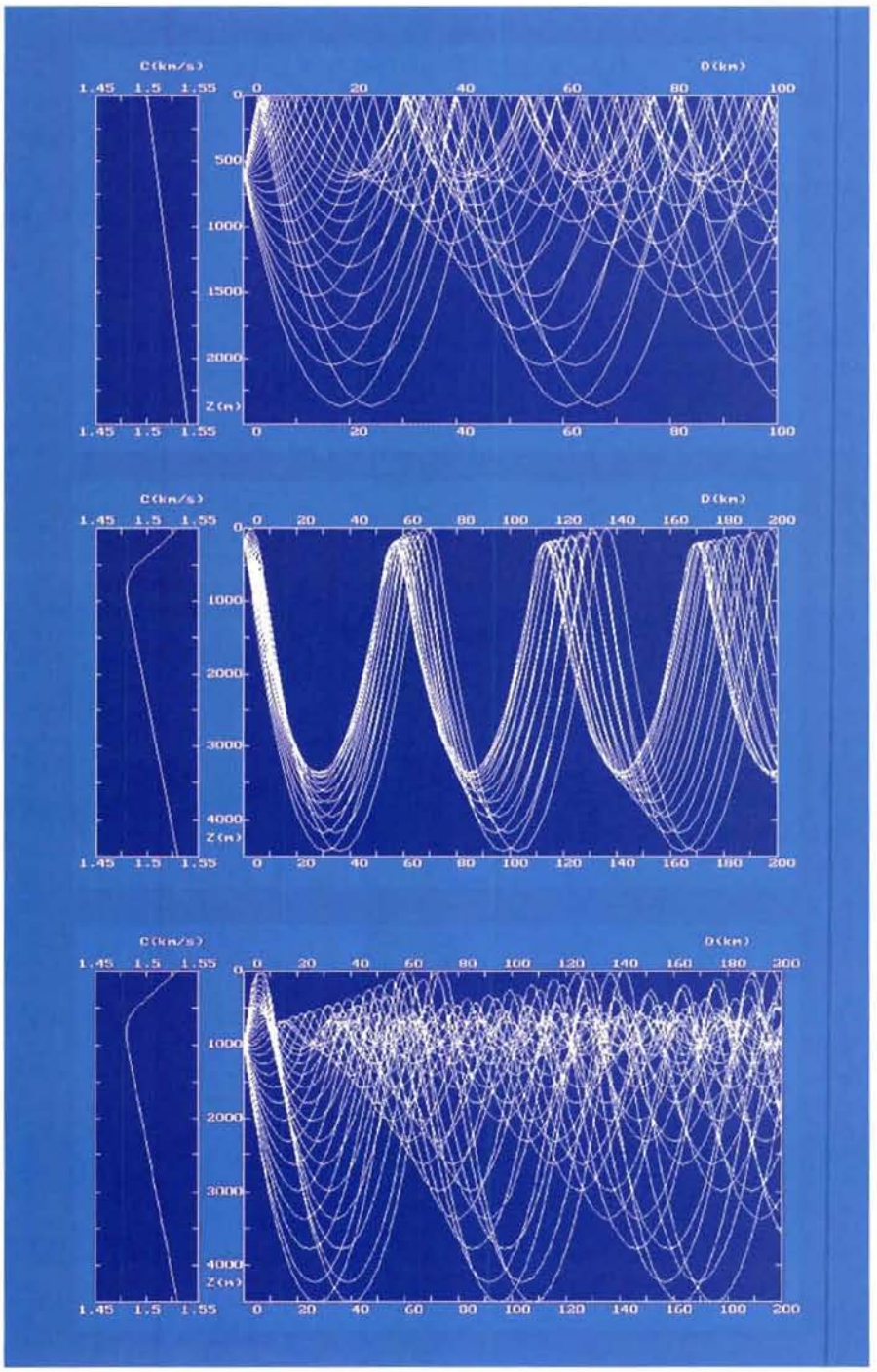


Figure 12 - Trajets de propagation des rayons sonores dans des milieux à célérité variable. A : profil isotherme ; B, C : chenal profond.

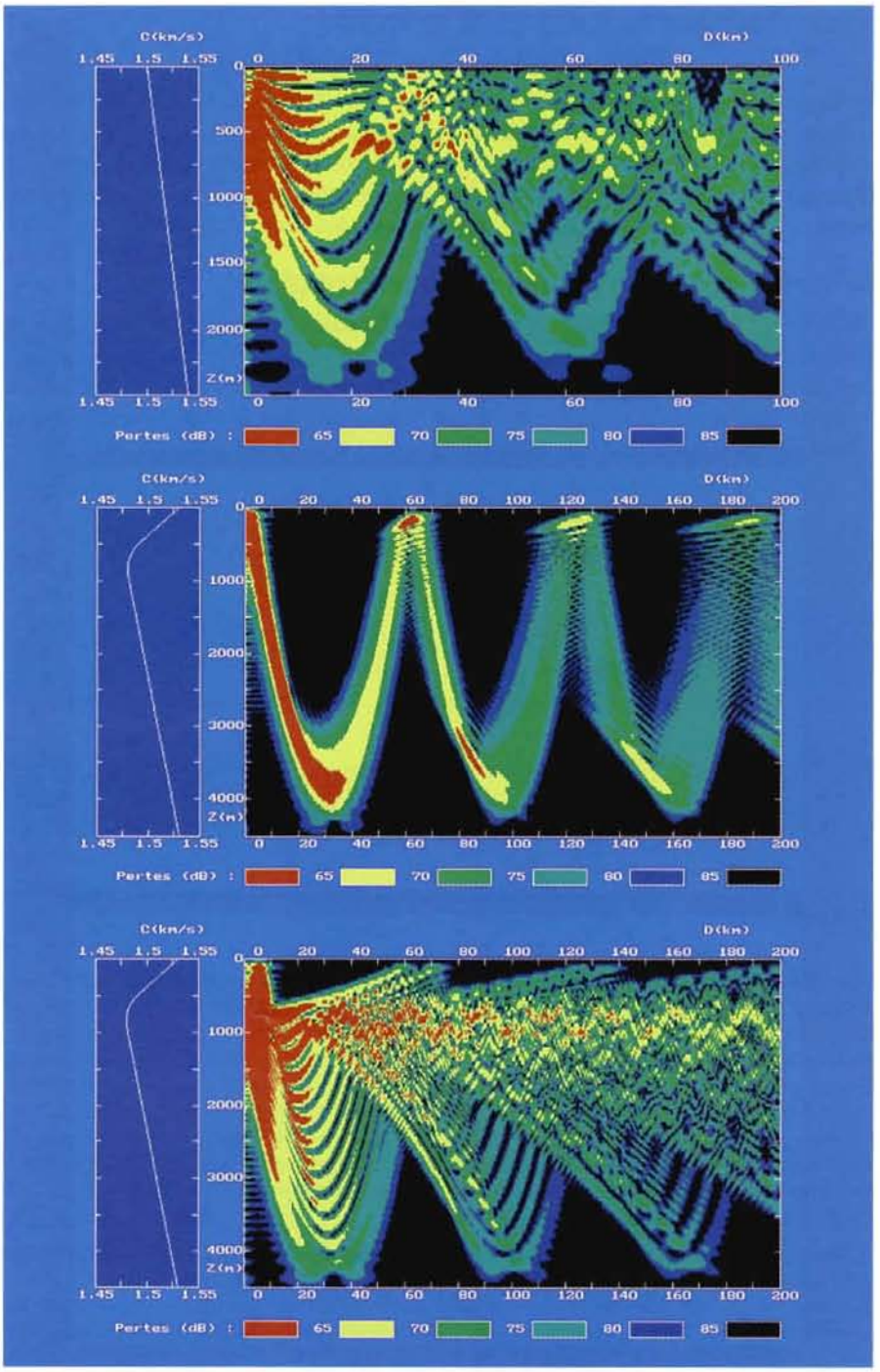


Figure 13 - Champ acoustique en basse fréquence (50 Hz) calculé par la méthode modale pour les mêmes configurations qu'en figure 12.

Réflexion par la surface et le fond

Une onde sonore venant frapper une des interfaces du milieu de propagation (surface ou fond de la mer) va subir des transformations de sa structure dues à la nature et à la géométrie de l'obstacle. Les phénomènes observés vont influencer fortement la transmission des signaux, puisque dans de nombreuses applications une grande partie de l'énergie se propage par réflexions multiples sur les interfaces.

Réflexion et transmission à une interface plane

Dans le cas idéal où l'interface considérée est parfaitement plane, alors que le second milieu a des caractéristiques acoustiques (ρ_1, c_1) différentes de celles (ρ_2, c_2) de l'eau, une partie de l'énergie de l'onde incidente va pouvoir être transmise dans le second milieu ; la conséquence est que l'onde réfléchie sera affectée d'un coefficient de réflexion de module inférieur ou égal à 1, dont l'expression est :

$$V(\theta) = \frac{\rho_2 c_2 \cos\theta_1 - \rho_1 c_1 \cos\theta_2}{\rho_2 c_2 \cos\theta_1 + \rho_1 c_1 \cos\theta_2}$$

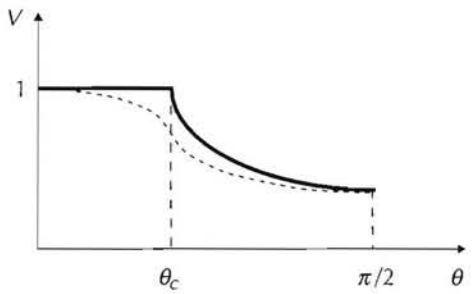


Figure 14 - Module du coefficient de réflexion à l'interface entre deux fluides (en pointillés : avec présence d'amortissement).

Si le milieu réfléchissant a une célérité supérieure à celle de l'eau, on a vu qu'il existe alors un *angle critique* θ_c = arcsin (c_1 / c_2) au-delà duquel la transmission est impossible ; le module du coefficient de réflexion vaut alors 1 (phénomène de *réflexion totale*). À l'angle critique le coefficient de réflexion diminue brutalement avec l'angle, et près de la verticale il ne dépend plus que des impédances caractéristiques des deux milieux. En présence d'amortissement dans le second milieu, les phénomènes seront légèrement modifiés ; en particulier le coefficient de réflexion totale sera légèrement inférieur à 1. Enfin si le milieu réfléchissant est d'impédance, soit très faible, soit très grande par rapport à celle de l'eau, l'onde incidente va se réfléchir quasiment sans perte d'énergie ; le coefficient de réflexion de l'onde (rapport des amplitudes des ondes réfléchie et incidente) sera égal à 1 ou à -1 quel que soit l'angle ; ceci se produit à l'interface entre l'eau et l'air.

Le coefficient de transmission de la pression dans le second milieu, affectant l'amplitude de l'onde réfractée, est donné par $W(\theta) = 1 + V(\theta)$. Le niveau de *pression* de l'onde transmise peut donc être supérieur à celui de l'onde incidente ! Ce résultat surprenant ne fait que traduire la continuité de pression de part et d'autre de l'interface, et ne viole en rien la loi de conservation de l'énergie : on peut facilement montrer que *l'intensité* incidente est bien égale à la somme des intensités réfléchies et transmises.

Cas d'une interface rugueuse

On considère maintenant le cas où l'interface est *rugueuse*, c'est-à-dire présente un relief notable comparé à la longueur d'onde acoustique. À l'interface eau-air, ce relief est celui des diverses vagues (de gravité, de capillarité) provoquées par le vent ; sur le fond il s'agit de celui des constituants minéraux (interfaces rocheuses tourmentées, ou ridules de sable ou de vase). Les phénomènes sont alors très complexes en fonction de la fréquence, de l'incidence de l'onde, et des caractéristiques du relief. De manière générale, les irrégularités d'interface, du fait de leur géométrie, vont renvoyer l'onde incidente dans toutes les directions ; c'est le phénomène de *diffusion*. Toutefois, une partie de l'onde incidente est réfléchie, sans déformation mais avec perte d'amplitude, dans la direction spéculaire (c'est la partie dite *cohérente* du signal), le reste étant diffusé (de manière *incohérente*) dans tout l'espace, y compris vers la source ; le rapport de ces deux composantes dépend de la *rugosité* de la surface, c'est-à-dire du rapport entre la dimension caractéristique de celui-ci et la longueur d'onde du signal.

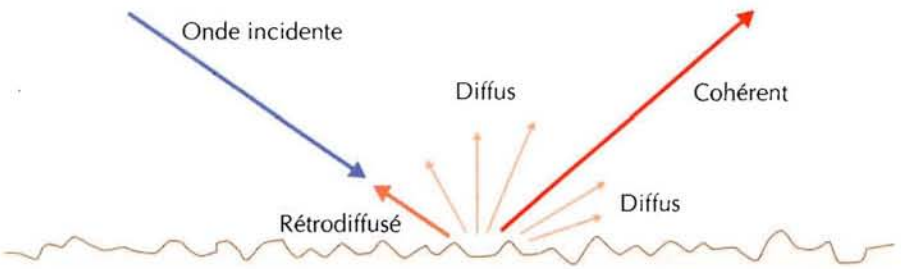


Figure 15 - Réflexion cohérente et diffusion par une surface rugueuse.

Signal cohérent

La partie *cohérente* du signal réfléchi peut être approchée par le coefficient de réflexion en pression $V_c = V \exp(-2\, k^2\, \sigma^2 \cos^2 \theta)$, où V est le coefficient de réflexion sur l'interface plane, σ est l'écart-type du relief, et θ l'angle d'incidence. Le produit $k\sigma\cos\theta$ est appelé *paramètre de Rayleigh*, et traduit la *rugosité* de l'interface. La partie cohérente du signal diminue, et la partie diffuse augmente, lorsque le paramètre de Rayleigh augmente (grandes valeurs de la fréquence, du relief et de l'angle de rasance). Ce modèle est valable lorsque le paramètre de Rayleigh est petit (< 1).

Signal diffus

Le signal diffus est très dépendant des dimensions du problème (angle, rugosité) ; il n'en existe pas de modélisation générale, et on doit utiliser différentes approximations selon la configuration considérée. Les modèles approchés courants sont valides, soit pour une faible rugosité (méthode des *petites perturbations*), soit au contraire lorsque la longueur d'onde est faible devant les dimensions caractéristiques du relief (méthode du *plan tangent*). Dans la pratique, c'est surtout l'expression du *champ rétrodiffusé* qu'il est intéressant d'étudier, en raison de son exploitation dans les systèmes de cartographie acoustique.

Réflexion par la surface de la mer

L'interface entre l'eau et l'air constitue une condition parfaite de réflexion dans la mesure où le contraste d'impédance entre les deux milieux est très marqué. Si la surface est suffisamment plane, le coefficient de réflexion vaut alors -1. Dans le cas contraire, où la rugosité doit être prise en compte, les modèles de réflexion cohérente et de champ diffus peuvent s'appliquer directement.

Le mouvement de la surface de la mer va se traduire par une *modulation* du signal renvoyé par l'interface, reproduisant le spectre de ce mouvement. Cette modulation est de peu d'importance pratique.

Il est à noter que la couche de bulles située immédiatement sous la surface peut provoquer un masquage de cette dernière et vient compliquer fortement l'observation des phénomènes.

Réflexion par le fond

L'influence du fond de la mer est beaucoup plus complexe que celle de la surface ; de nombreux phénomènes sont présents simultanément :

- diffusion par le relief de l'interface eau-fond (fig. 16) ;
- pénétration de l'onde incidente dans le sédiment, en raison du faible contraste d'impédances entre l'eau et le sédiment ;
- amortissement dans le sédiment, beaucoup plus fort que dans l'eau (de 0,1 à 1 dB par longueur d'onde) ;
- réfractions et réflexions dans le sédiment, qui présente lui aussi un profil bathycélérimétrique comportant des discontinuités dues à la stratification ;
- présence de diffuseurs divers à l'interface et d'inhomogénéités dans le sédiment ;
- présence d'un socle rocheux sous-jacent.

Les phénomènes rencontrés et les difficultés d'interprétation et de modélisation sont très différents selon les fréquences considérées. Aux hautes fréquences, où la pénétration est faible, le problème est en général analogue à celui de la surface (réflexion sur une interface non plane) avec des complications dues à la nature du sédiment. Si l'interaction reste très superficielle (fréquences de dizaines de kHz et au delà) et la structure du fond assez simple, on peut décrire correctement les phénomènes par une combinaison d'un modèle de réflexion d'interface plane entre deux milieux, conjugué à un modèle d'influence du relief.

Aux basses fréquences (inférieures à quelques kHz) il est nécessaire de modéliser l'interaction de l'onde avec la couche sédimentaire, d'autant plus profondément que la fréquence est basse ; les phénomènes significatifs ne sont plus alors les irrégularités de relief et les petites inhomogénéités du milieu, mais les profils de célérité/densité et surtout leurs discontinuités dont le comportement acoustique très marqué est largement utilisé en géologie marine et géophysique (mesures sismiques, sondeurs de sédiments...). Pratiquement il se produit soit des réflexions de l'énergie

acoustique aux interfaces entre strates, soit une réfraction par le profil de célérité dans le sédiment de manière analogue à ce qui se passe dans l'eau ; le comportement de l'onde réfléchie peut s'en trouver très fortement affecté.

Aux incidences très rasantes et en basses fréquences, on peut observer des *ondes d'interface* se propageant aux limites entre des strates de caractéristiques différentes. De natures diverses selon les caractéristiques physiques des strates sédimentaires, ces ondes (dites de Rayleigh, de Love, de Scholte...) sont exploitées dans les méthodes de sismique-réfraction mises en œuvre en géologie et en géophysique.

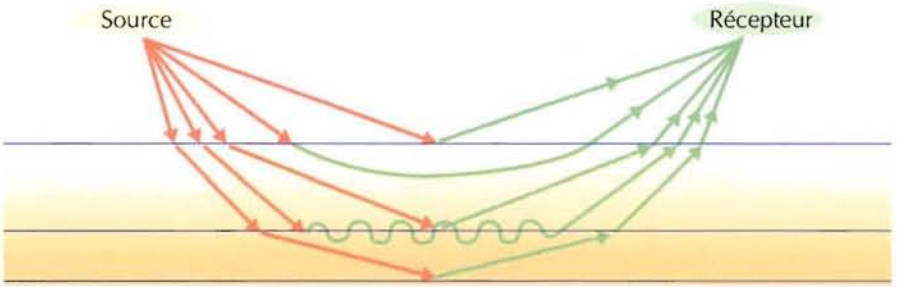


Figure 16 - Réflexion, réfraction et onde d'interface dans un fond sédimentaire stratifié.

Rétrodiffusion des ondes par une cible

Échos de cible, rétrodiffusion et réverbération

La majorité des systèmes ASM est destinée à recevoir les signaux renvoyés par des *cibles*. Ces dernières sont de nature et de structure très variées : fond de la mer en incidence soit verticale (sondeurs monofaisceaux), soit oblique (sondeurs multifaisceaux) soit rasante (sonars latéraux), poissons isolés ou en bancs, sous-marins, objets posés sur le fond ou enfouis (épaves, mines, pipelines...). L'onde acoustique est diffusée par la cible dans toutes les directions de l'espace, et en particulier une partie de l'énergie est renvoyée (rétrodiffusée) vers l'émetteur ; la cible agit donc comme une *source secondaire* qui réémet l'onde acoustique. *L'indice de cible* traduit le rapport entre l'intensité réémise par la cible vers la source et l'intensité incidente ; l'intensité *ER* de l'écho reçu par le sonar après rétrodiffusion est (en dB) $ER = NE - 2\ PT + IC$, où *NE* est le niveau émis par la source, *PT* la perte de transmission (comptée deux fois du fait de l'aller-retour) et *IC* l'indice de cible.

Certaines cibles se comportent de manière ponctuelle, c'est-à-dire que leur indice ne dépend pas de la distance au système ou des caractéristiques de ce dernier. C'est le cas des cibles d'assez faibles dimensions pour pouvoir être insonifiées globalement par le faisceau acoustique (poissons isolés, par exemple). D'autres cibles, de taille étendue, ont un indice de cible dépendant de leur interception par le faisceau sonore (bancs de poisson, ou fond de la mer). L'indice n'est plus alors une notion ponctuelle, mais fait intervenir la *portion de cible insonifiée* (surface ou volume) associée à un coefficient surfacique ou volumique. Ce dernier coefficient (*indice surfacique ou volumique de*

rétrodiffusion) traduit donc la quantité d'énergie diffusée par un « élément réverbérant unitaire » (de surface ou de volume) et exprimé en dB/m^2 ou dB/m^3. L'indice de rétrodiffusion a une dépendance angulaire et fréquentielle caractéristique des phénomènes de diffusion considérés.

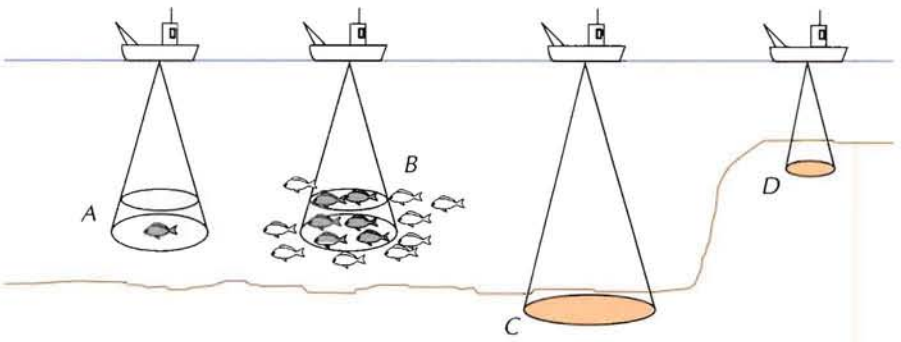


Figure 17 - Cibles ponctuelles (A) et étendues (B, C, D).

Réverbération

On appelle conventionnellement *réverbération*, en acoustique sous-marine, tout retour d'énergie vers le système sonar autrement que par rétrodiffusion sur la cible choisie ; c'est l'ensemble des phénomènes d'échos multiples parasites venant brouiller la réception du signal utile attendu. On distingue conventionnellement les effets de *réverbération de surface et de fond* (effets surfaciques dus à la rétrodiffusion de l'énergie sonore par le relief des interfaces) et ceux de la *réverbération de volume* (effets volumiques dus à la rétrodiffusion sur des poissons, du plancton, des particules en suspension ou des nuages de bulles).

Il apparaît évidemment que la distinction entre écho de cible et réverbération est arbitraire et dépend du type de système considéré. Pour un sonar militaire de détection active, est réverbération « nuisible » tout ce qui n'est pas écho de sous-marin, par exemple la rétrodiffusion par la surface et le fond de la mer. Par contre, un sonar latéral de cartographie ne travaille que sur des signaux rétrodiffusés par le relief et les obstacles du fond ; il est gêné par la rétrodiffusion de la surface et par celle due, dans la masse d'eau, aux bancs de poissons ou au plancton. Tandis qu'un sondeur de pêche est justement destiné à détecter ces derniers, etc.

Notion d'indice de cible

L'indice de cible *IC* (souvent noté *TS*, pour *Target Strength*) exprime le rapport (en décibels) entre l'intensité acoustique interceptée par la cible et l'intensité réémise par cette dernière :

$$IC = 10 \log \left(\frac{I_r}{I_i}\right)$$

où I_i est l'intensité de l'onde incidente sur la cible, supposée localement plane, et I_r est l'intensité de l'onde réfléchie, supposée sphérique à partir du centre acoustique de la cible et ramenée à 1 m de ce centre. *IC* traduit la quantité d'énergie acoustique renvoyée par la cible vers le sonar, et dépend donc de la nature de la cible (matériau), de sa structure externe et interne, et des caractéristiques du signal incident (angle et fréquence).

Section efficace de diffusion

Plus précisément, le rapport de l'intensité incidente I_i d'angle θ_i sur une cible et de l'intensité diffusée I_d dans une direction donnée θ_d est appelé *section efficace de diffusion* de la cible pour ces directions, et fait intervenir :

• la *section apparente* $A(\theta_i)$ de la cible telle que « vue » depuis la source, autrement dit la quantité d'énergie interceptée (géométriquement) par la cible ;

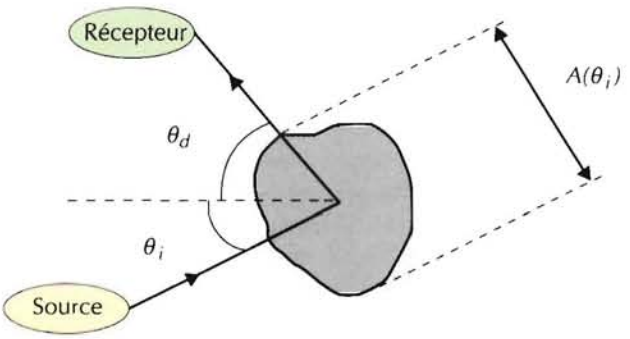


Figure 18 - Géométrie de la diffusion par une cible.

• la *fonction de diffusion* $G(\theta_i, \theta_d)$ de la cible, qui décrit le rayonnement du champ diffusé, autrement dit la répartition spatiale de l'énergie interceptée et réémise par la cible ; cette fonction dépend de la structure de la cible, et des directions d'incidence et d'observation.

L'expression de la *section efficace de diffusion* est $\sigma_d(\theta_i, \theta_d) = A(\theta_i)G(\theta_i, \theta_d)$. La section efficace de rétrodiffusion de la cible est calculée dans la direction du retour vers la source : $\sigma_r(\theta_i) = A(\theta_i)G(\theta_i, \theta_i)$. Finalement, l'indice de cible est la valeur en dB de la section efficace de rétrodiffusion $IC = 10 \log \sigma_r(\theta_i)$.

Échos de sous-marins

Les sous-marins provoquent des échos sonars correspondant à plusieurs types d'interaction onde-structure :

• *échos spéculaires* sur des surfaces quasi planes (flancs de coque ou de kiosque) ;

• échos sur des obstacles situés à l'intérieur de la coque externe ; en effet le contraste d'impédance entre l'eau et le métal n'est pas suffisant pour empêcher l'onde de traverser la coque ;

• *diffraction* sur des points anguleux (ailerons, safran, propulsion...) ;

• excitation de *modes de résonances propres* de la structure.

Ces différents effets, évidemment indésirables du point de vue des sous-mariniers, sont combattus en optimisant la forme et la structure des submersibles, et en utilisant des *revêtements anéchoïques* ; ceux-ci sont d'autant moins efficaces que la fréquence est basse, d'où le développement des techniques de sonar actif très basses fréquences (TBF).

Les différents éléments constituant l'écho global d'un sous-marin peuvent (en principe) être identifiés expérimentalement sous forme de *points brillants* à condition d'utiliser des signaux de résolution suffisante ; la structure de ces points brillants peut être exploitée pour caractériser la cible. Dans le cas d'impulsions longues, le mélange des contributions des points brillants provoque un signal complexe et instable. L'ordre de grandeur des indices de cibles globaux de sous-marins va de 0 à +20 dB, mais des variations très importantes sont rencontrées en fonction du type de submersible, de la fréquence, et de l'angle de visée.

Échos de poissons

Dans la diffusion des ondes acoustiques par les poissons, la contribution principale est due à la *vessie natatoire*, poche d'air de dimensions variables dont sont dotées de nombreuses espèces et qui leur permet d'ajuster leur flottabilité ; cet organe, présentant une forte discontinuité d'impédance avec l'eau et les tissus du poisson, se comporte soit comme un résonateur dans la gamme du kHz, soit comme un réflecteur aux fréquences élevées. Les autres contributions à l'écho sont dues à la colonne vertébrale et à la masse musculaire ; toutefois, l'impédance de ces constituants étant proche de celle de l'eau, leur contribution n'est pas très notable.

Les poissons ont des valeurs d'indice de cible assez faibles (de l'ordre de - 40 à - 50 dB, augmentant avec leur longueur) pour les fréquences habituelles des sondeurs de pêche (30 à 400 kHz). Toutefois, aux fréquences proches de la résonance de la vessie natatoire (de l'ordre de 1 à 5 kHz), l'indice de cible peut être de l'ordre de - 30 dB. Les échos observés sont en général de caractère très fluctuant ; ils ne peuvent être modélisés effectivement que de manière statistique ; dans la pratique des modèles prédictifs semi-empiriques sont donc le plus souvent employés. La connaissance précise de l'ordre de grandeur de l'indice de cible des poissons est importante dans la mesure où elle est utilisée pour estimer, à partir de l'énergie totale mesurée, le nombre d'individus présents dans un banc.

Rétrodiffusion par des cibles étendues

Certaines cibles sont délimitées dans l'espace par les caractéristiques du sonar plutôt que par leurs dimensions propres (fig. 17) ; c'est notamment le cas du fond de la mer ou des bancs de poissons d'extension suffisante. Dans ce cas, l'indice de cible doit être décomposé en deux termes :

- la *taille effective de la cible* vue par le sonar (surface ou volume) ;
- *l'indice surfacique ou volumique de rétrodiffusion* correspondant.

La section efficace de rétrodiffusion est donc $\sigma_r = A_r I_{S,V}$ où A_r est la taille effective de la surface ou du volume diffusant, et $I_{S,V}$ l'indice de rétrodiffusion surfacique ou volumique.

Détermination de l'élément diffusant

Considérons que le système sonar a émis un signal pendant l'intervalle de temps [0, T]. À l'instant d'observation $t > T$ le signal rétrodiffusé est donc produit par l'ensemble des parties de la cible situées à des distances R telles que $t - T < \tau(R) < t$, où $\tau(R)$ est le temps de parcours aller-retour correspondant à la distance R. Le modèle de propagation utilisé permet de relier τ et R ; pratiquement on peut souvent se contenter de relations simples du type $\tau = 2R/c$ pour une première approche. La surface ou le volume insonifié seront donc définis par la double inégalité ci-dessus, en tenant compte de la directivité spatiale du système.

Indice surfacique de rétrodiffusion

Le champ rétrodiffusé par la surface ou le fond de la mer fait intervenir l'*indice de rétrodiffusion IF* de l'interface considérée : cet indice traduit la quantité d'énergie diffusée dans une direction donnée, par l'unité de surface (1 m^2) à 1 m de celle-ci, et rapportée à l'énergie incidente. Aux rasances moyennes et faibles, l'indice de rétrodiffusion peut souvent être approché de manière théoriquement et pratiquement satisfaisante par des formules de la forme $I_i = I_{i0} \cos^{\beta} \theta$ (soit en dB : $IF = IF_0 + 10\beta \log \cos\theta$) où l'exposant β prend des valeurs comprises entre 1 et 2. La forme suivante, connue sous le nom de *loi de Lambert*, est la plus couramment utilisée :

$$I_i = I_{i0} \cos^2 \theta \text{ ou en dB } IF = IF_0 + 20 \log \cos\theta.$$

Rétrodiffusion volumique : bancs de poissons

L'écho renvoyé par le volume unitaire d'un banc de poissons est calculable en première approximation en corrigeant l'indice de cible d'un poisson isolé par la densité N de poissons par mètre cube :

$$IV_{banc} = IC_{poisson} + 10 \log N \text{ (en dB/m}^3\text{)}.$$

Cette description, qui fait donc l'hypothèse de la sommation énergétique des contributions des différents individus, est à la base de la méthode *d'écho-intégration* pour l'évaluation des stocks de poissons en bancs. La population de poissons présente dans une zone est estimée à partir de l'énergie totale rétrodiffusée, mesurée au sondeur et corrigée de l'indice de cible individuel moyen. Sa validité implique que l'on néglige :

- la contribution de l'énergie rétrodiffusée après diffusion multiple à l'intérieur du banc ;
- l'effet de masquage des poissons entre eux,

approximations valables si le banc n'est pas trop dense.

Rétrodiffusion par le fond de la mer

Aux fréquences utilisées par les systèmes détectant des échos du fond (dizaines et centaines de kHz pour les sondeurs et les sonars latéraux) on peut en général séparer le phénomène de rétrodiffusion en deux contributions. Une première partie de l'énergie, en général prédominante, est diffusée par le relief de l'interface eau-fond : soit de larges facettes qui renvoient un écho de type spéculaire et influent surtout près de la verticale ; soit le microrelief qui intervient aux incidences rasantes. Une autre partie du signal pénètre à l'intérieur du sédiment et est rétrodiffusée par les inhomogénéités contenues dans le volume sédimentaire (inclusions minérales ou d'origine biologique, bulles de gaz, stratification) ; ce dernier phénomène est souvent prépondérant aux incidences obliques.

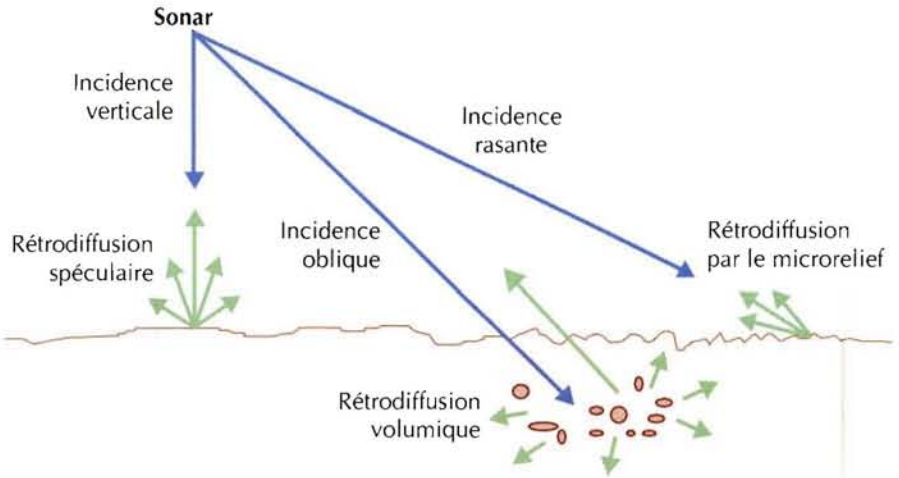


Figure 19 - Phénomènes de rétrodiffusion par le fond aux fréquences des sondeurs

Du point de vue de la modélisation, la rétrodiffusion d'interface peut être décrite à partir d'un modèle géométrique statistique de diffusion par une interface rugueuse, couplé au coefficient de réflexion caractéristique des deux milieux. L'effet de volume fait intervenir, outre les caractéristiques de transmission eau-sédiment et l'atténuation dans le fond, des distributions de fluctuations de célérité et de densité dont l'évaluation est toujours problématique. Pour accroître la complexité, on doit tenir compte éventuellement, en fonction de la fréquence considérée, de la structure du sédiment (profils de célérité et de densité, voire discontinuités de stratification...). On aboutit évidemment à des modélisations très compliquées, mais l'interprétation fine de la réponse acoustique du fond, pour l'estimation des caractéristiques de ce dernier, est à ce prix ; dans beaucoup de cas les échos obtenus par un sondeur sont les seules données expérimentales facilement accessibles.

Bruit ambiant

Le milieu sous-marin constitue un environnement acoustique relativement bruyant, en raison du grand nombre de bruiteurs présents et de la facilité de propagation des ondes sonores générées. Le *bruit ambiant* est, par définition, ce qui est perçu par un système acoustique en l'absence de signal utile et de bruit généré par son porteur. Ce « fond sonore » parasite est dû à plusieurs phénomènes physiques bien distincts, correspondant chacun à des gammes de fréquences particulières :

• le bruit de *trafic maritime* est très sensible entre 10 Hz et 1 kHz. Son niveau est évidemment dépendant de la zone considérée, et les modèles qui le paramètrent par une densité de trafic, ont surtout une valeur indicative. La présence de ports et de « rails » de trafic est évidemment un facteur de variation locale très important, et aussi d'anisotropie spatiale dans la structure angulaire du bruit. Les bruits produits par des navires isolés sur la zone de couverture d'un système sonar ne sont pas forcément inclus dans le bruit ambiant de trafic et se comportent plutôt en brouilleurs ponctuels ;

• l'*agitation de surface*, fonction de l'état de mer et donc de la vitesse du vent, est responsable du bruit ambiant sur la plus grande partie de la gamme de fréquences utiles en sonar, de quelques centaines de hertz à quelques dizaines de kilohertz. Ce bruit est provoqué par l'éclatement des bulles d'air créées par les mouvements de la surface ;
• la *pluie* peut provoquer un bruit de niveau très élevé, dans la même gamme de fréquence que le bruit de mer, dû à l'impact des gouttes d'eau sur la surface ;
• les *cétacés, crustacés, poissons* et autres organismes vivant dans la mer peuvent également être source de bruits notables, même s'ils sont très localisés ;
• le *bruit thermique* d'agitation moléculaire intervient au-delà de 100 kHz.

Le tracé d'un modèle classique de bruit sous-marin ambiant (fig. 20) fait apparaître les contributions des diverses causes évoquées ci-dessus, paramétrées par le niveau de trafic et par l'état de mer

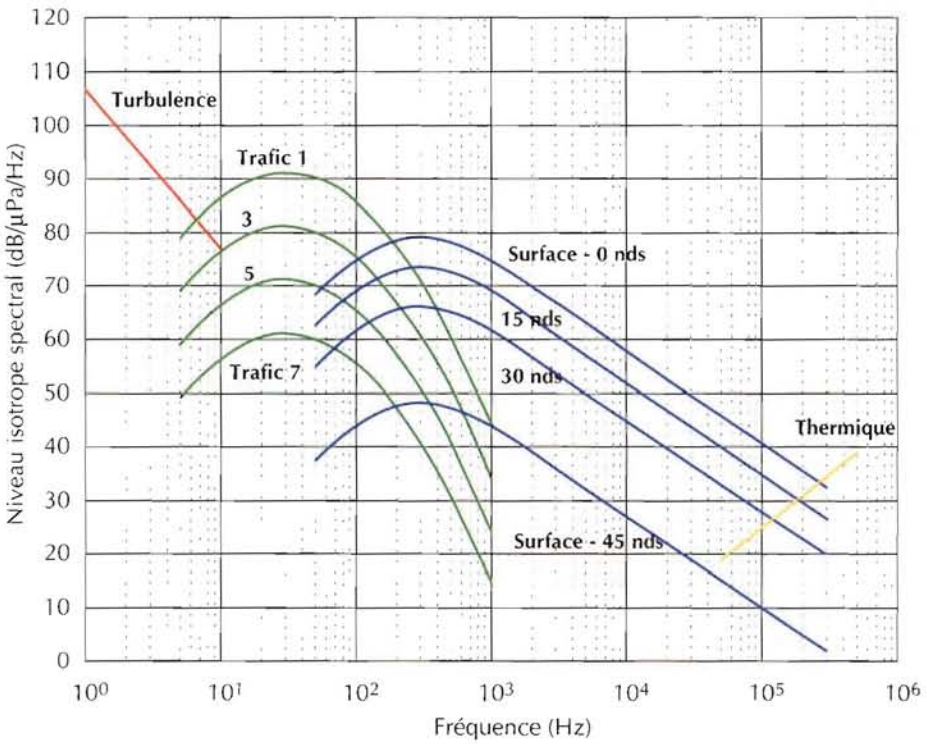


Figure 20 - Modèle de spectre de bruit ambiant.

Autres caractéristiques du bruit

On a évoqué ici uniquement le niveau énergétique moyen du bruit ambiant. En toute rigueur, d'autres aspects sont à considérer pour optimiser les systèmes ASM et les traitements de signaux associés ; on citera :
• la *fonction de densité de probabilité* : elle est en général supposée *gaussienne*, ce qui simplifie beaucoup les calculs théoriques mais n'est pas forcément réaliste ; le niveau moyen de bruit est

souvent instable, et on observe fréquemment des « pics » d'énergie causés par des bruits impulsionnels en particulier dans les environnements bruyants artificiels ;

• la *cohérence spatiale et temporelle* : c'est elle qui fixe la limite d'efficacité des antennes et des systèmes récepteurs. On fait le plus souvent l'hypothèse simplificatrice que le bruit est totalement incohérent et peut être atténué soit en l'intégrant au cours du temps, soit en sommant les signaux issus des divers capteurs d'une antenne. Dans la pratique ce n'est pas si simple ; le bruit possède une certaine cohérence spatiale et temporelle qui va diminuer les performances obtenues avec ces types de traitements.

Bruits rayonnés par les navires

La connaissance du bruit des navires et engins sous-marins est intéressante à deux niveaux en acoustique sous-marine :

• ce bruit reçu par les transducteurs du sonar (dit *bruit propre*) impose une limitation aux performances du matériel acoustique embarqué lorsque son niveau est supérieur à celui du bruit ambiant ;

• en sonar passif militaire, le bruit rayonné par la cible potentielle est, de fait, le signal que l'on cherche à détecter en l'extrayant du bruit ambiant.

Le niveau de bruit, dû au porteur du système acoustique sous-marin, peut être très notablement supérieur au bruit ambiant, surtout en ce qui concerne les navires civils (navires océanographiques non récents, bateaux de pêche ou de forage *offshore*) pour lesquels les tolérances de bruit (dues aux activités bruyantes indissociables de leur fonction) sont sans commune mesure avec celles exigées pour les navires et submersibles militaires pour lesquels la discrétion acoustique est vitale et prioritaire. On pourra donc considérer pour simplifier que les systèmes acoustiques sous-marins civils embarqués sur des navires ou des engins sous-marins sont limités essentiellement par le bruit propre de leur porteur, alors que les systèmes militaires sont souvent plutôt limités par les conditions de bruit ambiant. Bien sûr les contre-exemples abondent...

Analyse des sources de bruits de navires

Plusieurs sources peuvent intervenir dans le bruit dû à un navire :

• bruit de *propulsion* : il est rayonné par les hélices dont la rotation crée de la *cavitation* du fait des dépressions induites sur les faces des pales. Ce bruit émis dans l'eau est reçu directement sur les transducteurs des systèmes acoustiques sous-marins du navire, avec un niveau fonction de leur distance aux hélices. On peut donc le relier aux mesures de bruit rayonné effectuées (plus ou moins couramment) sur les navires concernés par les problèmes de mise en œuvre de matériel acoustique. Il dépend évidemment de la vitesse de rotation de l'hélice, de la fréquence (la décroissance moyenne est en -20 log$f$), des caractéristiques mécaniques de la propulsion (hélice à pas fixe ou variable...) et de l'immersion (les bulles de cavitation ne peuvent se former qu'en deçà d'un seuil de pression hydrostatique : les sous-marins en plongée sont donc exempts de ce problème) ;

• bruit *d'écoulement* : il est dû aux phénomènes de turbulence engendrés par l'écoulement de l'eau sur la face active du transducteur ou de son conditionnement (dôme de protection). Ce type de bruit

dépend évidemment de la vitesse du navire, de la fréquence, et de la forme et de l'implantation du carénage du transducteur ;

• bruits de *machinerie* : issus des multiples machines bruyantes installées sur un navire (moteurs, groupes électrogènes et alternateurs, centrales hydrauliques, treuils), ils se propagent vers les transducteurs soit sous forme de vibrations des structures de coque et d'aménagements intérieurs, soit par voie aérienne. Ils sont indépendants de la vitesse du navire ;

• bruits divers : certaines activités des navires civils en opérations sont très bruyantes (sismique, forage, chalutage, dragage, remorquage, mise en œuvre de submersibles...) et ne doivent pas pour autant occulter les fonctions acoustiques qui sont alors nécessaires (positionnement de navire, de submersible ou de chalut, transmission de données, sondeur de pêche...).

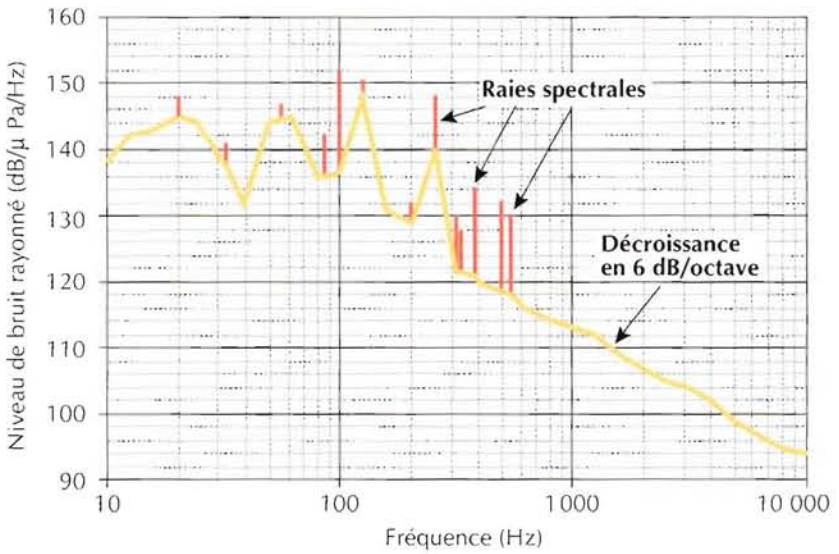


Figure 21 - Niveau de bruit rayonné par le N.O. Thalassa à la vitesse de 10 nœuds, mesuré lors de sa mise en service. Destiné à la recherche en halieutique, ce navire a fait l'objet, à sa construction, d'efforts particuliers de discrétion acoustique. Noter la présence de raies spectrales en dessous de 1 000 Hz et la décroissance typique du bruit large bande aux fréquences supérieures.

Notion de bruit propre

Le niveau de bruit propre subi par un transducteur installé sur un navire ou un engin sous-marin est produit d'une part par le bruit rayonné par le porteur et reçu directement par propagation dans l'eau, d'autre part par les vibrations transmises par la structure du navire, mais aussi par les bruits hydrodynamiques générés autour de son infrastructure, et enfin par les champs électriques parasites. Il dépend donc de paramètres nombreux et variés, intervenant de manière complexe et difficilement prévisible. Rien ne remplace dans ce domaine, pour un système donné, des mesures systématiques bien conduites. En l'absence de celles-ci, on pourra en première approche prendre le niveau de bruit rayonné par le navire, considéré comme provenant de la propulsion, et corrigé de la perte de propagation correspondante et de la directivité du transducteur bruité.

Déformations et fluctuations des signaux acoustiques sous-marins

Effet Doppler

L'effet Doppler est une modification de la fréquence d'un signal pendant la propagation, dû à une variation de la durée des trajets source-cible-récepteur pendant le temps d'émission. Il peut être causé par des mouvements du milieu de propagation (courant, houle), mais est en général surtout dû à la vitesse relative source-cible ; dans ce cas la variation de fréquence δf est donnée par (en valeur algébrique),

$$\frac{\delta f}{f_0} = \frac{2v}{c}$$

où v est la vitesse radiale (positive en rapprochement, négative sinon), f_0 la fréquence émise et c la célérité du son. L'effet Doppler complique évidemment le traitement des signaux et est surtout très gênant en communications et transmission de données. Par contre, en lutte sous-marine, sa mesure est une donnée utile en localisation de cible, voire en identification.

Pratiquement la valeur de la *variation relative de fréquence* peut être assez importante : 0,7 % pour une vitesse de 10 nœuds (18,5 km/h), ce qui est beaucoup comparé aux ordres de grandeur rencontrés en radar (0,0002 % pour un avion à 1 000 km/h, la vitesse des ondes radar étant 3.10^8 m/s). Noter que dans le cas d'une transmission simple (sans cible) la variation de fréquence Doppler ne vaut que la moitié de la valeur ci-dessus, soit $\delta f = f_0 v/c$.

Caractéristiques temporelles des échos

La durée du signal émis a une forte influence sur la forme et le niveau des signaux reçus. Le concept de cible « ponctuelle » suppose un signal suffisamment long pour pouvoir insonifier la cible en totalité à un instant donné. Des signaux longs permettent d'obtenir le maximum d'énergie instantanée en réponse ; par contre des signaux brefs rendent possible la séparation des différents constituants de l'écho global, pour distinguer par exemple des cibles proches les unes des autres.

Le signal rétrodiffusé subit un *allongement* δt qui est fonction de la longueur apparente L_a de la cible insonifiée ; cet allongement vaut

$$\delta t = \frac{2L_a}{c}$$

Il peut être tenu compte de cet allongement de l'écho dans la chaîne de traitement du récepteur en utilisant une durée d'intégration adaptée.

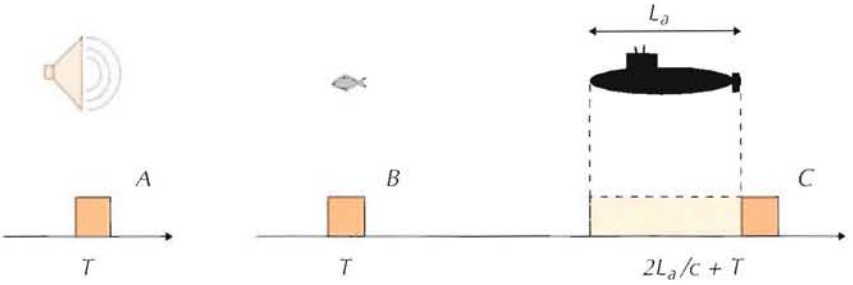


Figure 22 - Allongement d'un signal temporel - Signal émis (A) et rétrodiffusé par une cible ponctuelle (B) et étendue (C).

Fluctuations des signaux.

Les fluctuations des signaux transmis et des échos sont toujours très notables en ASM ; elles sont dues de manière générale aux interférences entre différentes composantes (points brillants diffusés par la cible, trajets multiples de propagation). Le phénomène est d'autant mieux marqué que la fréquence est élevée, et que la cible est étendue et comporte de nombreux diffuseurs (banc de poissons, fond de la mer). Ces fluctuations dégradent évidemment le fonctionnement des systèmes de détection et de mesure.

Les fluctuations des signaux peuvent être analysées soit comme *temporelles* (émetteur et récepteur restent parfaitement fixes dans un environnement variable au cours du temps) soit comme *spatiales* (émetteur et/ou récepteur/cible se déplacent dans un environnement figé). Dans la pratique, il s'agit en général d'un mélange des deux causes, la seconde étant toutefois en général prédominante.

On retiendra trois types principaux de fluctuations des signaux :

- l'effet Doppler, décrit ci-dessus ;
- les fluctuations d'amplitude et de phase dues soit aux trajets multiples, soit au comportement complexe de la cible ; ce sont souvent les plus pénalisantes, surtout si les trajets sont d'énergie à peu près comparables et peu séparés dans le temps ;
- les fluctuations d'amplitude et de phase dues, lors de la propagation, à la diffusion provoquée par les inhomogénéités du milieu : chaque trajet est accompagné d'un continuum de « microtrajets » diffusés, dont l'énergie relative augmente avec la distance.

Lois de fluctuations d'amplitude

Les amplitudes des signaux après propagation dans un milieu diffusant ou en présence de trajets multiples peuvent être décrites par des lois classiques de densité de probabilité. La *loi de Gauss*, ou *loi normale*, est souvent utilisée pour décrire les caractéristiques du bruit. *La loi de Rayleigh* traduit l'évolution de l'amplitude d'une somme de vecteurs d'amplitudes égales et de directions aléa-

toires ; autrement dit elle peut représenter la résultante d'une combinaison de signaux élémentaires de phases aléatoires provoquées par exemple par un phénomène de forte diffusion, ou encore par la sommation de nombreux trajets multiples d'amplitude comparable. *La loi de Rice* représente l'amplitude d'un signal composé d'une partie stable (ou cohérente), et d'une partie aléatoire (ou incohérente), l'importance relative de cette dernière paramétrant la loi de distribution. Elle est donc d'emploi plus général que celle de Rayleigh pour la description statistique d'un signal superposé à du bruit ; on l'utilise par exemple pour décrire des configurations de trajets multiples lorsqu'une des composantes est prédominante sur les autres.

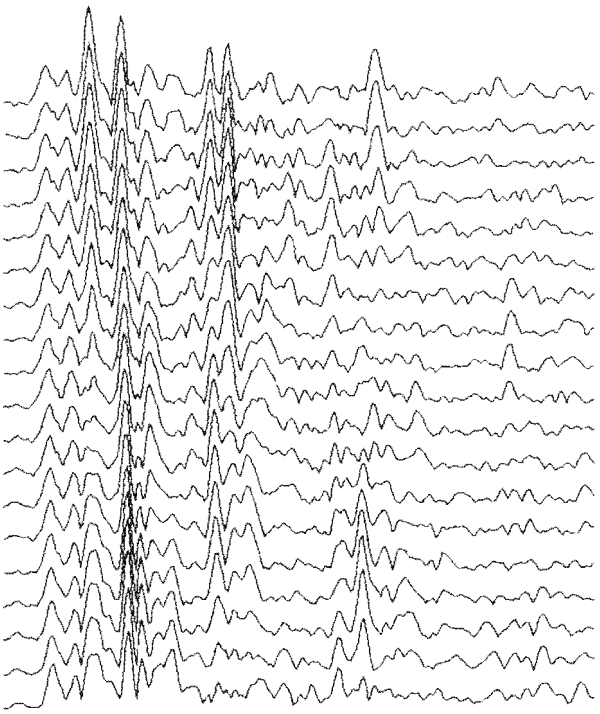


Figure 23 - Évolution au cours du temps d'une séquence de trajets multiples enregistrée après propagation en zone littorale.

Chapitre III

Principes généraux de fonctionnement des systèmes acoustiques sous-marins

Les transducteurs électroacoustiques sous-marins

Principes généraux

Les transducteurs électroacoustiques sous-marins sont indispensables pour l'émission comme pour la réception des signaux acoustiques transmis dans l'eau : ils effectuent (comme dans l'air les microphones et haut-parleurs) la transformation d'énergie électrique en énergie acoustique, ou inversement. L'appellation générique des transducteurs sous-marins est *hydrophone* ; on parle d'*antenne* pour un récepteur étendu, souvent constitué d'un groupement de plusieurs hydrophones élémentaires.

Les transducteurs ASM utilisent les propriétés *piézoélectriques* (ou parfois *magnétostrictives*) de certains cristaux naturels ou obtenus artificiellement (*céramiques*). Un champ électrique (ou magnétique) appliqué à ces matériaux permet de leur imposer des déformations dont les modulations reproduisent celles du champ excitateur ; ces déformations génèrent une onde acoustique dans le milieu de propagation. L'effet inverse est utilisable en réception. On cherche en général à utiliser les céramiques piézoélectriques autour de leur *fréquence de résonance*, pour obtenir le meilleur *rendement* possible ; mais la recherche d'un compromis avec une *bande passante* suffisamment large pour passer plusieurs fréquences voisines ou un signal modulé à large spectre est souvent souhaitable.

Enfin il est préférable, le plus souvent, de réaliser des transducteurs directifs, favorisant certaines directions d'émission ou de réception. La qualité de la fonction de directivité d'une antenne, obtenue soit par la structure du transducteur soit par le traitement des signaux des capteurs élémentaires, est une des conditions essentielles du bon fonctionnement d'un système sonar.

Technologie des transducteurs ASM

La technologie la plus utilisée pour les transducteurs acoustiques sous-marins est dite *Tonpilz* : un empilement de galettes de matériau piézoélectrique est polarisé par une forte pression statique imposée par une tige de précontrainte ; cet empilement

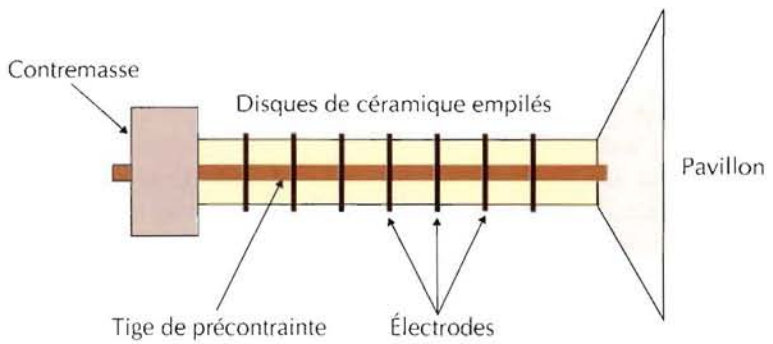


Figure 24 - Schéma d'un transducteur Tonpilz.

est solidaire d'un pavillon (équilibré par une contremasse à l'autre extrémité), qui transmet à l'eau les vibrations induites par application d'un champ électrique excitateur aux bornes du pilier piézoélectrique. Très fortement résonants, ces systèmes permettent des niveaux d'émission élevés mais n'autorisent que de faibles bandes passantes.
Aux fréquences élevées où la technologie Tonpilz n'est plus applicable, on utilise des éléments de céramiques excités directement par l'intermédiaire d'électrodes surfaciques. Accordés sur une gamme de fréquence donnée en fonction de leurs dimensions, ces dispositifs permettent des niveaux d'émissions suffisants en hautes fréquences pour beaucoup d'applications. Les géométries les plus courantes sont rectangulaires ou annulaires, selon le type de directivité recherchée.

Évolution des transducteurs

Les transducteurs ASM ont fait l'objet de beaucoup de développements théoriques ou technologiques, destinés à améliorer soit les principes de transduction soit les matériaux utilisés. Toutefois il est frappant de constater que les solutions les plus anciennes sont toujours majoritairement utilisées aujourd'hui, et que Langevin avait d'entrée de jeu vu juste avec son transducteur piézoélectrique à 38 kHz... Les intéressantes et très réelles innovations élaborées au fil des ans n'ont pas été à l'origine de profonds bouleversements de principe, au moins pour les applications les plus courantes. Dans le domaine des constituants, les matériaux magnétostrictifs, de meilleur rendement que les piézoélectriques mais trop onéreux, n'ont jamais réussi à s'imposer en dehors d'applications spécialisées ; par contre on doit remarquer l'émergence récente des récepteurs en PVDF, matériau piézoélectrique permettant de réaliser des antennes surfaciques de formes et dimensions quelconques, bien adaptées à l'installation sur les coques de sous-marins ou de navires, et qui a trouvé des applications intéressantes dans le domaine du sonar passif.

En très basses fréquences, la technologie des sources acoustiques doit faire appel à des solutions particulières, du fait des amplitudes importantes que l'on doit imposer à la surface émettrice du transducteur. Différentes solutions existent, par exemple :
• tubes ouverts résonants, excités à l'extrémité par une plaque de céramique, solution simple mais procurant un médiocre rendement, souvent utilisée en océanographie ;
• extensions de la technologie Tonpilz (tel le procédé *Janus* disposant deux Tonpilz tête-bêche), conduisant à des réalisations lourdes mais incontournables pour les applications de sonar actif TBF nécessitant de fortes puissances ;
• sources électrodynamiques analogues à des haut-parleurs aériens, de réalisation très délicate et supportant mal la pression hydrostatique, mais permettant de larges bandes passantes.
• transducteurs de type *flextenseurs*, comportant une coque vibrante raidie intérieurement par un ou plusieurs piliers de céramiques, et qui sont caractérisés par une haute efficacité.

Sources non linéaires

Les *antennes paramétriques* sont basées sur une génération *non linéaire* d'ondes acoustiques : lors de l'émission simultanée à très fort niveau de deux fréquences proches, l'apparition de distorsions non linéaires dans les formes d'ondes émises provoque la création d'une onde secondaire à la fréquence différence des deux fréquences primaires. L'avantage de ce procédé est que l'onde secondaire (de basse fréquence) bénéficie du diagramme de directivité des ondes primaires (hautes fréquences, donc très directives). Il est donc possible d'obtenir un faisceau très étroit à une fréquence basse avec une antenne d'émission de taille modeste, ainsi qu'une large bande passante. Tous ces avantages se paient par un médiocre rendement énergétique dans la production de l'onde secondaire.

Niveau d'émission

Le niveau acoustique délivré par un transducteur dépend bien sûr de la puissance électrique qui lui est fournie, mais aussi de ses caractéristiques propres : *rendement énergétique électroacoustique* (rapport de la puissance acoustique transmise à la puissance électrique consommée) et *gain de directivité* (traduisant la répartition de l'onde acoustique émise dans l'espace).

Le niveau émis peut être calculé comme $NE = 170{,}8 + 10 \log P_e + 10 \log \beta + GD$, où NE est le niveau émis (en dB/1 µPa/1 m), P_e la puissance électrique fournie (en W), β le rendement énergétique électroacoustique, et GD le gain (ou indice) de directivité en émission (en dB). Typiquement NE est de 180 à 240 dB/µPa/1 m et β de 0,1 à 0,8. L'indice de directivité dépend de la géométrie de l'antenne.

Le rayonnement d'un transducteur dans l'espace peut être décomposé, selon la distance du point d'observation, en :

- *champ proche* (ou zone de Fresnel), où les contributions des différents points de la face émissive du transducteur sont fortement déphasées, et le champ résultant rapidement oscillant ; l'intensité moyenne du champ reste constante ;
- *champ lointain* (ou zone de Fraunhofer) où les interférences disparaissent, et où l'intensité du champ décroît avec la distance (régime sphérique).

La transition entre les deux zones est conventionnellement définie par la *distance de Fresnel*, égale à L^2/λ, où L est la dimension caractéristique du transducteur

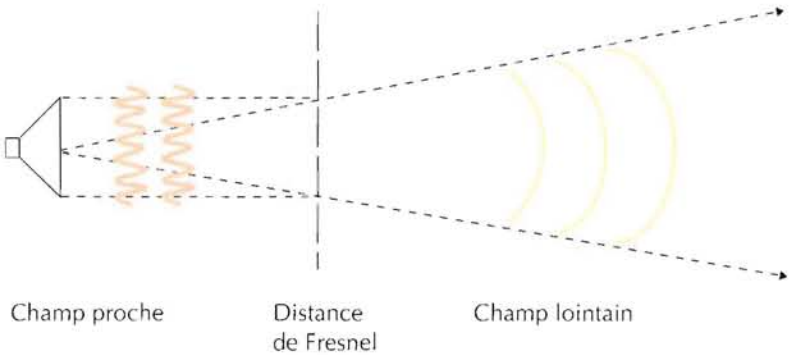


Figure 25 - Rayonnement d'un transducteur : champ proche et champ lointain.

(diamètre, ou longueur) et λ la longueur d'onde du signal. Ces notions de champ proche et champ lointain sont similaires pour un transducteur utilisé en réception.

Les limitations de l'utilisation des transducteurs à de trop fortes puissances sont de deux ordres :

• le premier est technologique : une trop forte tension appliquée conduit à une réponse non linéaire du matériau puis à des dégradations (fêlures, décollements...) liées aux trop fortes contraintes mécaniques, voire au claquage diélectrique du matériau utilisé ;

• le second est imposé par le milieu de propagation : c'est le phénomène de *cavitation*, dû à la vaporisation de l'eau au voisinage de la face parlante du projecteur par les dépressions locales imposées par l'onde acoustique. Cet effet provoque une limitation et même une baisse du rendement électroacoustique du transducteur. Il est d'autant moins gênant que l'immersion du transducteur est importante.

Autres caractéristiques

En plus du niveau d'émission, les principales caractéristiques d'un transducteur sont les suivantes :

• *fréquence nominale d'utilisation* : elle est en général définie par le régime de résonance du transducteur (surtout en émission), lequel est donc spécialisé dans une gamme donnée ; les hydrophones récepteurs utilisés pour les mesures en laboratoire sont au contraire très peu sélectifs ;

• *bande passante* : c'est la largeur de bande de fréquences que le transducteur peut transmettre efficacement autour de sa fréquence nominale ; plus le comportement résonant du transducteur est exploité, plus sa bande passante est faible. À partir de la courbe de réponse en fréquence (fig. 26), la bande passante est classiquement mesurée à -3 dB de part et d'autre du maximum. Le *facteur de qualité* de la résonance est donné par le rapport $f_0/\delta f_{3dB}$ de la fréquence centrale à la largeur de bande passante ; il vaut typiquement de 3 à 10 avec les transducteurs ASM usuels.

• *efficacité* : elle traduit la qualité de la conversion électroacoustique ; elle est exprimée en émission par

$$SV = 20 \log(\frac{p_{1V}}{p_{ref}})$$

(en dB/1µPa/1m/1V), où p_{1V} est la pression acoustique obtenue à 1 m du transducteur (dans la direction du maximum d'amplitude) pour une tension électrique d'excitation de 1 V, et p_{ref} la pression acoustique de référence (1 µPa). En réception, la sensibilité d'un hydrophone est donnée par

$$SH = 20 \log(\frac{V_{1\mu Pa}}{V_{ref}})$$

(en dB/1V/1µPa), où $V_{1\mu Pa}$ est la tension électrique en sortie fournie par l'hydrophone pour une pression acoustique incidente de 1 µPa, et V_{ref} la tension de référence (1V).

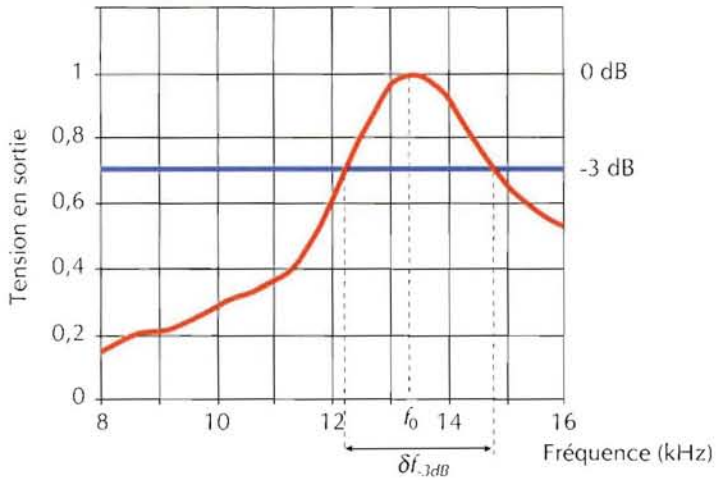


Figure 26 - Réponse fréquentielle d'un transducteur en réception (normalisée par rapport au niveau à la fréquence nominale f_0) et bande passante δf_{-3dB}.

• *directivité* : elle traduit en émission la répartition angulaire de l'énergie acoustique émise par le transducteur ; et en réception la réponse électrique en fonction de la direction d'arrivée de l'onde acoustique. La fonction de directivité, qui décrit ces variations spatiales, dépend de la fréquence et de la forme/dimension du transducteur : l'antenne est d'autant plus directive que ses dimensions sont grandes devant la longueur d'onde. Ces importantes notions sont développées maintenant.

Directivité des transducteurs et antennes

Notion de directivité

Il est rare d'utiliser des transducteurs émettant ou recevant de manière isotrope dans l'espace - sauf pour des mesures de référence, ou en très basse fréquence. De manière générale on cherche à réaliser et employer des transducteurs directifs, favorisant certaines directions de propagation. On utilise alors des antennes constituées soit d'un transducteur de dimensions notables devant la longueur d'onde, soit d'un ensemble de transducteurs élémentaires correctement regroupés. En émission la directivité ainsi obtenue permet, en concentrant l'énergie émise dans un secteur angulaire privilégié, d'augmenter la pression acoustique locale, à puissance émise donnée. En réception, l'emploi d'une antenne permet d'augmenter le rapport signal/bruit en profitant des propriétés respectives de cohérence spatiale du bruit et du signal : la composition des sorties des capteurs favorise le signal et tend à minimiser le bruit. Par ailleurs, une antenne directive permet de sélectionner dans l'es-

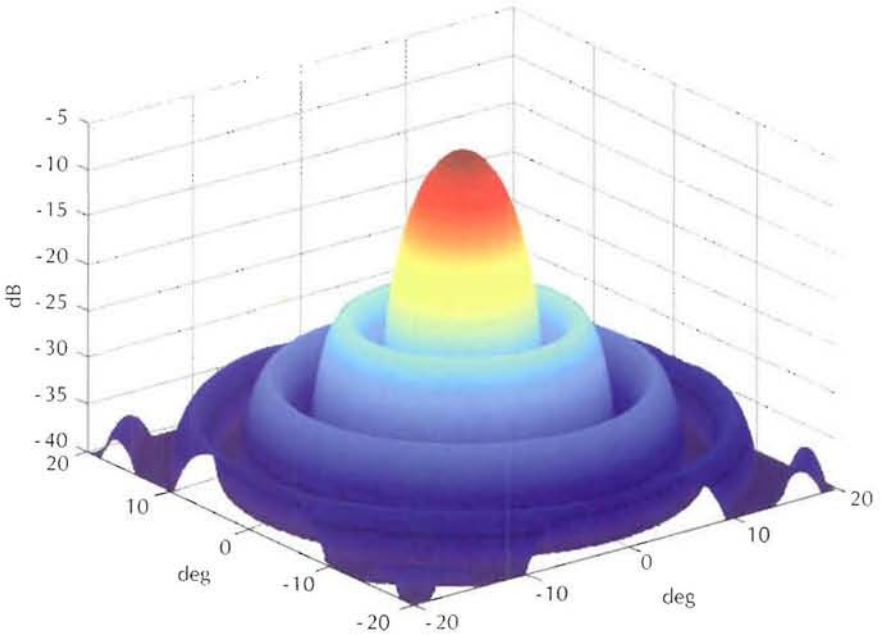


Figure 27 - Diagramme de directivité théorique d'un piston circulaire.

pace certaines directions d'arrivée du signal, et donc de s'affranchir, au moins partiellement, des trajets multiples ; elle limite la taille effective d'une cible étendue ; et enfin, elle permet de localiser une cible ponctuelle.

La *fonction de directivité* (fig. 27) d'un transducteur traduit la réponse énergétique en champ lointain à une fréquence donnée en fonction de l'angle, normalisée par rapport à son maximum. Cette fonction comporte en général un *lobe principal*, que l'on caractérise par son ouverture à -3 dB (dite « $2\theta_3$ »), qui est la largeur utile du faisceau et qui traduit la résolution angulaire associée à l'antenne. Autour de ce lobe principal s'étalent les *lobes secondaires*, en général indésirables, et dont l'atténuation par rapport au lobe principal est un des critères de qualité de l'antenne. Pour une géométrie et une fréquence données, la fonction de directivité est la même en émission et en réception.

L'ouverture équivalente est celle d'un diagramme de directivité idéal (en « tout ou rien » : la fonction de directivité vaudrait 1 dans le lobe et 0 en dehors) intégrant la même quantité d'énergie que le diagramme réel.

L'*indice*, ou *gain de directivité GD*, traduit le « gain spatial en énergie » obtenu avec une antenne directive (calculé par intégration de la fonction de directivité dans tout l'espace) par rapport à une antenne sans directivité (pour laquelle cette intégrale vaut 4π). Cet indice traduit en réception la diminution du bruit perçu par le récepteur du fait de la directivité de l'antenne (dans l'hypothèse d'un bruit ambiant angulairement isotrope). En émission, il traduit l'augmentation d'intensité acoustique dans la direction principale.

De manière générale, on retiendra qu'une antenne est d'autant plus directive (lobe principal étroit, forte valeur de l'indice de directivité) que le rapport dimension/longueur d'onde est élevé.

Caractéristiques de transducteurs de géométrie simple

L'angle θ est ici compté par rapport à la normale à l'antenne ; les valeurs de l'ouverture $2\theta_3$ et des angles du 1er minimum et du 1er secondaire sont des expressions approchées valables pour de petites ouvertures angulaires. Φ est l'ouverture angulaire équivalente et Ψ est l'ouverture solide équivalente correspondant au diagramme de l'antenne utilisée en émission-réception.

Géométrie antenne	Ligne longueur $L>\lambda$	Disque diamètre $D>\lambda$	Rectangle côtés a et $b>\lambda$
Directivité $D(\theta)$	$(\sin A / A)^2$ $A = \pi L/\lambda . \sin\theta$	$(2 J_1(A) / A)^2$ $A = \pi D/\lambda . \sin\theta$	
Indice GD (dB)	$10 \log(2L/\lambda)$	$20 \log(\pi D/\lambda)$	$10 \log(4\pi ab/\lambda^2)$
Ouvert. $2\theta_3$ (deg.)	$50\lambda/L$	$60\lambda/D$	
1er min. (deg.)	$57\lambda/L$	$70\lambda/L$	
1er second. (deg.)	$86\lambda/L$	$97\lambda/L$	
Niv. second. (dB)	-13,5	-17,7	
Φ (radians)	$1,3\lambda/L$	$4,9(\lambda/\pi D)$	
Ψ (stéradians)	$1,3\lambda/L$	$5,9(\lambda/\pi D)^2$	$5,5\lambda^2/(4\pi ab)$

Pour l'antenne rectangulaire, les caractéristiques angulaires dans les directions des côtés a et b sont identiques à celles d'antennes linéaires de longueur a et b.

Formation de voies

Dans le cas d'une antenne formée de capteurs discrets indépendants, il est possible d'imposer des déphasages appropriés aux transducteurs pour *pointer* le lobe principal de l'antenne dans une direction choisie. Ce procédé, dit de *formation de voies*, est surtout utilisé en réception ; il permet de balayer angulairement l'espace à explorer sans mouvement mécanique de l'antenne. Par exemple, pour une antenne linéaire de N capteurs placés à $\lambda/2$ et pointée dans la direction θ_0, on obtient la fonction de directivité suivante :

$$D(\theta) = \left| \frac{\sin A}{N \sin(A/N)} \right|^2 \quad \text{avec} \quad A = \pi \frac{L}{\lambda} (\sin\theta - \sin\theta_0)$$

Les lobes de directivité sont alors des figures de révolution autour de l'axe de l'antenne. La figure 28 présente les fonctions de directivité tracées pour les voies 0 ° (pas de dépointage), 30 °, 60 ° et 90 ° (dépointage maximal). La largeur du lobe principal augmente avec l'angle alors que le niveau des secondaires et l'indice de directivité restent constants.

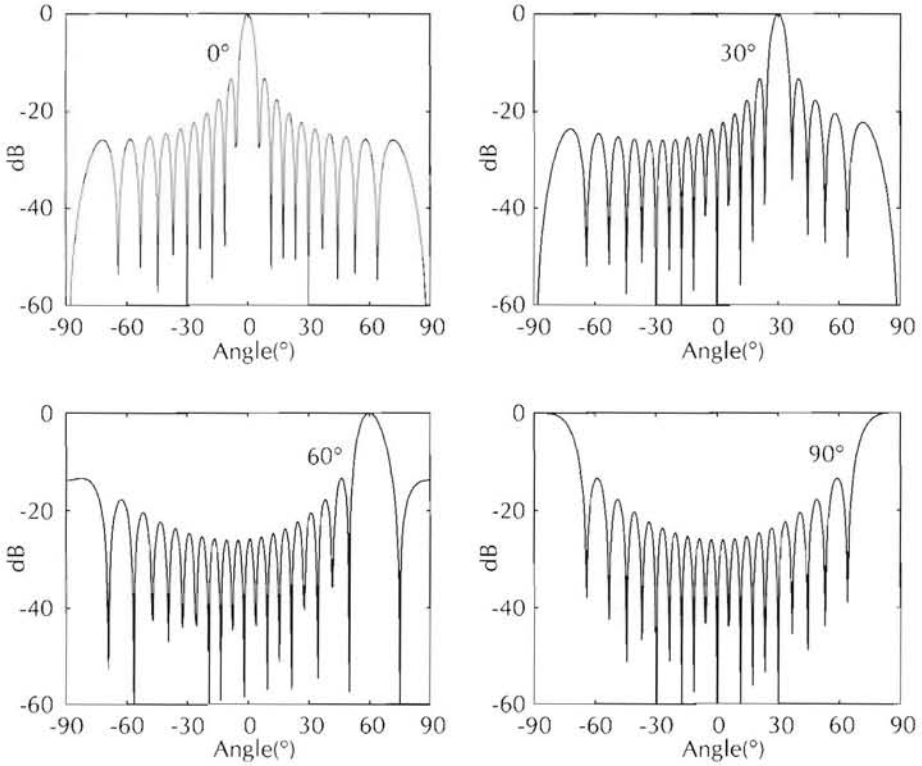


Figure 28 - Fonctions de directivité d'une antenne linéaire pour différentes voies formées (à 0 °, 30 °, 60 °, 90 °).

Une propriété intéressante utilisée dans la formation de voies résulte de l'expression de la sommation des sorties $s_i(t)$ des N capteurs déphasés pour pointer dans la direction θ_0. Si l est la différence de marche élémentaire entre deux capteurs distants de d, on a $l = d \sin \theta_0$; le déphasage correspondant est :

$$2\pi f \frac{l}{c} = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta_0$$

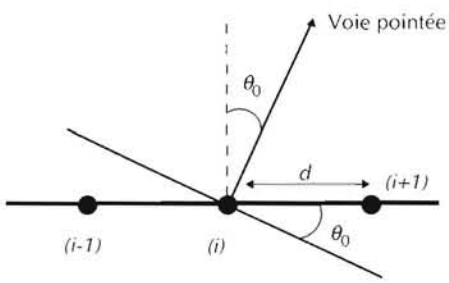


Figure 29- Géométrie de la formation de voies.

Le signal résultant de la formation de voie dans la direction θ_0 est :

$$p(\theta_0) = \sum_{i=1}^{N} s_i(t) \exp(-2j\pi(i-1)\frac{d}{\lambda}\sin\theta_0)$$

Cette dernière expression est celle d'une *transformée de Fourier discrète* entre l'espace des angles de pointage (précisément de leur sinus) et celui des positions des capteurs (rapportés à la longueur d'onde) ; un procédé courant est donc d'utiliser des algorithmes de transformée de Fourier rapide (FFT pour *Fast Fourier Transform*) rendus encore plus efficaces par l'utilisation de processeurs spécialisés.

Par ailleurs le procédé de formation de voies permet, en *pondérant* les contributions des capteurs de manière appropriée lors de leur sommation, de *diminuer l'importance des lobes secondaires* ; mais ceci se traduit en général par un élargissement du lobe principal. Les lois de pondérations sont évidemment celles utilisées classiquement en FFT, puisque les opérations sont les mêmes (Hamming, Hanning, Dolph-Tchebychev, etc.). Dans une antenne formée de transducteurs séparés, la valeur de l'espacement entre ceux-ci est de grande importance : il faut en effet veiller à ce que cette distance soit suffisamment petite pour assurer un échantillonnage spatial correct du champ, et éviter l'apparition de lobes parasites dits *lobes de réseau*. La valeur de l'espacement entre capteurs élémentaires ne doit pas être supérieure à $\lambda/2$; cette valeur est celle utilisée en général.

Focalisation

Lorsque l'antenne est de dimension telle qu'elle est amenée à fonctionner en champ proche, l'hypothèse d'ondes planes n'est plus valide et la formation de voies n'est plus adaptée. Une *focalisation* de l'antenne doit alors être effectuée, en déphasant les éléments de manière à compenser les différences de phase non plus d'une onde plane, mais d'une onde sphérique centrée sur la cible.

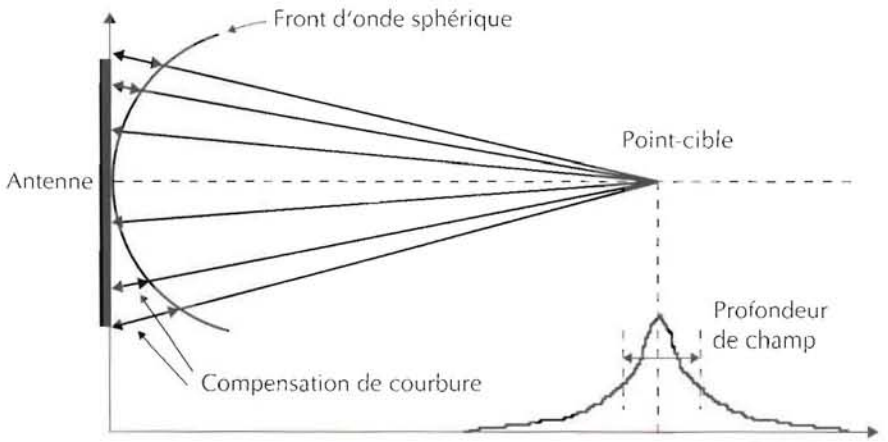


Figure 30 - Focalisation d'une antenne.

La focalisation n'est évidemment valable que dans une zone limitée (*profondeur de champ*) autour du centre de la sphère considérée ; la distance de focalisation doit donc évoluer avec la position attendue de la cible, ce qui complique sensiblement le traitement. La focalisation est surtout intéressante pour des distances relativement courtes ; elle est souvent utilisée pour compenser les insuffisances de la formation de voies en champ proche de l'antenne ; par contre, dès que les surfaces d'onde sont assez planes, la formation de voies, beaucoup plus simple, offre des performances suffisantes.

Interférométrie

Un procédé souvent employé pour localiser une cible consiste à mesurer son angle apparent à partir de la différence de phase entre deux points récepteurs. La mesure très précise de la différence de marche ainsi réalisée permet d'évaluer précisément la direction angulaire. Avec la géométrie de la figure 31, où la différence de phase est mesurée entre les points A et B distants de a, la relation entre l'angle et la différence de phase est

$$\Delta\varphi_{AB} = \frac{2\pi f}{c}\,\delta R = \frac{2\pi f}{c}\,a.\sin\gamma$$

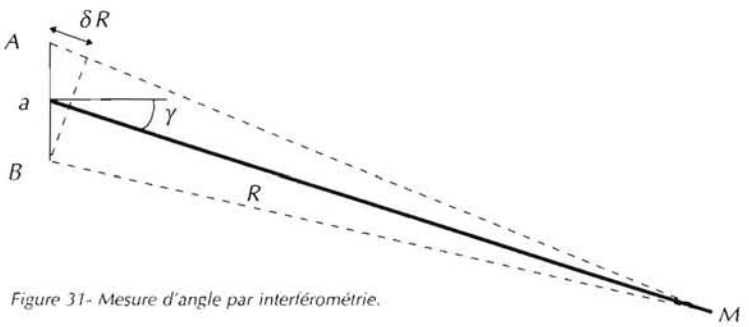


Figure 31- Mesure d'angle par interférométrie.

Toutefois la direction ainsi obtenue est définie de manière ambiguë, du fait que la mesure de phase elle-même est effectuée *modulo* 2π ; ce type de mesures ne convient donc pas pour toutes les configurations. Plusieurs solutions permettent de pallier ce problème : soit l'utilisation d'un interféromètre suffisamment serré pour éviter les différences de phase trop importantes (souvent on prend $a = \lambda/2$; mais un faible écart a dégrade la précision de mesure d'angle) ; soit la mise en œuvre d'un troisième récepteur dont le déphasage avec les deux autres permet de lever l'ambiguïté.

Ce type de traitement est souvent utilisé en mesure de bathymétrie par un sonar latéral ou un sondeur multifaisceaux, pour estimer la direction d'un point d'impact sur le fond en incidence oblique.

Ouverture synthétique

Les performances de directivité d'une antenne donnée sont *a priori* limitées par le rapport entre ses dimensions et la longueur d'onde du signal utilisé, et la résolution à en attendre semble donc limitée à une valeur limite impossible à dépasser. La méthode d'*ouverture synthétique d'antenne* permet toutefois de contourner cette difficulté. Ce procédé consiste à acquérir le champ acoustique sur les capteurs d'une antenne mobile au cours du déplacement de celle-ci ; les signaux ainsi enregistrés au cours du temps correspondent donc à ceux qui auraient été obtenus sur une antenne de longueur égale à la distance parcourue, donc éventuellement beaucoup plus longue que l'antenne physique utilisée ; ils permettent donc, après recalage temporel et spatial, d'effectuer une formation de voie ou une focalisation beaucoup plus performantes que les mêmes opérations réalisées avec l'antenne réelle seule. Ce procédé est utilisé depuis longtemps dans le domaine du radar aéroporté ; un certain nombre de limitations (physiques, ou liées aux capacités de traitement) en ont longtemps retardé l'application au sonar, mais sont en passe d'être résolues. La principale difficulté réside dans la faible célérité du son, qui impose entre des émissions successives un retard assez long pendant lequel le porteur a le temps de dériver de sa trajectoire idéale ; ce qui impose de corriger ses mouvements à l'aide de centrales d'attitude très précises, ou à partir de l'exploitation de la corrélation des signaux entre échos successifs.

Signaux et traitements

L'impulsion monochromatique *(ou ping)*

Le signal le plus courant en acoustique sous-marine, utilisé dans la grande majorité des sondeurs, sonars et systèmes de positionnement, est simplement une sinusoïde de fréquence f_0 émise pendant une durée limitée T :

$$S(t) = A \,.\, \sin(2\pi f_0\, t) \qquad \text{si } 0 < t < T$$

Le spectre de ce signal est un sinus cardinal centré sur la fréquence porteuse

$$S(f) = A \,.\, \frac{\sin(2\pi T(f - f_0))}{2\pi T(f - f_0)}$$

et la largeur de bande à -3 dB vaut environ $\delta f \approx 1/T$.

À titre indicatif, les fréquences employées dans les sondeurs usuels vont de 20 à 200 kHz pour des durées d'impulsions de 0,1 à 1 ms, donc des largeurs de bande de 1 à 10 kHz ; les rapports $\delta f / f_0$ sont donc faibles, et ces signaux sont dits à *bande étroite*.

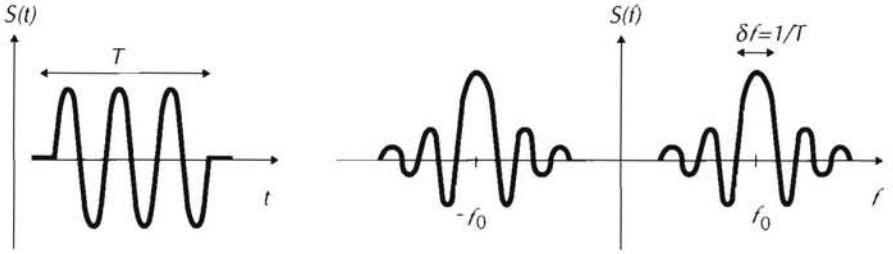


Figure 32 - Forme temporelle et spectrale d'un ping.

La résolution associée à ces signaux est donnée par leur durée : on ne peut séparer deux *pings* de durée T que s'ils sont distants d'au moins T. Après réflexion sur une cible cela correspond à une résolution spatiale de $cT/2$ (par exemple 0,75 m pour une impulsion de 1 ms).

Le récepteur utilisé pour ce type de signal consiste classiquement en :
- un *filtre passe bande* correspondant autant que possible au spectre du signal corrigé éventuellement du décalage Doppler prévu ;
- une *quadration* du signal filtré ;
- une *intégration* de l'énergie, de durée τ adaptée à la durée du signal.

Le principe du traitement consiste donc en une détection de l'énergie présente dans la bande et la durée du signal ; on parle de *traitement non cohérent*.

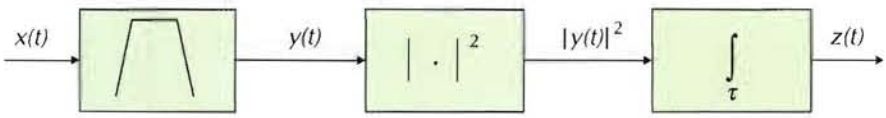


Figure 33 - Traitement non cohérent : chaîne de réception (filtrage passe-bande, quadration, intégration).

On peut montrer que le *gain de traitement* (amélioration du rapport signal à bruit de l'entrée à la sortie de la chaîne) est optimal pour une durée d'intégration et une largeur de filtre proches des caractéristiques du signal, et vaut alors 5 log(BT), soit à peu près 0 dB. En fait il n'y a pas véritablement de gain de traitement ; l'énergie du signal est simplement récupérée dans la bande de fréquence convenable.

Le principal intérêt de ces signaux est leur simplicité d'émission et de traitement associée à des performances qui sont souvent suffisantes pour de nombreuses applications ; ils sont utilisés dans la grande majorité des sondeurs et sonars latéraux. Par ailleurs, leur spectre étroit s'accommode bien des transducteurs courants à faible bande passante ; tout ceci concourt à la conception de systèmes simples et à bon rendement. L'inconvénient est que leur contenu spectral très pauvre les rend peu susceptibles de traitements supplémentaires pour les opérations d'identification de cibles ; par ailleurs, ils nécessitent de travailler avec des rapports S/B d'entrée assez élevés, donc d'émettre des niveaux instantanés importants.

L'impulsion modulée en fréquence *(ou chirp)*

Le *chirp*, sous sa forme la plus simple et la plus commune, est une sinusoïde dont la fréquence instantanée augmente pendant l'émission (modulation linéaire de fréquence) :

$$S(t) = A.\sin\left[2\pi\left(f_0 + m\,\frac{t-T}{2}\right)t\right] \quad \text{si } 0<t<T$$

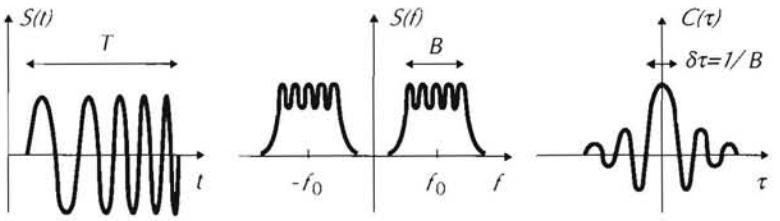


Figure 34 - Forme temporelle et spectrale d'un chirp, et fonction d'autocorrélation C(t) ; la largeur de celle-ci est l'inverse de la bande de fréquence couverte par la modulation.

La fréquence varie donc de f_0 - $mT/2$ à f_0 + $mT/2$, soit une largeur de bande de $B = mT$. Le spectre de fréquences est en gros assimilable à un créneau de largeur B centré sur f_0. Ce type de signal est traité en réception par *corrélation* du signal reçu $x(t)$ (plus ou moins déformé et ajouté à du bruit) avec une copie du signal émis $s(t)$:

$$y(t) = \int_0^T x(t')\,s(t'-t)\,dt'$$

l'objectif étant de faire apparaître dans cette opération la fonction d'autocorrélation du signal (fig. 34) :

$$C(\tau) = \frac{\sin(\pi B\tau)}{\pi B\tau}$$

On effectue alors une quadration de la sortie du corrélateur, pour avoir finalement

$$z(t) = \left|y(t)\right|^2$$

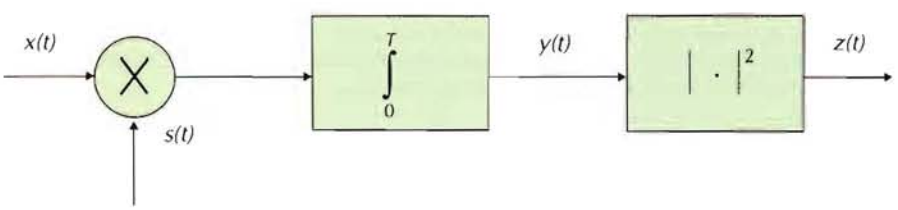


Figure 35 - Traitement cohérent : chaîne de réception (corrélation temporelle et quadration).

La réception par corrélation est souvent appelée *traitement cohérent*. Le gain de traitement ainsi réalisé est alors 10 log*(BT)*. Un premier avantage du *chirp* (traité par corrélation) sur le *ping* (détecté intégré) apparaît donc ici : le gain de traitement du *chirp* est d'autant plus important (comparé à celui du *ping*) que le produit BT est grand, donc que l'on utilise des signaux longs et à bande large ; mais ici T et B peuvent être augmentés indépendamment et le gain de traitement peut prendre des valeurs importantes, alors que pour le *ping* on a toujours $B \approx 1/T$.
On peut également considérer l'allure du carré de la fonction de corrélation

$$z(t) = \left| y(t) \right|^2$$

c'est-à-dire la sortie du traitement. Cette fonction a pour enveloppe un sinus cardinal au carré

$$z(t) = \left[\frac{\sin(\pi B t)}{\pi B t} \right]^2$$

dont le lobe principal a pour largeur

$$\delta t \approx \frac{1}{B}$$

On remarque immédiatement que :
• la résolution en distance δt du récepteur est indépendante de la durée d'émission et ne dépend que de la largeur de la modulation de fréquence B ;
• l'énergie du signal, étalée au départ sur une durée T, se trouve en sortie de traitement « compressée » dans une durée δt ; on retrouve bien le gain de traitement en $T/\delta t \approx BT$ soit celui présenté plus haut. On appelle d'ailleurs couramment ce procédé *compression d'impulsion*.

Ce type de traitement cumule donc plusieurs avantages ; il permet d'obtenir à la fois :
• *de fortes valeurs du gain de traitement,* obtenues en utilisant des signaux longs ; ceci permet d'utiliser des puissances d'émission limitées, que l'on compense par la durée des signaux ;
• une *bonne résolution temporelle,* indépendante de la durée du signal et obtenue par la largeur de bande de fréquence de la modulation.

Il n'est pas nécessaire d'effectuer une corrélation au sens strict sur les échantillons temporels du signal. On montre classiquement que l'opération de corrélation (dans le domaine temporel) est identique à un filtrage dans le domaine fréquentiel par un filtre dont la fonction de transfert est le conjugué du spectre du signal de référence. Les opérations dans le domaine fréquentiel étant souvent préférées, on a alors le schéma de traitement (numérique) suivant :

$$x(t) \xrightarrow{FFT} X(f) \xrightarrow{Filtre} Y(f) = X(f) S^*(f) \xrightarrow{FFT^{-1}} y(t)$$

Le signal reçu $x(t)$ peut ne pas être simplement retardé, mais aussi déphasé ; la sortie du corrélateur est alors dégradée en fonction de ce déphasage, et le maximum de corrélation ne se trouve plus à l'instant d'arrivée du signal (biais de mesure de temps). La solution consiste à effectuer une double corrélation du signal reçu avec d'une part le signal émis et d'autre part le signal émis en quadrature ; les sorties des deux corrélations sont alors ajoutées quadratiquement. Ce procédé

permet d'éliminer le biais temporel et de retrouver le niveau maximal en sortie ; en contrepartie, il se produit un élargissement d'un facteur 2 du lobe de la fonction $z(t)$, et donc une perte de finesse de résolution.

La forme même du *chirp* peut être modifiée pour améliorer ses performances. D'abord, la modulation linéaire de fréquence utilisée dans le *chirp* classique est assez sensible au Doppler (dégradation du niveau de sortie et biais de mesure de temps, dus au fait que le glissement fréquentiel du Doppler est indiscernable d'un retard temporel de la rampe de fréquence) ; on préfère parfois une modulation hyperbolique

$$S(t) = A.\sin\left[2\pi f_0 m \log(1+\frac{t}{m})\right]$$

qui présente une meilleure tolérance. Enfin, il est intéressant d'associer à la modulation de fréquence une modulation de l'amplitude de l'enveloppe, par une forme « en cloche ». Les lobes secondaires de la fonction d'autocorrélation s'en trouvent diminués.

Modulation de phase

On utilise souvent, en acoustique sous-marine appliquée à l'océanographie, des signaux constitués d'une fréquence porteuse modulée en phase :

$$S(t) = A\,.\,\sin[2\pi f_0 t + \varphi(t)]$$

où, le plus couramment, $\varphi(t)$ prend les valeurs discrètes 0 et π (modulation dite PSK2 pour *Phase Shift Keying*) en changeant toutes les T secondes.
Une telle modulation est utilisée couramment pour transmettre des données numériques (un bit toutes les T secondes, valant par exemple 0 ou 1 selon que $\varphi(t)$ vaut 0 ou π) ; le traitement en réception consiste alors à se caler sur la fréquence porteuse et à détecter les changements de phase porteurs du message numérique.

Ce procédé est aussi utilisé en détection/mesure, pour moduler le signal émis. Le principe est le même que celui du chirp décrit plus haut : la séquence des $\{\varphi_i\}$ étant connue *a priori*, le traitement en réception consiste alors en une corrélation entre signal reçu et signal émis. On utilise en général des *séquences binaires de longueur maximale* (SBLM) dont l'intérêt est de supprimer les lobes secondaires de la fonction d'autocorrélation du signal. L'emploi d'une SBLM de M digits (avec $M = 2^N - 1$, où N est un entier caractérisant l'ordre de la séquence) permet d'obtenir une fonction d'autocorrélation de durée T égale à celle d'un digit, exempte de lobes secondaires, et un gain de traitement de $10 \log M$ par rapport à l'utilisation d'un seul digit.

L'utilisation de cette méthode est justifiée pour des mesures très précises de temps de propagation, demandant une excellente résolution temporelle et un fort gain de traitement (par exemple la mesure de la réponse impulsionnelle du milieu, pour la tomographie acoustique océanique).

Gain variable en temps

L'amplitude d'un écho de cible dépend évidemment de la distance entre la cible et le système sonar, par exemple suivant une loi variant en $40 \log R + 2\alpha R$. En sortie de traitement, on observera donc des échos dont l'amplitude sera fonction de la distance sonar-cible plutôt que de l'indice de la cible concernée. Une solution très généralement employée pour combattre cet effet consiste à corriger le signal reçu de la loi attendue pour la perte de propagation, transposée dans le domaine temporel à partir de la relation simple $R = ct/2$.

Cette correction est connue sous le nom de TVG (pour *Time Varying Gain*). Elle est utilisée dans tous les systèmes travaillant sur écho de cible (sondeurs et sonars).

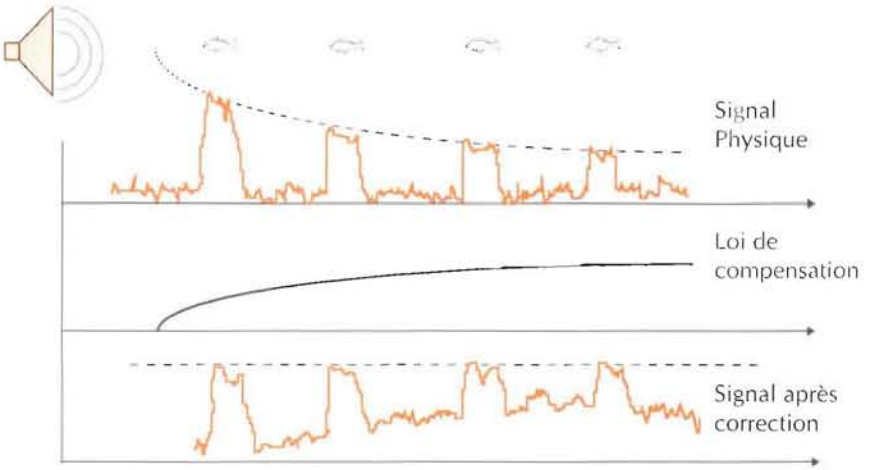


Figure 36- Rôle du gain variable en temps (TVG)

Sommation cohérente

Un procédé couramment utilisé consiste à sommer plusieurs échos successifs obtenus dans une même configuration. Sous réserve que le bruit (aléatoire) additif au signal (supposé stable) obéisse à quelques bonnes hypothèses, on montre que la puissance du bruit résultant après sommation augmentera moins vite que celle du signal. En effet, les séquences de bruit sommées, supposées décorrélées, s'ajoutent en *énergie*, alors que les signaux successifs s'additionnent de manière cohérente, donc en *amplitude* ; le rapport signal/bruit en sortie de traitement augmentera donc environ comme 10 log N où N est le nombre de signaux successifs sommés. Ce procédé est utilisé couramment tant pour les signaux actifs que pour la détection des bruits rayonnés. Il nécessite évidemment une redondance importante des signaux recueillis, et donc une grande stabilité de configuration : il est utilisé en sonar passif (où la sommation d'échos successifs est remplacée par une intégration temporelle du signal reçu) ou dans certains systèmes de sonar actif ou de mesure.

Traitement des signaux en sonar passif

En sonar passif, l'objectif est de détecter deux types de signaux qui sont en fait des bruits rayonnés par le bruiteur cible :

- des *raies spectrales*, donc des signaux quasi monochromatiques ;
- du *bruit large bande* (cavitation d'hélices, écoulement hydrodynamique...) dont l'origine et les caractéristiques principales ont été décrites précédemment.

Le récepteur utilisé est celui du traitement non cohérent, donc composé d'un filtrage passe-bande, d'une quadration et d'une intégration.

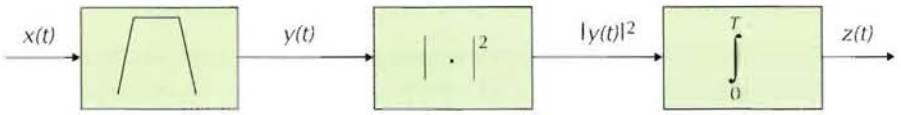


Figure 37 - Sonar passif : chaîne de traitement (filtrage passe-bande, quadration, intégration).

Quelques particularités sont à signaler, par rapport au cas de la réception d'un signal actif bref :

• *le filtrage passe-bande* dépend de l'application envisagée ; il a pour but de sélectionner la partie utile du spectre de bruit rayonné. En bande large, un filtre de structure classique est utilisé, et la détection se fait sur des bandes de l'ordre de l'octave. En bande étroite, on effectue une analyse spectrale par transformée de Fourier rapide pour laquelle on peut assimiler à un filtre passe-bande très étroit chacun des canaux de la FFT ; dans ce deuxième cas la largeur typique du filtrage est de l'ordre du hertz ;

• *l'intégration temporelle* a pour objet de réduire la variance du bruit en sortie de traitement ; sa durée T_i est donc choisie assez longue ; dans tous les cas, elle conduit à des valeurs du produit BT_i très supérieures à 1.

Le gain de traitement obtenu avec une telle chaîne est en 5 $\log(BT_i)$. Il peut donc être notable dans la mesure où, le temps d'intégration étant indépendant de la bande observée, le produit BT_i peut être important.

Évaluation des performances

L'équation du sonar

L'ensemble des éléments évoqués précédemment (propagation, bruit, réverbération, antennes, signaux, traitements...) est synthétisé schématiquement dans *l'équation du sonar* que l'on peut écrire sous la forme très simplifiée suivante, pour traduire une possibilité de détection ou de mesure par un système ASM :

Signal - Bruit > Seuil

L'équation du sonar est strictement une équation de conservation de l'énergie, destinée à l'évaluation, sous certaines hypothèses, des performances d'un système.
Le *signal* considéré ici est celui perçu par le système ; il est donc égal :

• en actif, au niveau émis par le système corrigé des pertes de propagation aller-retour et de l'indice de rétrodiffusion de la cible ;

• en passif, au niveau de bruit rayonné par la cible, corrigé par les pertes de transmission.

Le *bruit* perturbant la réception est la somme des contributions du bruit ambiant et du bruit propre du système. Il est caractérisé par sa densité spectrale de puissance, et corrigé éventuellement de l'indice de directivité de l'antenne en réception ; on doit y ajouter dans certains cas, en actif, le *niveau de réverbération*.

Le *seuil* dépend à la fois du gain de traitement apporté par le système récepteur et des performances que l'on impose à l'opération de détection ou de mesure ; ces dernières sont exprimées sous forme d'un *indice de détection* considéré en sortie de récepteur (voir ci-dessous).

De manière plus détaillée le bilan énergétique d'un système ASM actif peut s'écrire :

$$NE - 2PT + IC - NB + GD + GT > ID$$

où *NE* est le niveau émis, *2PT* la perte de transmission aller-retour sur l'amplitude du signal entre le système et la cible, *IC* l'indice de cible traduisant sa capacité à renvoyer l'énergie acoustique reçue, *NB* le niveau de bruit ou de réverbération, *GD* le gain de directivité dû à la structure d'antenne du système, *GT* le gain de traitement associé au signal et au récepteur utilisés, et *ID* l'indice de détection.

En passif, l'équation se simplifie en :

$$BR - PT - NB + GD + GT > ID$$

où *BR* est le niveau de bruit rayonné par la cible, *PT* est la perte de propagation en aller simple ; les termes liés à l'indice de cible et à la réverbération disparaissent.

Indice de détection

Il traduit la qualité de l'opération effectuée par le récepteur. S'il s'agit d'une action de stricte détection, le récepteur compare la valeur de l'amplitude du signal en sortie avec un seuil, fonction du niveau de bruit : en cas de dépassement de ce seuil, il y a alors décision de détection. L'indice de détection est imposé par deux paramètres, la probabilité de détection (*pd*) et celle de fausse alarme (*pfa*) : le premier traduit la probabilité que le niveau de signal dépasse celui du seuil de décision pris en compte dans le système ; le second est la probabilité qu'un pic de bruit dépasse le seuil et soit donc confondu avec un signal. L'étude des relations entre *pd, pfa* et le rapport signal/bruit est l'objet de la *théorie de la détection*. Un des résultats les plus probants en est représenté par les *courbes COR* (caractéristiques opérationnelles du récepteur), jeux d'abaques qui permettent de relier ces trois paramètres dans diverses configurations. Dans le cas de la détection d'un signal stable dans un bruit gaussien (le plus généralement retenu), on montre que l'indice de détection est donné par :

$$\sqrt{d} = 2\left[erf^{-1}(1-2p_d) - erf^{-1}(1-2p_{fa})\right]$$

où *erf* est la *fonction d'erreur* classique (intégrale d'une gaussienne). Noter que l'on doit, dans l'équation du sonar exprimée en dB, considérer 5 log*d* en traitement non cohérent et 10 log*d* en traitement cohérent.

Performance en estimation de paramètres

Un système ASM ne se limite en général pas à une simple détection, mais effectue également *l'estimation* de certains paramètres, qui peuvent être :

- la distance système-cible : elle est mesurée en actif à partir de la durée du trajet aller-retour du signal, en passif à partir des différences de temps d'arrivée sur plusieurs capteurs séparés ;
- la vitesse de la cible : elle est mesurée en sonar actif grâce au décalage Doppler du signal rétrodiffusé ;
- la position angulaire à l'aide des possibilités de directivité des antennes de réception.

La précision de mesure de ces différentes grandeurs dépend évidemment des caractéristiques du signal utilisé (par exemple la résolution temporelle) et des performances du système récepteur (par exemple la fonction de directivité) ; mais le signal étant très généralement bruité, le résultat de la mesure est en fait à considérer comme une grandeur aléatoire (fig. 38).



Fort R.S/B - Bonne estimation

Faible R.S/B - Estimation biaisée

Figure 38 - Erreur d'estimation de temps dans le cas d'un signal bruité.

La *théorie de l'estimation des paramètres* permet de définir dans leur généralité les limites de précision obtenues en fonction du rapport signal/bruit. Un des principaux résultats en est qu'un paramètre estimé à partir d'un signal bruité est sujet à une variance fonction du rapport signal à bruit. Une borne absolue de cette variance peut être donnée théoriquement (*borne de Cramer-Rao*) ; elle représente l'optimum de précision possible pour un rapport signal/bruit donné. Par exemple, dans le cas d'une mesure de temps, l'expression de cette limite de précision de mesure est donnée par la formule classique suivante (dite *formule de Woodward*) :

$$\text{var}(\tau) = \frac{1}{2\pi d B_e^2}$$

où d est le rapport signal à bruit considéré et B_e la bande efficace du signal.
La contrainte de précision de mesure est prioritaire pour toutes les applications impliquant avant tout des mesures précises de temps (bathymétrie, systèmes de positionnement, tomographie). Plutôt que des critères de détection, c'est alors la formule de Woodward qui permet de définir le rapport signal/bruit minimum de bon fonctionnement du système.

Deux archétypes de systèmes ASM : le sondeur et le sonar latéral

Le sondeur de bathymétrie et de pêche

Structure

Un sondeur est destiné à mesurer la hauteur d'eau et à détecter des bancs de poissons, en utilisant les temps de trajet des signaux rétrodiffusés sur le fond ou en pleine eau. Les opérations qu'il doit effectuer sont donc l'émission d'un signal bref, la réception de l'écho correspondant et sa détection, la mesure du temps de propagation converti en distance parcourue, et la visualisation de la hauteur d'eau ainsi évaluée. Il se compose donc :

- d'une électronique d'émission destinée à la mise en forme du signal, son amplification et sa synchronisation ,
- d'un transducteur directif, orienté en général verticalement vers le bas, destiné tant à l'émission qu'à la réception ,
- d'une électronique de réception (filtrage passe bande, quadration, intégration) et de mesure du temps de propagation (datation et détection de l'écho de fond) et
- d'un système de présentation des échos ainsi obtenus (rouleau de papier sur les modèles les plus anciens, écran cathodique aujourd'hui, voire simple affichage numérique du résultat de la mesure de sonde sur les modèles grand public).

L'électronique d'émission commence par le séquencement de signaux (qui sont en général de type *ping*), centrés sur des fréquences très variables (de 12 kHz pour les modèles grands fonds jusqu'à 200 kHz pour les systèmes petits fonds) et de durée assez courte pour permettre une résolution acceptable. Une durée de l'ordre de la milliseconde est en général convenable : moins par petits fonds pour améliorer la

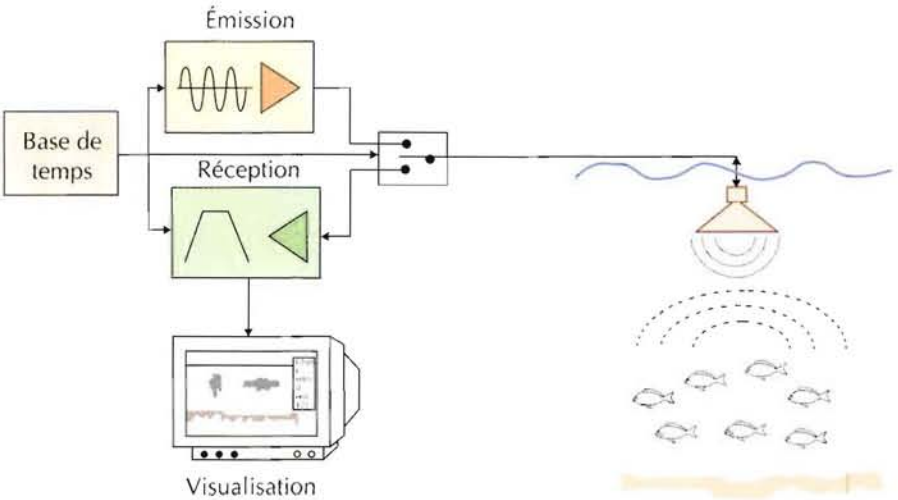


Figure 39 - Schéma synoptique d'un sondeur.

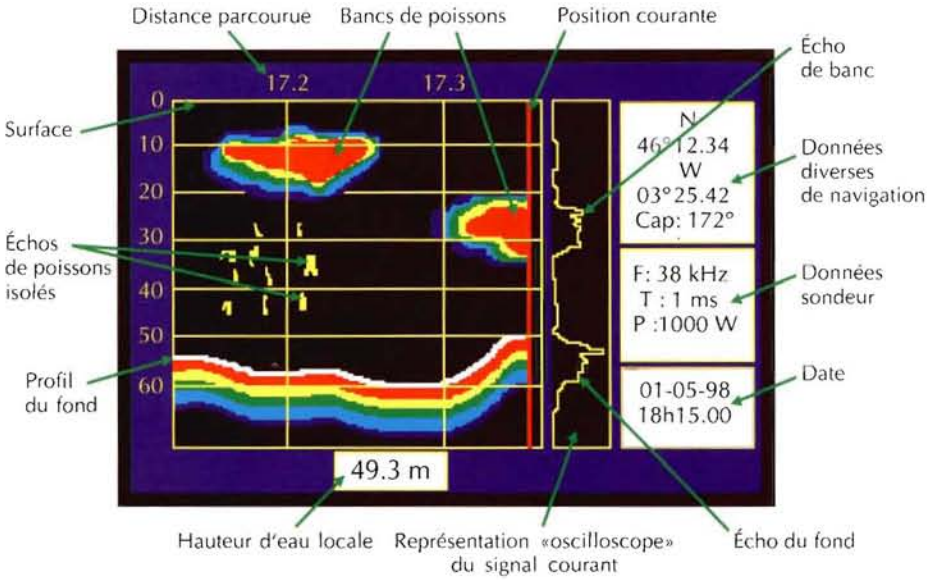


Figure 40 - Exemple type de visualisation d'un sondeur monofaisceau bathymétrique ou de pêche. Les lignes verticales correspondant à des émissions successives du signal permettent de constituer une coupe verticale de la tranche d'eau parcourue par le navire. Le sondeur étant souvent couplé aux autres systèmes de navigation du bord, les données correspondantes peuvent ainsi être présentées à l'utilisateur, ainsi que les paramètres de réglage du sondeur.

résolution, et plus en très grands fonds pour augmenter l'énergie totale disponible et donc la portée. Le séquencement de ces signaux est dicté par la configuration des mesures : un nouveau signal est émis après réception de l'écho du signal précédent pour éviter les ambiguïtés, donc avec une récurrence $T>2H/c$. Les cadences typiques sont de l'ordre de la seconde, jusqu'à quelques émissions par seconde. Le signal ainsi conditionné passe par un amplificateur de puissance, qui peut délivrer jusqu'à plusieurs centaines de watts.

Le transducteur sert le plus souvent à la fois à l'émission et à la réception. Il se compose d'un disque ou d'un rectangle de céramique, dont les technologies de fabrication peuvent être diverses (céramique unique, ou assemblage de petits transducteurs élémentaires). Il est installé sous la coque du navire, sa face parlante (convenablement protégé par un revêtement à la fois résistant et transparent acoustiquement) épousant la forme de celle-ci, dans une zone choisie de manière à éviter autant que possible le bruit d'hélice d'une part et les perturbations hydrodynamiques et les nuages de bulles crées par l'étrave d'autre part. Les diagrammes de directivité des transducteurs ont une ouverture de quelques degrés (typiquement une dizaine). Les niveaux atteints à l'émission sont en général supérieurs à 200 dB/µPa/1m et peuvent atteindre 230 à 240 dB/µPa/1m.

L'électronique de réception est souvent de structure simple : elle est en général basée sur la détection non cohérente décrite plus haut, complétée par un dispositif

de TVG. Certains systèmes particuliers (sondeurs de sédiments) utilisent des signaux modulés et du traitement cohérent. Les opérations de réception doivent être synchronisées avec l'émission, de manière à ne commencer qu'après la fin de l'émission (puisque c'est le même transducteur qui est utilisé en émission et en réception ; d'ailleurs même un récepteur distinct de l'émetteur serait saturé par le fort niveau du signal au cours de la phase d'émission).

La détection de l'écho de fond est effectuée par dépassement d'un seuil à l'intérieur d'une fenêtre temporelle qui est soit imposée par l'opérateur soit réactualisée automatiquement par le système. L'instant d'arrivée est alors mesuré, selon un algorithme basé en général sur la détection de la moitié du front de montée du signal, et est converti en distance, le plus souvent simplement par $H = ct/2$ avec une valeur moyenne c de la célérité sur la hauteur d'eau. La valeur ainsi mesurée peut être simplement affichée sur un cadran numérique. De manière plus élaborée, l'ensemble du signal rétrodiffusé au cours du temps peut être visualisé, le signal correspondant à chaque *ping* étant juxtaposé au précédent. Le graphe ainsi obtenu (fig. 40) représente donc une vue en coupe du profil du fond et de la tranche d'eau, aux distorsions horizontales près dues à la navigation du navire. L'intérêt supplémentaire est de pouvoir faire figurer les échos de cibles situées en pleine eau.

Le sonar latéral

Principe

Un sonar latéral a pour fonction de constituer des images acoustiques détaillées des fonds marins. Le principe est très simple et ingénieux : un faisceau sonore étroit est émis avec une incidence rasante et intercepte le fond selon une fine bande s'évasant avec la distance. À l'intérieur de cette zone, le signal émis, très court, délimite une zone insonifiée de très faible dimension qui balaie progressivement toute la zone couverte. L'écho ainsi recueilli au cours du temps est une représentation de la réflectivité du fond et surtout de la présence d'irrégularités ou de petits obstacles qui sont « vus » par le signal très résolvant. Ce signal, enregistré latéralement à la direction d'avancée du sonar (*side-scan sonar*), est juxtaposé aux signaux successifs déjà obtenus par le sonar pendant son avancée constituant ainsi, ligne après ligne, une véritable « image acoustique du fond ».

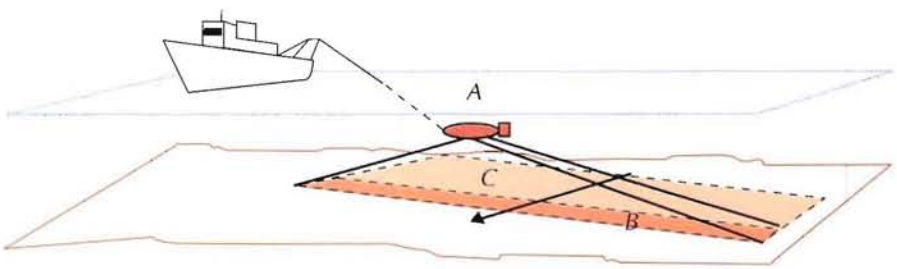


Figure 41 - Mise en œuvre d'un sonar latéral - A : poisson remorqué - B : surface insonifiée instantanée - C : surface couverte par les émissions précédentes.

Structure

Le système est basé sur l'utilisation d'antennes de géométrie rectangulaire très allongée, créant une directivité largement ouverte dans le plan vertical (plusieurs dizaines de degrés, pour insonifier largement en distance transversale tout en évitant la surface de la mer) et très étroite dans le plan horizontal (pour avoir un faisceau très résolvant, en général de l'ordre de 1° voire moins). De telles antennes sont installées de part et d'autre d'un « poisson » performant du point de vue hydrodynamique et remorqué près du fond, ce qui assure une bonne stabilité lors du déplacement et une faible rasance aux signaux émis.

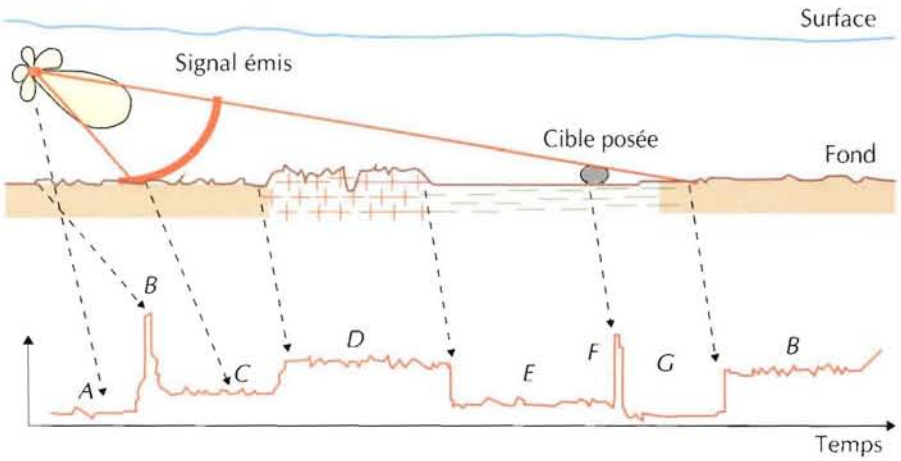


Figure 42 - Fonctionnement d'un sonar latéral - A : bruit et réverbération dans l'eau - B : premier écho de fond- C : zone de sable - D : roche- E : vase - F : écho de cible - G : ombre portée par la cible.

Les fréquences employées sont en général élevées (typiquement de l'ordre de la centaine de kHz), ce qui assure les caractéristiques de directivité recherchées pour des antennes de taille raisonnable, et une bonne résolution en distance, de quelques centimètres. Les portées sont de ce fait limitées à quelques centaines de mètres. Le traitement des signaux mis en œuvre est très simple dans le principe. Le plus souvent aucun traitement d'antenne n'est à effectuer, la géométrie des antennes suffisant à assurer les caractéristiques recherchées. La structure du récepteur est du même type que pour un sondeur.

Correction géométrique

La structure spatio-temporelle des signaux reçus (fig. 42) est un peu particulière et mérite une rapide analyse. Le signal émis se propage d'abord dans l'eau ; l'écho proprement dit ne commence à se former que lorsque l'impulsion a frappé le fond à la verticale du sonar. Ceci correspond à l'arrivée d'un premier écho très intense, qui n'est pas exploitable pour constituer l'image mais qui est utile pour l'estimation de l'altitude du sonar sur le fond. Le signal explore ensuite la zone proche de la verticale ; cette première partie, de forte réflectivité et de médiocre résolution spatiale

horizontale, est en général de mauvaise qualité. Enfin l'incidence du signal devient suffisamment rasante ; le signal recueilli est alors vraiment exploitable pour l'imagerie. Un problème évident se pose alors pour reconstituer une « carte du fond » : le temps écoulé et la distance sur le fond ne sont pas proportionnels ; des échantillons temporels équidistants ne correspondent pas à un échantillonnage régulier du fond. Pour replacer les échantillons temporels de manière spatialement correcte, on doit donc appliquer une correction géométrique, qui se ramène à une simple relation trigonométrique si le fond est plat et horizontal. Lorsque ce n'est pas le cas, la réalisation d'une image correcte demande soit de faire des hypothèses simples *a priori* sur la topographie (fond plan en pente...) soit de compléter le relevé sonar par des mesures de bathymétrie.

Ombres

Un effet très intéressant est la formation des « ombres » portées sur le fond. Un obstacle de dimension suffisante intercepte une partie du secteur angulaire vertical émis, et interdit donc la rétrodiffusion par le fond au cours des instants normalement associés à ces angles ; l'écho reçu sera donc de très faible niveau pendant une durée dépendant de l'angle de rasance et de la hauteur de l'objet masquant. Ceci se traduit par l'apparition sur l'image sonar d'une « ombre » de forme correspondant à celle de l'objet, et dont l'analyse permettra une estimation de la taille et de la forme de ce dernier. Ce phénomène est d'un grand intérêt pour toutes les applications de recherche et d'identification d'objets posés sur le fond (mines et épaves), voire même pour l'évaluation de certaines échelles de relief du fond.

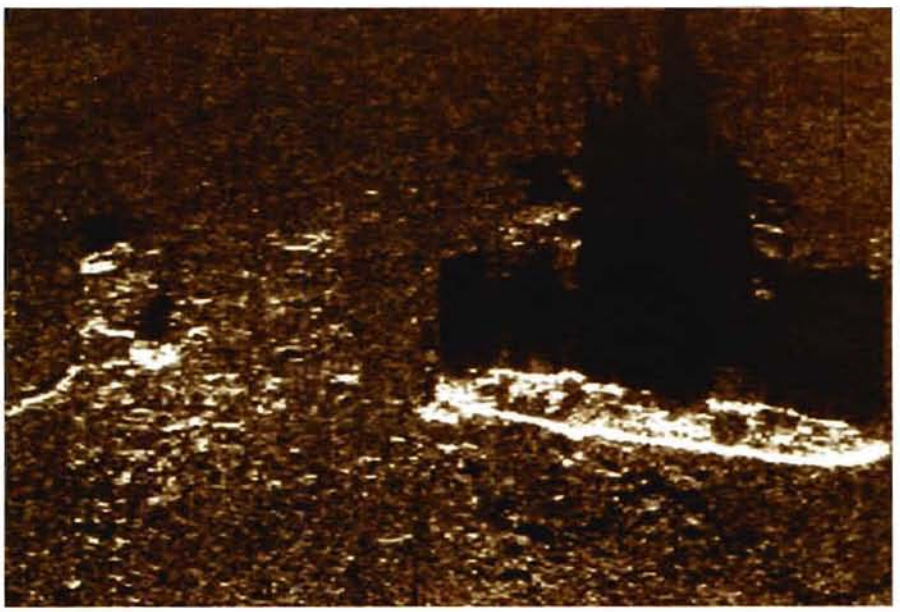


Figure 43 - Imagerie par sonar latéral d'une épave de navire sur un fond sédimentaire. L'ombre acoustique est très nettement visible, et reproduit bien la silhouette du navire.

Chapitre IV

Applications de l'acoustique sous-marine

Navigation

Les problèmes de navigation et de sécurité (mesure de la sonde, de la vitesse, évitement d'obstacles) ont été à l'origine du développement de l'acoustique sous-marine et ont suscité la conception de nombreux systèmes (balises, sondeurs, lochs, sonars...). Même si ces types d'applications peuvent sembler marginaux aujourd'hui en terme d'innovation technologique, et sont éventuellement supplantés par d'autres techniques, ils constituent un domaine d'activité toujours dynamique.

Balisage

Des dispositifs acoustiques ont été longtemps utilisés pour la signalisation sous-marine, de zones en général dangereuses pour la navigation : une bouée peut émettre simultanément un signal acoustique (sous-marin ou aérien) et un signal optique ou hertzien ; la différence des deux instants d'arrivée, due aux célérités différentes, permet aux observateurs équipés des récepteurs adéquats de mesurer leur distance par rapport au point signalisé.
De manière plus simple, on utilise des émetteurs acoustiques autonomes dits *marqueurs acoustiques* ou *pingers* pour signaler une épave ou un véhicule sous-marin, ou participer au positionnement d'un système immergé. Ces marqueurs permettent de localiser assez facilement le dispositif qu'ils équipent ; par exemple on peut mesurer l'altitude, par rapport au fond, d'un dispositif équipé d'un *pinger* et immergé depuis un navire, en évaluant le retard entre le signal direct et le signal réfléchi par le fond.

Sondage

Les sondeurs bathymétriques de navigation et de cartographie sont certainement les systèmes acoustiques sous-marins les plus courants, toutes applications confondues ; leur principe de fonctionnement a déjà été présenté dans le chapitre précédent. Les fréquences les plus utilisées vont de la dizaine de kilohertz à quelques centaines de kilohertz, en fonction de la hauteur d'eau à explorer. Il est évident que les systèmes courants s'accommodent de faibles portées correspondant à une utilisation dans des zones où la hauteur d'eau pose effectivement un problème de sécurité de navigation, alors que les sondeurs à basses fréquences sont plutôt réservés aux relevés cartographiques et à l'océanographie. Les sondeurs les plus simples sont désormais du domaine de l'électronique grand public, et sont largement utilisés pour la navigation de plaisance. Soumis à des normes de précision très strictes, les relevés de cartes bathymétriques destinées à la navigation en zones littorales, dans les ports et les estuaires sont effectués avec des sondeurs multifaisceaux spécialisés.

Mesure de vitesse

Les *lochs Doppler* estiment la vitesse de leur porteur relativement au milieu environnant à partir de la mesure du décalage de fréquence des échos rétrodiffusés. Le milieu de référence peut être le fond, si la hauteur d'eau est assez faible : c'est le

cas le plus favorable, permettant la navigation la plus précise ; dans le cas contraire, le signal est rétrodiffusé par la masse d'eau elle-même, et la navigation doit alors être corrigée du courant.

Ces systèmes à très hautes fréquences (plusieurs centaines de kHz jusqu'au MHz) comportent plusieurs faisceaux d'orientations différentes dans le plan horizontal, afin de pouvoir déterminer les coordonnées spatiales de la vitesse. Ils sont actuellement surtout utiles sur les submersibles ; les navires de surface ont aujourd'hui d'autres moyens précis de navigation (tel le *GPS-Global Positioning System-* par satellite).

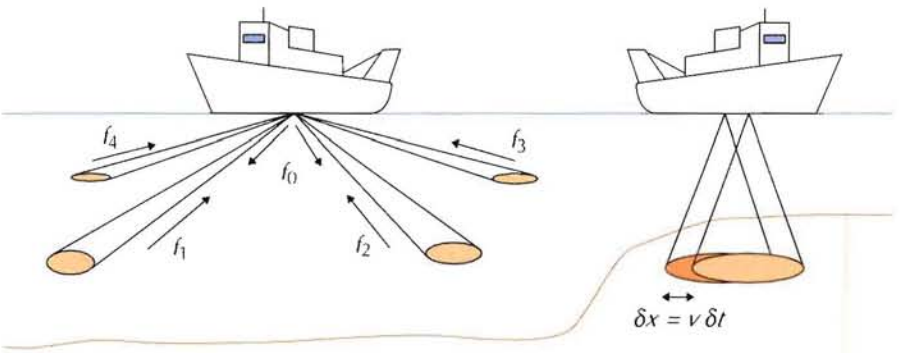


Figure 44 - Loch Doppler (à gauche) : les fréquences décalées reçues dans les faisceaux permettent de déterminer les composantes de la vitesse - Loch à corrélation (à droite) : le retard δt entre les signaux des deux faisceaux est fonction de l'écartement δx des capteurs et de la vitesse v.

Les *lochs à corrélation* utilisent les échos du fond reçus individuellement sur les capteurs d'une antenne horizontale. Le principe de mesure est que la structure du signal reçu par un élément « avant » de l'antenne se retrouve, lors de l'avancée du porteur, reçue par un élément « arrière » avec un retard fonction de la vitesse de déplacement et de l'écartement des deux capteurs. Le calcul de la corrélation entre les deux signaux permet une estimation de ce retard, qui est alors utilisé pour le calcul de la vitesse (fig. 44).

Évitement d'obstacles

Les sous-marins et engins d'exploration sous-marine sont fréquemment équipés d'un *sonar d'évitement d'obstacle*. Fonctionnant en balayage panoramique dans un large secteur angulaire et à fréquence en général très élevée, ces dispositifs sont destinés à détecter, localiser et identifier des obstacles situés à quelques dizaines ou centaines de mètres. Par ailleurs, les sous-marins nucléaires appelés à naviguer sous la glace sont équipés de sondeurs de banquise fonctionnant en émission vers le haut.

Applications militaires

Sonars passifs

Les systèmes sonar militaires passifs destinés à la détection/localisation/identification des sous-marins fonctionnent dans le domaine des très basses fréquences, entre quelques dizaines de hertz et quelques kilohertz. C'est en effet dans cette gamme que l'énergie acoustique rayonnée par les navires est la plus importante (en particulier les raies spectrales caractéristiques, personnalisant les bruiteurs et exploitées pour leur identification) et c'est également en basses fréquences que les portées de détection sont les plus importantes. Installés à bord des sous-marins et des navires de surface spécialisés, ces systèmes sont caractérisés par la mise en œuvre *d'antennes linéaires remorquées* (dites *flûtes*) de grande longueur (quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres), capables de détecter et de localiser de façon efficace des bruiteurs basses fréquences. Technologiquement, ces antennes sont constituées d'un tuyau souple contenant les hydrophones de réception (jusqu'à plusieurs centaines), l'électronique de préamplification et le câblage correspondant ; elles sont stockées et mises en œuvre à l'aide de treuils spécifiques. Outre l'intérêt représenté par leur taille, qui leur permet d'atteindre d'excellentes performances en gain de rapport signal à bruit et en résolution angulaire, ces antennes remorquées à une distance suffisante permettent de s'affranchir efficacement du bruit généré par le navire porteur.

D'autres types d'antennes sont employés plus particulièrement sur les sous-marins : sphères ou cylindres installés dans l'étrave et antennes latérales conformes épousant la surface de la coque ou du kiosque. Utilisées en complément de l'antenne linéaire remorquée, ces antennes interviennent surtout dans les opérations de localisation.

Localisation

Au-delà de la détection, un sonar passif doit pouvoir localiser le bruiteur-cible. Cette fonction est assurée par l'exploitation de la structure spatiale des signaux reçus sur les antennes du système. La mesure de la direction dans le plan horizontal est effectuée très précisément par formation de voies sur les antennes de réception, en particulier la flûte remorquée qui est très bien adaptée à cette fonction ; les angles dans le plan vertical sont estimés à l'aide des autres types d'antennes. La mesure de distance à la cible, banale en sonar actif, est évidemment beaucoup plus difficile à réaliser en passif. Une première méthode consiste à mesurer le déphasage ou le retard entre les signaux reçus en divers points d'une antenne, ou entre des antennes espacées : la mesure de différence de trajets ainsi effectuée permet de remonter par triangulation à la position du bruiteur. Une autre solution est de mesurer les retards entre les trajets multiples selon lesquels arrive le signal détecté : une reconstruction géométrique du champ sonore permet d'en déduire, là aussi, la position du bruiteur. Les navires de surface effectuant des localisations en mode passif sont favorisés par l'emploi qu'ils peuvent faire des informations fournies par des avions ou des hélicoptères spécialisés venant disposer sur la zone des capteurs supplémentaires.

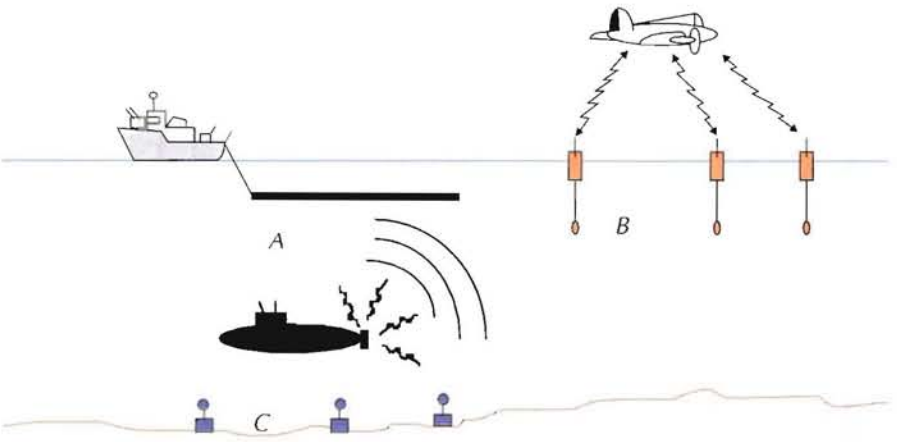


Figure 45 - Configuration de systèmes de détection passive - A : antenne linéaire remorquée - B : bouées aéroportées - C : réseau permanent de surveillance.

Identification

L'identification de la cible est aussi une fonctionnalité essentielle des sonars passifs, et peut-être celle qui impressionne le plus le grand public ; elle est en effet souvent effectuée « à l'oreille » par des opérateurs supérieurement entraînés, dont la finesse de diagnostic permet de reconnaître à partir de leur bruit rayonné non seulement des classes de navires, mais jusqu'aux individus d'une même classe ! Ces spécialistes - dont la formation et les connaissances font évidemment l'objet du plus grand secret - sont secondés d'une part par des appareils de prétraitement des signaux (filtrage, transposition de fréquence) et d'autre part de plus en plus souvent par des systèmes automatisés fonctionnant en général à partir d'une analyse spectrale très fine. Le traitement effectué le plus couramment en sonar passif est le *Lofar*, qui consiste à représenter en fonction du temps l'évolution du spectre du bruit analysé (appelé *sonogramme* dans d'autres domaines de l'acoustique). Le cumul ainsi réalisé au cours du temps, après élimination du bruit large bande, permet de faire apparaître, dans le bruit rayonné par la cible, la présence des raies spectrales caractéristiques et leur évolution. De manière générale, les systèmes automatisés sont plus efficaces sur les signaux stables à structure harmonique assez bien marquée et les opérateurs humains sont plus performants sur les signaux instables ou impulsionnels.

Intercepteurs

Les intercepteurs sonar sont des systèmes passifs spécialisés, fonctionnant en détection des signaux actifs émis par l'adversaire et permettant donc d'identifier et de localiser un sonar hostile bien avant que celui-ci puisse être en mesure de détecter. Le même principe est largement utilisé en radar aérien - la détection de la surveillance radar ennemie est vitale pour les avions militaires - et sur les routes par les automobilistes voulant déjouer les contrôles de vitesse. Les intercepteurs installés sur les sous-marins comportent des antennes spécialisées et des systèmes de traitement très performants permettant, outre la localisation et l'identification, la possibilité de réémettre des *leurres* induisant en erreur le sonar hostile. Ils sont spécialement utiles - et vitaux - pour la détection des signaux d'autodirecteurs actifs de torpilles.

Réseaux de surveillance

Les systèmes fixes de surveillance passive de zones maritimes peuvent être rattachés à la catégorie des sonars passifs. De tels réseaux, comportant des antennes gigantesques, ont été systématiquement mis en place par les États-Unis pendant la guerre froide (réseau *SOSUS*) le long de leurs côtes et dans les zones de passage obligé de la flotte sous-marine adverse.

Systèmes aéroportés

Les bouées utilisées par les avions et hélicoptères de lutte anti-sous-marine fonctionnent aussi le plus souvent en détection passive. Ce sont des systèmes écouteurs autonomes, retransmettant par ondes radio les signaux sous-marins reçus. Leur déploiement permet de constituer un véritable réseau temporaire de surveillance locale. L'intérêt de ces dispositifs est leur souplesse de mise en place ainsi que leur faible niveau de bruit propre. Leurs médiocres performances d'antennes individuelles dues à leurs faibles dimensions sont compensées par leurs potentialités de localisation de cible lorsqu'ils sont disposés en réseau.

Mines et torpilles

Les mines à déclenchement acoustique sont équipées d'un système automatique de détection de bruit de navire qui commande la mise à feu après des opérations d'analyse plus ou moins sophistiquées de la signature acoustique de la cible ; ces dispositifs sont souvent complétés par des détecteurs magnétiques. De même, les torpilles peuvent être équipées d'un système autodirecteur passif leur permettant de remonter vers la source de bruit de la cible, c'est-à-dire son système propulseur.

Sonars actifs

Les sonars actifs des bâtiments de surface sont affectés, en fonction de leurs caractéristiques, à des tâches spécialisées de veille, de localisation ou d'identification. Les fréquences utilisées ont décru au fil des années, passant de quelques dizaines de kHz à la gamme des kHz, pour se situer aujourd'hui autour du kHz. Les transducteurs sont installés soit dans un dôme intégré à la coque, situé sous celle-ci ou dans le bulbe d'étrave, soit dans un *poisson* remorqué à des immersions variables. Un sonar émettant près de la surface étant très tributaire des conditions locales de propagation, l'intérêt de l'emploi d'un poisson immergé remorqué est de pouvoir s'affranchir au mieux des phénomènes de zones d'ombre dus au profil de célérité. Une autre solution pour échapper aux zones d'ombre est d'émettre depuis le navire avec une incidence très oblique et d'utiliser des trajets réfléchis sur le fond.

Les émetteurs de sonar actif mettent en jeu de fortes puissances d'émission, pour atteindre des niveaux de l'ordre de 240 dB/1µPa à 1 m, nécessitant des transducteurs de taille d'autant plus importante que la tendance de l'évolution des systèmes est l'utilisation de fréquences de plus en plus basses, pour augmenter les portées de détection et contrebalancer les progrès des *revêtements anéchoïques* des submersibles (destinés à absorber les ondes sonores incidentes). De plus, le procédé de compression d'impulsion est appliqué systématiquement en détection pour augmenter encore la puissance utile et améliorer les portées. Les signaux générés sont de plusieurs types : soit modulés, en général en fréquence, pour la détection et la mesure de distance, soit à bande étroite pour l'estimation du Doppler et donc de la vitesse de la cible. La réception est effectuée soit sur l'antenne d'émission elle-même, si sa taille permet une résolution angulaire suffisante, soit sur une flûte remorquée. Cette dernière solution se généralise avec l'utilisation actuelle de sonars

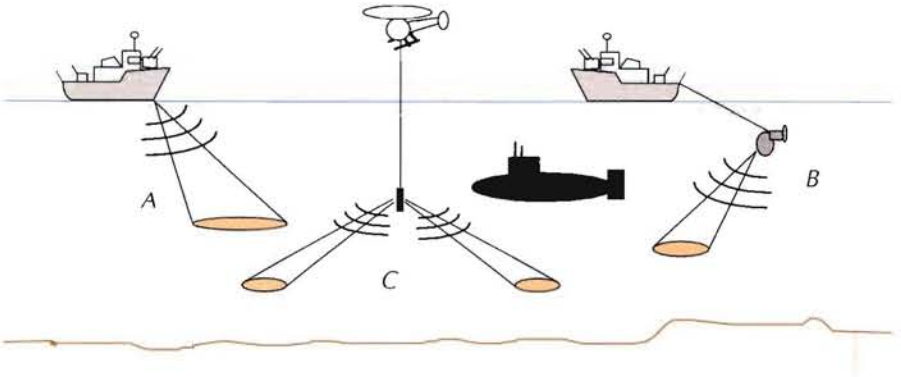


Figure 46 - Configuration de systèmes de détection active - A : sonar de coque - B : sonar sur poisson remorqué - C : sonar d'hélicoptère.

actifs TBF (très basse fréquence, de l'ordre de 1 kHz) nécessitant des dimensions d'antennes compatibles avec les exigences des sonars passifs, le même matériel pouvant alors être employé pour les deux modes de détection. Par ailleurs, des sonars actifs trempés sont mis en œuvre par les hélicoptères de lutte anti-sous-marine ; leur rapidité de déplacement sur une zone et leur souplesse d'utilisation en immersion les rendent très performants. Les sous-marins sont également pourvus de sonars actifs ; toutefois ils évitent soigneusement de les utiliser, pour raison de discrétion ! Enfin les torpilles sont souvent équipées d'un système autodirecteur actif leur permettant de localiser leur cible.

Guerre des mines

La redoutable efficacité des mines sous-marines a conduit au développement d'une catégorie particulière de sonars actifs spécialisés pour la guerre des mines. Ces systèmes, fonctionnant à très hautes fréquences (plusieurs centaines de kilohertz), fournissent des images acoustiques des fonds avec une définition extrêmement fine et sont mis en œuvre par des navires spécialement conçus et équipés.

Les systèmes dits *de chasse* sont destinés à la détection et à l'identification des cibles posées sur le fond ou installées en pleine eau. Mis en œuvre sur une coque de navire ou un poisson autopropulsé, ils effectuent un balayage angulaire du fond et de la colonne d'eau, vers l'avant du navire. La classification de la cible détectée (opération cruciale dont le but est de décider s'il s'agit vraiment d'une mine...) fait appel à l'analyse de l'ombre portée sur le fond.

Les sonars *de surveillance* sont des sonars latéraux remorqués, à très hautes performances. Ils fournissent des images du fond très détaillées mais ne permettent pas d'assurer la sécurité du navire porteur.

Enfin, la destruction des mines à déclenchement acoustique peut également faire l'objet d'utilisation de systèmes acoustiques émettant des signaux simulant des bruits rayonnés de navires (*dragues acoustiques*).

Acoustique et pêche

La pêche est une activité maritime utilisant intensivement les techniques d'acoustique sous-marine. Les navires modernes de pêche industrielle ou artisanale sont toujours largement équipés de systèmes sonars, de même que les navires océanographiques spécialisés en halieutique. La fonction première des équipements acoustiques pour la pêche est de détecter et localiser les bancs de poissons et d'aider aux opérations de capture. Les applications à caractère plus scientifique concernent l'identification des espèces et l'évaluation de l'importance quantitative de la biomasse.

Sondeurs et sonars de pêche

Le sondeur est l'outil acoustique de base pour la pêche. Il émet à la verticale du navire porteur et permet donc de détecter et de localiser les bancs de poissons, voire les cibles individuelles, situés sous le navire. Les caractéristiques acoustiques principales d'un sondeur de pêche standard sont les mêmes que celles d'un système bathymétrique. Toutefois de forts niveaux d'énergie sont nécessaires à l'émission, du fait du faible indice de rétrodiffusion des cibles. Le traitement et la visualisation des échos sur l'ensemble de la hauteur d'eau sont impératifs. Différentes fréquences sont souvent utilisées pour couvrir des hauteurs d'eau variées et sont éventuellement proposées dans un seul système multifréquence ; les fréquences couramment employées sont comprises entre 20 kHz et 200 kHz. Les caractéristiques de résolution angulaire et temporelle sont typiquement de l'ordre de 10° et de la milliseconde.
Les échos obtenus avec un sondeur de pêche (fig. 47) montrent des taches très intenses, représentant des bancs à forte densité de population dont les dimensions typiques sont de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. La nuit les bancs se dispersent et l'échogramme présente des nuages de petites taches faibles et diffuses correspondant à des échos individuels. La compréhension élémentaire des échogrammes est assez simple. Toutefois leur analyse fine requiert une grande habitude et les causes d'erreurs d'interprétation sont multiples.

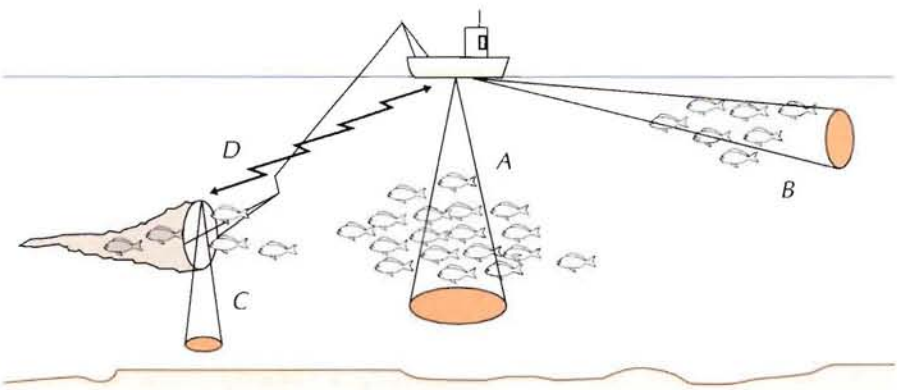


Figure 47 - Équipement acoustique d'un navire de pêche : A sondeur - B sonar - C netsonde - D positionnement de chalut et télécommandes.

Les sonars de pêche sont des systèmes beaucoup plus complexes et coûteux que les sondeurs ; ils effectuent la détection et la localisation des bancs dans le plan horizontal, ce qui permet évidemment une prospection beaucoup plus efficace. Ils comprennent une antenne effectuant une surveillance panoramique à partir de voies formées de quelques degrés d'ouverture ; ces voies sont souvent inclinables dans le plan vertical (directivité « en parapluie »), ce qui accroît les possibilités de localisation de la cible. Ils fonctionnent à des fréquences légèrement plus basses que les sondeurs (typiquement 20 à 80 kHz) et leur portée peut atteindre quelques kilomètres. Ils fournissent une quantité d'informations beaucoup plus conséquente que les sondeurs et sont soumis à des phénomènes physiques perturbateurs plus complexes (réverbération par la surface ou le fond) ; leurs données sont beaucoup plus difficiles à interpréter et à exploiter que celles des sondeurs.

Équipement des engins de pêche

Les chaluts sont équipés d'un sondeur de type particulier, dit *netsonde*. Ce système est installé à l'entrée de la poche du chalut, sur la *corde de dos*, et émet vers le bas ; il permet de visualiser instantanément la position et l'ouverture du chalut et, en même temps, de détecter et d'évaluer les prises entrant dans le filet. Ces données sont transmises à bord, soit par un câble électrique spécial, soit par liaison acoustique ; exploitées instantanément, elles sont évidemment de la plus grande importance lors des opérations de pêche. Les chaluts peuvent également être équipés de systèmes acoustiques de positionnement, permettant de les localiser par rapport au navire porteur, ainsi que de systèmes de télécommande acoustique permettant, par exemple, de provoquer la fermeture d'une partie de la poche.

Utilisation scientifique

Au-delà de leur emploi par les professionnels de la pêche, les systèmes acoustiques sous-marins sont des outils précieux pour la communauté scientifique étudiant la biomasse. La première application consiste à évaluer quantitativement les populations de poissons. En présence de poissons dispersés, ceci s'effectue par comptage des échos individuels détectés. Cette mesure nécessite une résolution spatiale du sondeur suffisante, ce qui amène à l'utilisation de transducteurs spécifiques (faisceau scindé *split-beam* ou dédoublé *dual-beam*) permettant un filtrage angulaire suffisamment fin. La détection des échos individuels permet par ailleurs d'accéder à la mesure de leur indice de cible.

En présence de bancs ou de couches denses de poissons, la technique de mesure est celle de l'*écho-intégration*, qui consiste à évaluer quantitativement la biomasse présente sur une zone à partir du cumul de l'énergie acoustique réverbérée par l'ensemble des cibles présentes sur la zone échantillonnée et de la connaissance des indices de cibles individuelles ; cette dernière peut être obtenue par exemple à partir des mesures sur la même population dispersée. Cette technique d'apparence très simple nécessite toutefois beaucoup de précautions d'emploi, tant en ce qui

concerne l'instrumentation utilisée (calibration du sondeur) que la méthodologie employée. De plus, le principe de la proportionnalité entre l'énergie totale et le nombre de cibles n'est pas toujours valable (effets de masquage ou de diffusion multiple à l'intérieur du banc) et doit dans certains cas être corrigé. L'écho-intégration est couramment utilisée pour la surveillance des stocks de poissons à des fins scientifiques ou économiques, lors de campagnes de mesures menées par des navires océanographiques spécialisés.

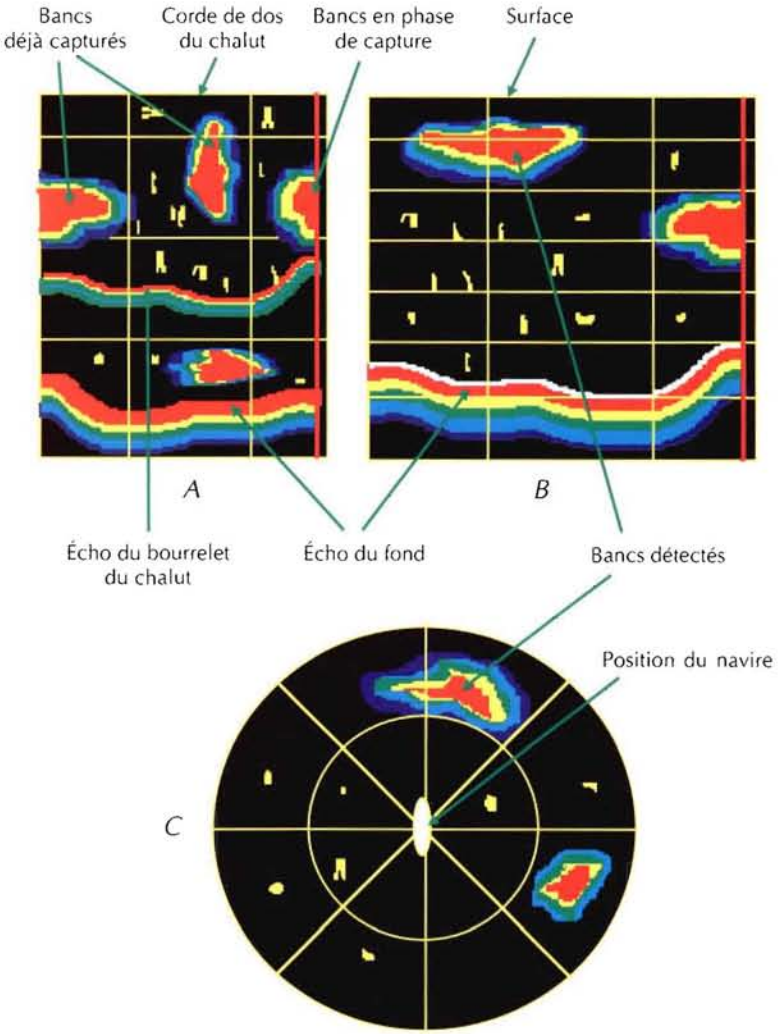


Figure 48 - Visualisations associées aux différents systèmes sonar utilisés en pêche. (A) Netsonde : on visualise la tranche d'eau située sous la corde de dos du chalut, faisant apparaître les captures entrant dans la poche, dont l'ouverture est délimitée par l'écho du bourrelet inférieur. (B) Sondeur : cette représentation, la plus courante, permet de faire apparaître les cibles passant à la verticale du navire. (C) Sonar panoramique : les cibles sont détectées et présentées dans un plan horizontal, de manière analogue à un radar de surveillance aérienne.

En plus de la mesure du nombre d'individus, il est évidemment intéressant de déterminer leur espèce, tant pour la surveillance et la gestion des populations que pour l'application de stratégies de pêche sélective par les professionnels. Les signaux acoustiques permettent dans une certaine mesure d'aider à cette identification des espèces à partir soit des caractéristiques des échos élémentaires, soit des paramètres associés à la structure et au comportement des bancs. Les recherches dans ce domaine sont rendues extrêmement difficiles par la quasi-impossibilité d'effectuer des opérations de validation suffisamment précises sur les cibles en situation réelle. Bien que des résultats intéressants puissent être obtenus en conditions contrôlées, on est encore loin d'une automatisation des opérations d'identification d'espèces sur les sondeurs courants.

Les applications scientifiques évoquées ci-dessus font l'objet de développements technologiques originaux. Les sondeurs monofaisceaux de pêche sont soumis à un certain nombre de limitations, dues en grande partie à la géométrie du faisceau, pénalisant en particulier la détection près du fond et l'estimation de la taille des bancs transversalement au navire. Ces insuffisances peuvent être contournées par l'utilisation de systèmes multifaisceaux analogues à ceux utilisés en bathymétrie, mais qui doivent traiter les signaux provenant de toute la colonne d'eau. Par ailleurs, le contenu spectral assez pauvre des signaux usuels à bande étroite les rend peu aptes aux opérations d'identification d'espèces. Il est vraisemblable que la recherche halieutique s'orientera vers l'utilisation de sondeurs multifaisceaux et à large spectre de fréquences permettant de fournir beaucoup plus d'informations des échos de cibles à partir de méthodes d'analyse spatiale, temporelle et fréquentielle. La modernisation des techniques de pêche industrielle et l'orientation, inévitable à terme, vers des méthodes de pêche sélective, devraient conduire à la diffusion de ces techniques vers le milieu professionnel.

Géologie marine

Les progrès des géosciences marines ont été largement tributaires du développement et de l'utilisation d'outils acoustiques spécialisés. En fonction de leurs types et de leurs performances, ceux-ci peuvent accéder à certaines caractéristiques descriptives du fond : contraste d'impédance entre l'eau et le fond, topographie à des échelles variées allant de la description des grandes structures géophysiques à la texture du microrelief, présence et structures de couches sous-jacentes... Sans pouvoir prétendre supplanter les méthodes directes d'étude du fond mises en œuvre par les géologues, basées sur le prélèvement et l'analyse d'échantillons, les systèmes acoustiques permettent en fait une *observation étendue quasi instantanée* des différences de morphologie de l'interface eau-fond et des strates sédimentaires. Ils sont donc complémentaires des méthodes de prélèvements ponctuels et de mesures géotechniques *in situ* en permettant de généraliser des caractéristiques mesurées localement. Trois types de systèmes acoustiques sont ainsi utilisés très largement en géosciences marines : le sonar latéral, le sondeur multifaisceaux et le sondeur de sédiment. En complément de ceux-ci, les mesures de sismique permettent de visualiser les structures profondes du sous-sol.

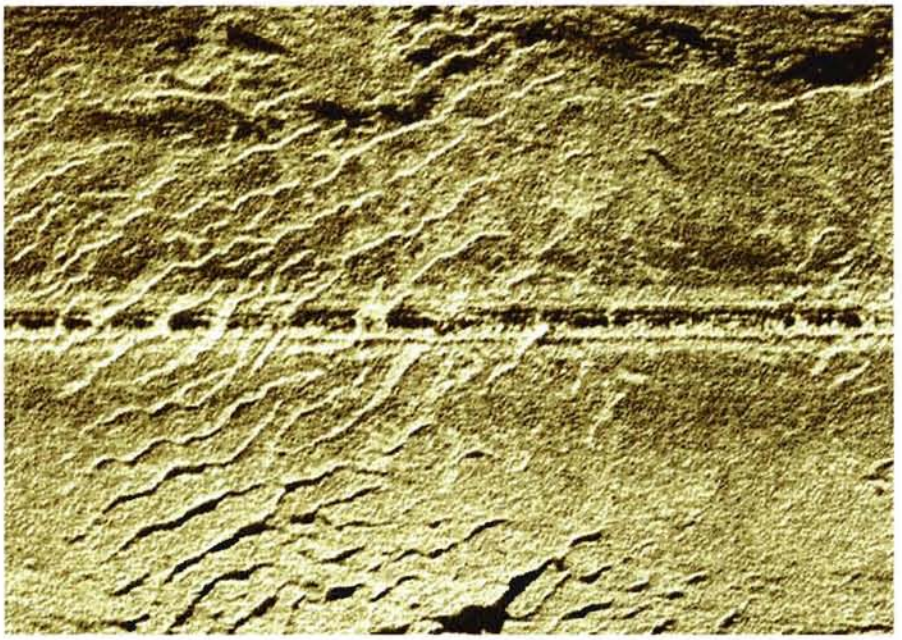


Figure 49 - Image acoustique du fond, obtenue avec le sonar latéral grands fonds Sar sur des rides sédimentaires.

Sonars latéraux

Les sonars latéraux, dont le principe de fonctionnement a été décrit au chapitre III, fournissent des « images acoustiques » de haute définition du fond. En géosciences marines, ils sont donc utilisés pour avoir une information sur la nature de l'interface eau-fond, celle-ci étant directement liée à la « réflectivité » rencontrée par le signal : un fond sédimentaire très meuble (vase, boue) renverra globalement peu d'énergie du fait de son faible contraste d'impédance avec l'eau et de la régularité de l'interface, au contraire d'un fond rocheux ou caillouteux. La présence d'un relief d'interface, même de faible amplitude, provoque des échos sur les faces « visibles » par le sonar et des ombres dans le cas contraire. La résolution des sonars latéraux (typiquement d'une dizaine de centimètres) étant de l'ordre de grandeur du microrelief, les images acoustiques recueillies permettent ainsi de mettre en évidence de petites structures sédimentaires (rides, flûtes, dunes).

Les sonars latéraux sont le plus souvent des systèmes légers, facilement portables et destinés à une utilisation par petits fonds avec des portées de quelques centaines de mètres. Toutefois des modèles spéciaux pour les grands fonds existent également : soit des systèmes à hautes fréquences utilisés près du fond (le *Sar* de l'Ifremer, fonctionnant dans la gamme 170-190 kHz jusqu'à 6 000 m de fond), soit des systèmes basses fréquences permettant une couverture de plusieurs kilomètres. Le sonar anglais *Gloria*, fonctionnant à 6,5 kHz, représente un cas extrême, avec une capacité de lever des couloirs de 30 à 60 km de large, permettant l'observation de larges structures avec une définition de l'ordre de la centaine de mètres.

Sondeurs multifaisceaux

Les sondeurs bathymétriques multifaisceaux sont apparus dans les années soixante-dix (le premier fut le *Sea-Beam* installé sur le *Jean Charcot* en 1977) et ont connu depuis lors de notables évolutions de leurs potentialités, qui ont entraîné une généralisation de leur emploi. Limités dans les premiers modèles à des nombres de faisceaux et des secteurs angulaires balayés relativement modestes (16 faisceaux de 2,7 ° sur le premier *Sea-Beam*), ils sont aujourd'hui capables de mettre en œuvre plusieurs centaines de faisceaux sur une ouverture atteignant 75 ° de part et d'autre de la verticale. Certains modèles destinés à l'océanographie côtière ou à l'hydrographie peuvent émettre jusqu'à l'horizontale, voire même au-dessus pour inspecter des berges immergées ! Les antennes utilisées permettent d'obtenir des lobes de directivité de l'ordre du degré, obtenus en basses fréquences par la technique des faisceaux croisés. Ces sondeurs permettent le relevé rapide et précis de la topographie de larges zones dont l'intérêt est primordial dans l'étude des faciès géologiques : un sondeur multifaisceaux basse fréquence utilisé par grands fonds peut couvrir de l'ordre de 10 000 km^2 par jour.

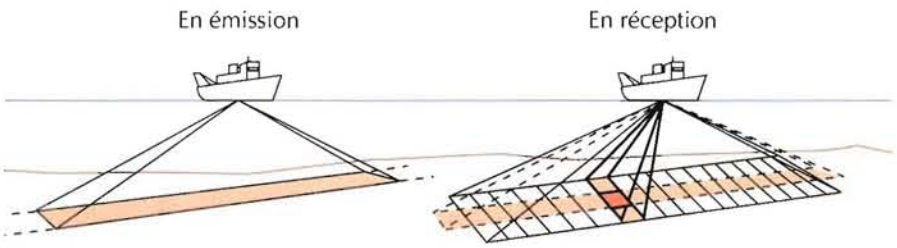


Figure 50 - Sondeur multifaisceaux : principe des faisceaux croisés.

Les sondeurs multifaisceaux les plus récents utilisent leur large ouverture angulaire, comparable à celle d'un sonar latéral, pour enregistrer des images acoustiques selon le principe de ce dernier. Les performances sont toutefois moins bonnes qu'avec un système remorqué près du fond, du fait des mouvements du porteur et de l'incidence insuffisamment rasante des signaux. Avec de tels systèmes, les géologues disposent donc d'outils intégrés permettant d'effectuer d'un même coup le relevé de l'ensemble des données de bathymétrie et de réflectivité ; l'apport simultané des données de sismique et de sondeur de sédiment permet une investigation très complète et performante des structures sédimentaires.

Caractérisation acoustique des fonds marins

Au-delà de leur exploitation cartographique, les données acoustiques de sondeurs et sonars (sous réserve d'utiliser des systèmes correctement calibrés) peuvent être

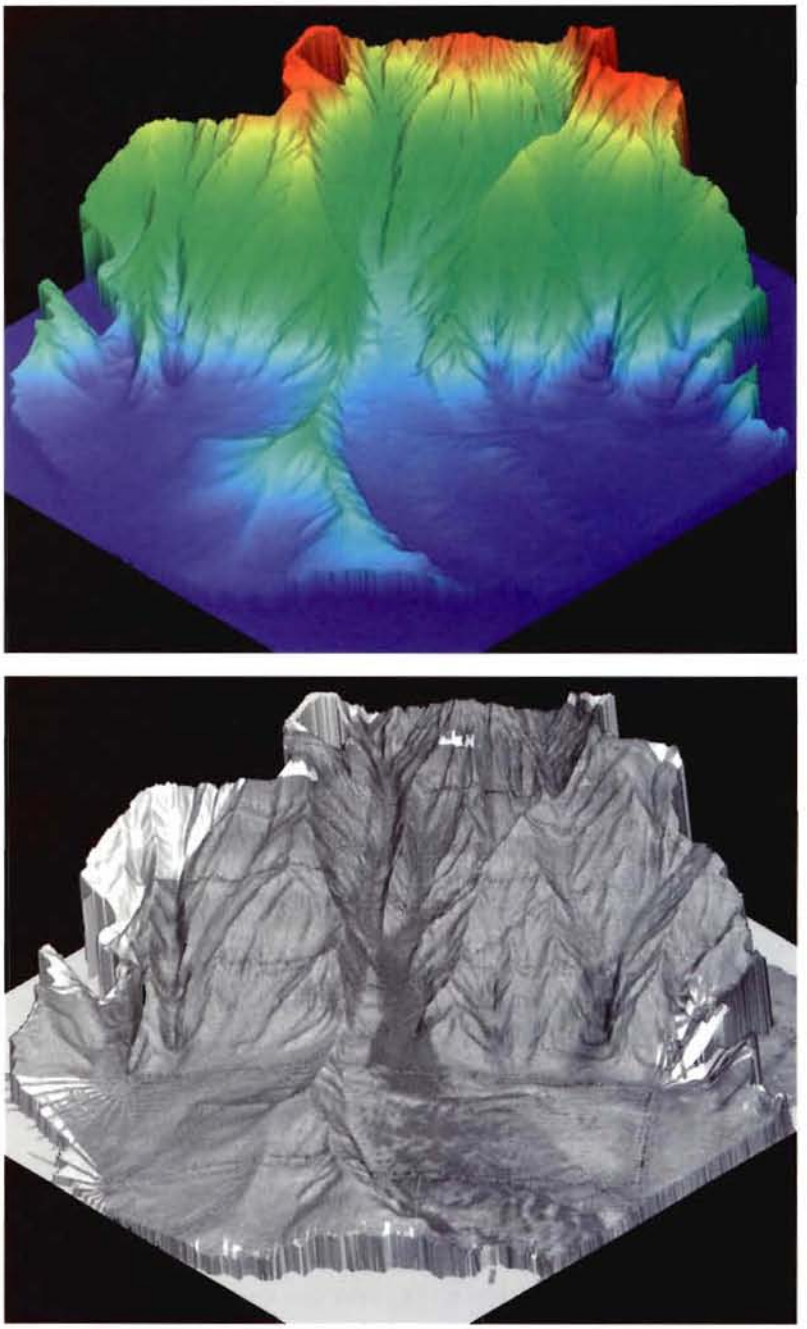


Figure 51 - Représentation tridimensionnelle du canyon sous-marin du Var cartographié à l'aide d'un sondeur multifaisceaux basses fréquences. En haut : visualisation de la bathymétrie (la couleur représente la profondeur). En bas : l'imagerie sonar a été reportée sur la bathymétrie, permettant de visualiser les faciès sédimentaires.

traitées pour une évaluation objective de certaines caractéristiques du fond (impédance, microrelief...) et donc être utilisées dans des opérations automatisées de cartographie de la nature et de la structure des fonds. L'analogie est ici évidente avec les méthodes employées en télédétection spatiale pour la cartographie de la surface terrestre, qui utilisent des radars portés par des satellites. Comme pour le radar, plusieurs techniques peuvent être utilisées, éventuellement de manière complémentaire : mesure de l'indice de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence, exploitation de la texture des images sonar de haute définition, analyse des caractéristiques des signaux bruts rétrodiffusés... La principale difficulté de ces approches réside dans l'interprétation qui en est faite : les phénomènes observés sont physiquement très complexes du fait de la structure même des sédiments, résultent d'une investigation imparfaite par les systèmes acoustiques, et les données finalement utilisables sont souvent ambiguës. Par ailleurs, les opérations de vérité-terrain permettant de « calibrer » les données acoustiques obtenues sont très difficiles à effectuer, en particulier par grands fonds. En dépit de ces difficultés, ces méthodes d'investigation, encore en développement, peuvent fournir des éléments très intéressants à l'expertise géologique, laquelle restera toutefois prédominante : en effet l'acoustique ne peut pas accéder aux informations de granulométrie et de composition minéralogique qui sont à la base de l'analyse sédimentologique.

Sondeurs profileurs de sédiments

Les sondeurs de sédiments sont destinés à explorer les premières strates de sédiment, sur des épaisseurs atteignant couramment plusieurs dizaines de mètres. Technologiquement, il s'agit en général de sondeurs monofaisceaux fonctionnant à très fort niveau et à des fréquences basses (dans la gamme 1 à 10 kHz ; la valeur de 3,5 kHz est souvent utilisée). Le signal recueilli au cours de l'avance du navire porteur permet d'obtenir une coupe verticale des discontinuités entre strates sédimentaires. Les sondeurs de sédiments utilisent souvent des techniques de compression d'impulsion pour améliorer leur portée en pénétration. Certains modèles mettent en œuvre une antenne paramétrique qui permet une directivité fine en dépit de la faible fréquence utilisée.

Sismique sous-marine

L'exploration de la structure profonde des fonds marins fait appel à des techniques particulières d'investigation à l'aide d'ondes dites *sismiques*, utilisées par ailleurs en géophysique terrestre. Bien que ces techniques soient traditionnellement considérées comme en marge de l'acoustique sous-marine proprement dite, les parentés des phénomènes physiques mis en jeu, ainsi que des matériels et des méthodes utilisés, sont évidentes.

L'hypothèse de base de la sismique est que le sous-sol comporte une succession d'interfaces entre strates suffisamment discontinues pour pouvoir renvoyer des

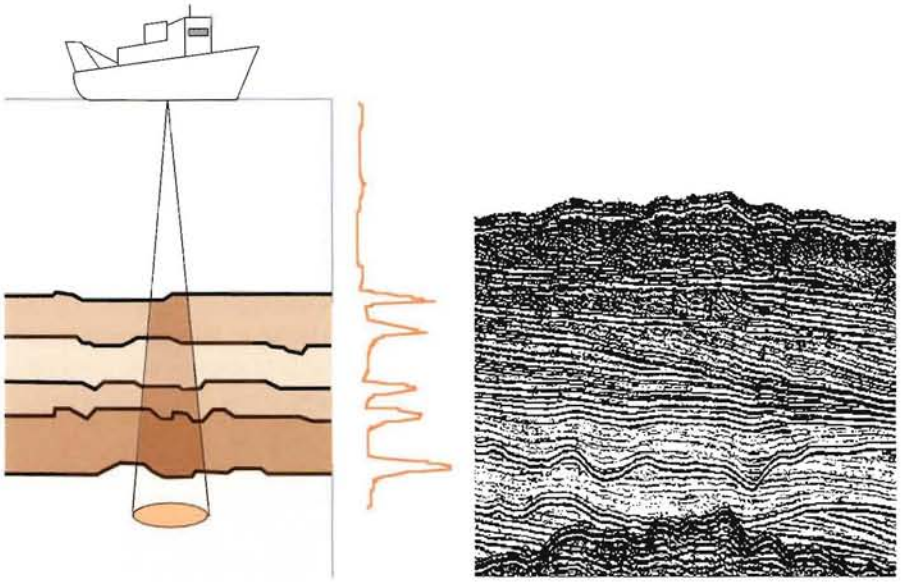


Figure 52 - Sondeur de sédiments et exemple d'enregistrement de profil.

ondes réfléchies ou réfractées significatives. La structure de cette stratification est du plus grand intérêt tant pour les géologues que pour les pétroliers en quête de gisements d'hydrocarbures. Cette investigation doit être effectuée sur des épaisseurs de plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres ; du fait de la forte absorption des ondes acoustiques dans les sédiments, ceci n'est possible qu'à des fréquences très basses et avec de très fortes énergies à l'émission. On met donc en œuvre généralement, à cet effet, non pas des sources acoustiques de type transducteur émettant un signal contrôlé, mais des dispositifs générant un signal impulsionnel de forte puissance. Au-delà des simples charges explosives, on utilise le plus souvent des sources provoquant l'implosion d'une bulle de gaz, générée mécaniquement (canons à air) ou électriquement (*sparkers*) ; certaines sources créent une onde de choc à partir d'un dispositif de percussion mécanique (*boomers*).

La réception des signaux de sismique ainsi générés est effectuée sur une ou plusieurs « flûtes » remorquées, dont les dimensions peuvent atteindre plusieurs kilomètres, et comportant plusieurs centaines d'hydrophones regroupés en sous-antennes ou traces. Comme pour les applications militaires de détection, l'intérêt de ces flûtes réside d'une part dans l'amélioration du rapport signal/bruit, et d'autre part dans les possibilités de traitements spatiaux particuliers qui sont appliqués.

Sismique réflexion et réfraction

Deux familles de techniques de mesures sont utilisées. La *sismique-réflexion* utilise, en incidence proche de la verticale, les échos rencontrés par le signal aux diverses interfaces, qui sont enregistrés en fonction de leur temps d'arrivée et superposés tir après tir pour constituer une image analogue à celle obtenue avec un sondeur. À partir des instants d'arrivée des échos, l'épaisseur des strates est obtenue en fonction des valeurs supposées de la célérité.

La *sismique-réfraction* utilise une caractéristique particulière de la propagation des ondes acoustiques dans les milieux stratifiés : à l'interface entre deux milieux, une onde incidente avec une rasance suffisamment faible donne naissance à plusieurs *ondes d'interface*, dont la principale se propage avec une célérité égale à celle du milieu inférieur. À partir des temps d'arrivée des différents trajets correspondant aux diverses discontinuités présentes dans le sous-sol, temps relevés sur un nombre suffisant de capteurs le long de la flûte de réception, on peut reconstituer la structure des couches sous-jacentes : la multiplication des points de mesures permet de remonter à la structure des strates en levant les ambiguïtés entre leur épaisseur et leur célérité acoustique. La méthode peut être étendue à une structure non plane, voire tridimensionnelle. L'algorithmique de reconstitution est lourde et complexe, et met en jeu des flots de données très importants.

Par leur complémentarité avec les équipements d'investigation superficielle des fonds marins (sondeurs et sonars), les méthodes de sismique sont un outil incontournable pour les géosciences marines, mais aussi pour la prospection pétrolière *offshore* ; ce secteur industriel a été spécialement moteur dans l'effort de développement technologique correspondant.

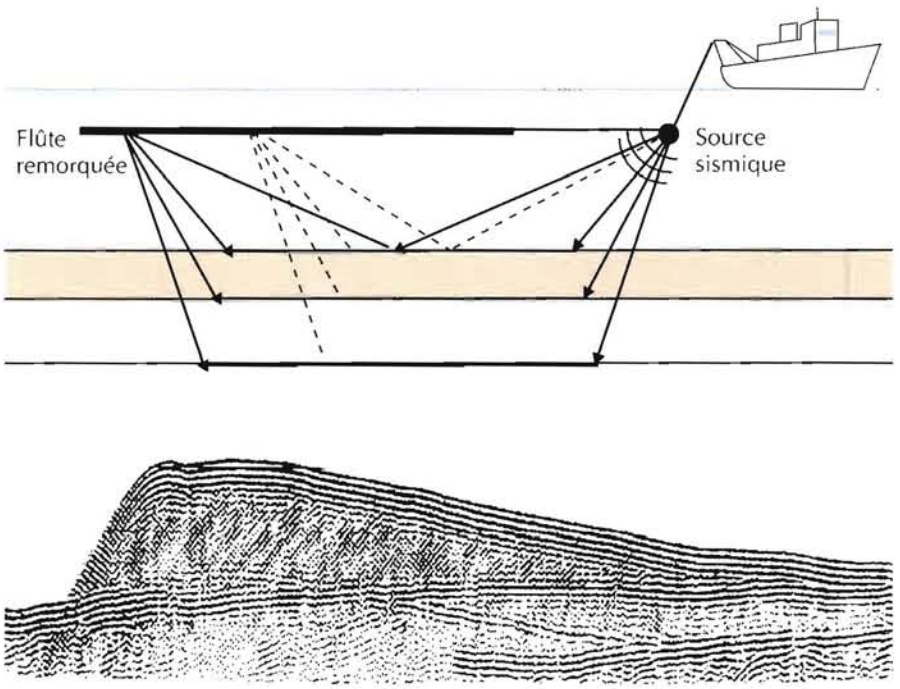


Figure 53 - Sismique réflexion et sismique réfraction. - Exemple d'enregistrement de profil sismique.

Océanographie physique

Tomographie acoustique océanique

L'océanographie physique utilise aujourd'hui des techniques d'acoustique basse fréquence pour effectuer des mesures des caractéristiques physiques des masses d'eau à moyenne échelle. Cette méthode, connue sous le nom de *tomographie acoustique océanique*, a été proposée par Munk et Wunsh en 1975. Le principe est de mesurer les temps de propagation des trajets multiples joignant un émetteur et un récepteur situés de part et d'autre de la zone océanique étudiée. La présence sur la zone d'une perturbation d'ampleur suffisante (tourbillon, front thermique, courant...) provoque une variation locale du champ de célérité acoustique et donc des temps de propagation. La mesure de ces fluctuations des temps de trajets, au cours de l'expérience, permet donc de remonter aux caractéristiques de la perturbation. Cette inversion est effectuée en ajustant les temps de trajets expérimentaux à ceux

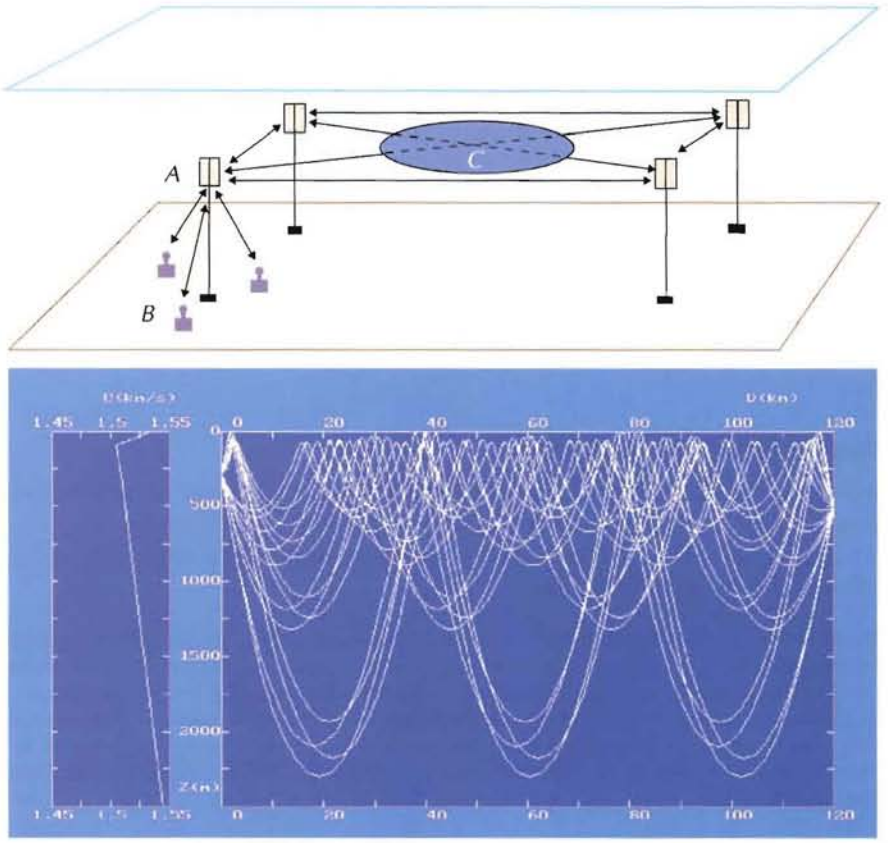


Figure 54 - En haut : configuration d'un réseau de tomographie acoustique océanique. A : émetteur récepteur basse fréquence - B : système acoustique haute fréquence de positionnement - C : perturbation de célérité. En bas : structure des trajets multiples joignant un émetteur et un récepteur.

prédits par un modèle de propagation prenant en compte précisément les caractéristiques de l'environnement. Dans la pratique, cette technique permet d'observer des phénomènes océanographiques dits *mésoéchelle,* c'est-à-dire de dimensions caractéristiques de quelques dizaines de kilomètres, sur des durées de plusieurs semaines à plusieurs mois. On peut ainsi détecter et estimer une anomalie locale de célérité (donc de température ou de salinité) par rapport à une configuration moyenne, ou un courant (par comparaison des temps de trajets aller et retour). L'intérêt majeur de la tomographie acoustique océanique est qu'elle permet une surveillance quasi instantanée (dans les mesures, sinon dans leur exploitation) d'une vaste zone, s'affranchissant ainsi des problèmes posés par l'échantillonnage spatial et temporel inhérent aux méthodes classiques de mesures (bathysondes mises en œuvre depuis un navire).

Contraintes technologiques

D'un point de vue technologique, on utilise pour ces expériences des réseaux d'instruments émetteurs récepteurs fonctionnant à des fréquences basses (250 et 400 Hz) qui permettent d'obtenir des portées de plusieurs centaines de kilomètres. La réalisation pratique de ces sources est assez délicate car elles doivent concilier avec leur basse fréquence nominale une bande passante assez large pour pouvoir assurer une résolution temporelle convenable (quelques millisecondes), un niveau d'émission suffisant pour être détectées à grandes distances, un haut rendement électroacoustique puisqu'elles doivent fonctionner de manière autonome avec une énergie propre limitée, et d'importantes immersions d'utilisation qui induisent de fortes contraintes hydrostatiques. Un autre impératif est de mettre en œuvre des horloges extrêmement stables pour pouvoir mesurer les temps de trajets avec une bonne précision sur des durées d'expérience assez importantes. Du fait des très grandes distances de propagation, on utilise, pour améliorer le rapport signal à bruit en réception, des signaux modulés de longue durée qui permettent un fort gain de traitement. Les récepteurs enregistrent les signaux qui sont ensuite traités et exploités en temps différé. La précision de positionnement des instruments installés sur des lignes de mouillage doit être assurée par l'emploi de systèmes de positionnement acoustiques locaux, de type « base longue ».

Thermométrie acoustique

La découverte, dans les années quarante, du chenal *Sofar* et de ses propriétés pour la transmission à très grandes distances (voir chap. II) ont été à l'origine de la mise au point de nouvelles méthodes d'investigation de l'océan à l'aide d'ondes acoustiques de très basses fréquences.

L'expérience Australie-Bermudes (1960) est d'une grande importance historique : elle a permis de mettre en évidence la possibilité de transmettre des signaux acoustiques sur des milliers de kilomètres. Une série d'explosions provoquées sur la côte australienne a été enregistrée par un récepteur situé aux Bermudes, à 20 000 km de distance avec un rapport signal/bruit confortable. La difficulté d'interprétation de ce type de propagation réside dans la détermination de la trajectoire « horizontale » suivie par le trajet sonore, en fonction de la courbure terrestre et de la diffraction par les continents (fig. 55).

Le programme scientifique international *Atoc (Acoustical Thermometry of Ocean Climate)* propose d'effectuer la surveillance de la température moyenne de masses d'eau à l'échelle des grands bassins océaniques, à partir d'un principe de mesure

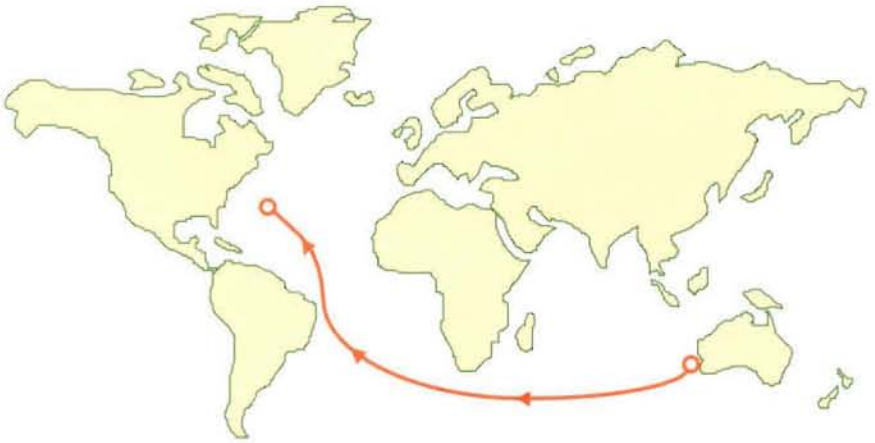


Figure 55 - L'expérience Australie-Bermudes (1960).

voisin de celui de la tomographie et des propriétés de la propagation à très grandes distances démontrées par l'expérience Australie-Bermudes. Des sources situées au centre des zones étudiées émettront des signaux très basses fréquences (de l'ordre de 60 Hz) qui seront enregistrés par des récepteurs situés près des côtes, après propagation sur plusieurs milliers de km dans le chenal *Sofar*. Le suivi des temps de propagation de ces signaux au fil des mois permettra de surveiller l'élévation de température éventuelle des océans liée à l'effet de serre. L'intérêt de la méthode est qu'elle permettra d'appréhender des variations de température extrêmement faibles, qui doivent se traduire par des écarts de temps mesurables malgré la très grande distance parcourue. Par ailleurs, les échelles mises en jeu doivent assurer un lissage des fluctuations locales de célérité.

En prélude aux expérimentations *Atoc*, l'expérience de Heard Island, menée au début des années quatre-vingt-dix, a consisté à faire émettre par une source acoustique située dans le Pacifique sud des signaux modulés autour de 57 Hz et à en mesurer les temps de propagation sur plusieurs milliers de kilomètres. Le succès de cette expérience a confirmé les potentialités de méthodes de surveillance acoustique à grande échelle.

Autres applications de l'ASM à l'océanographie physique

La technologie de la transmission de signaux acoustiques à très grandes distances a été appliquée à la *localisation de flotteurs dérivants* profonds utilisés pour suivre les courants sous-marins profonds. La zone à étudier (de l'ordre de grandeur d'un bassin océanique) étant équipée de sources à 260 Hz émettant à récurrences fixées dans le chenal *Sofar*, les flotteurs enregistrent au cours de leur dérive les instants



Figure 56 - L'expérience de Heard Island.

d'arrivée des signaux issus des diverses sources, permettant de reconstituer *a posteriori* leur trajectoire. La portée de ces dispositifs de localisation atteint couramment 1 000 km.

Enfin, à une échelle spatiale beaucoup plus modeste, les océanographes physiciens utilisent des courantomètres à effet Doppler pour des mesures locales de courants sous-marins, fonctionnant sur le même principe que les lochs Doppler. Ces systèmes sont souvent montés en série sur une ligne de mouillage, permettant ainsi de reconstituer la structure verticale du champ de courant. Des systèmes profileurs qui effectuent la mesure du décalage Doppler en fonction de la position verticale de la tranche d'eau analysée existent également.

Intervention sous-marine

Les moyens d'intervention sous-marine à des profondeurs de plus en plus importantes n'ont cessé de progresser depuis une cinquantaine d'années. D'une part, la communauté scientifique concernée par le domaine océanique profond demande la conception d'instrumentation spécialisée utilisable jusqu'à des profondeurs de plusieurs kilomètres, ainsi que des moyens de déploiement correspondants ; d'autre part, l'industrie *offshore* met en œuvre des moyens de plus en plus considérables pour l'exploitation pétrolière en grands fonds ou l'intervention sur épaves. Toutes ces applications, dont certaines recouvrent des intérêts économiques importants,

ont amené au développement de techniques originales d'acoustique sous-marine destinées d'une part au positionnement local des navires et engins sous-marins et d'autre part, à la transmission de données.

Positionnement acoustique

Dans ce domaine les réalisations ont été nombreuses et variées. Trois types de systèmes répondent à l'ensemble des besoins :

• les systèmes dits *à base longue* utilisent un champ de balises acoustiques (au moins trois) largement espacées, disposées sur la zone à couvrir, et dont la position précise doit être déterminée en préalable au fonctionnement du système. Le mobile à positionner déduit sa position des temps de trajets des signaux reçus des balises ; la mesure de la *durée absolue des temps* implique soit l'utilisation d'horloges synchrones entre le mobile et les balises, soit un système d'interrogation des balises par le mobile. Les systèmes à base longue permettent, après étalonnage, d'obtenir une précision de localisation de l'ordre du mètre ;

• les systèmes *à base courte* sont constitués d'un émetteur unique et d'un ensemble de récepteurs assez rapprochés les uns des autres. La position de l'ensemble récepteur est déterminée à partir des *différences de temps* de trajets reçus par l'antenne en ses différents points ;

• Les systèmes *à base ultracourte* mettent en œuvre un émetteur unique et une antenne de très petites dimensions qui, par mesure des différences de phase entre ses différents points (voir chap. III), permet de déterminer la direction d'arrivée des ondes sonores issues de l'émetteur situé sur le mobile à localiser. L'immersion de ce dernier peut être mesurée directement et transmise par les signaux acoustiques, ou bien être déterminée acoustiquement si le récepteur a accès à la durée absolue des temps de trajets. Les plus récents systèmes à base ultracourte permettent des précisions de localisation de l'ordre de la dizaine de mètres.

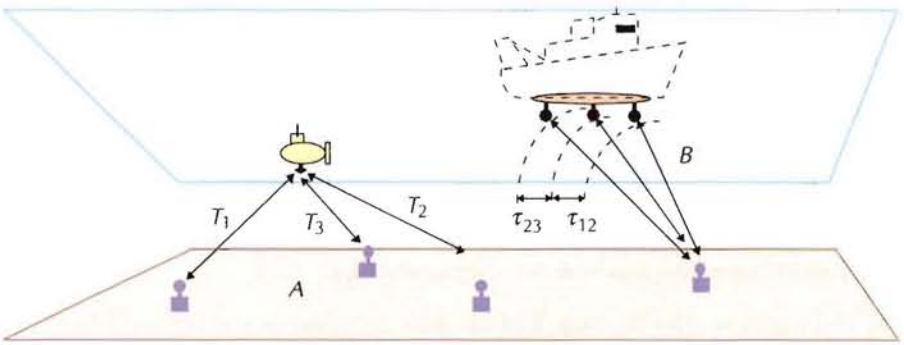


Figure 57 - Systèmes de positionnement - A : base longue : la mesure des temps de trajets entre les trois balises et le mobile permet de déterminer la position de celui-ci à l'intersection de trois sphères de rayons $R_i = cT_i$ - B : base courte : la mesure des différences de temps de trajets τ_{ij} permet de déterminer la position de la base par rapport à la balise de référence.

Transmission de données

Les applications des transmissions de données par acoustique sous-marine sont très variées. Dans les domaines scientifique et industriel on les utilise principalement :

- entre un submersible et son navire support, tant pour les communications courantes que pour la transmission de données de mesures ;
- entre un navire et une station de mesures autonome ou un système automatisé, l'intérêt étant de pouvoir récupérer des données disponibles au fond (mesures enregistrées ou informations de fonctionnement) sans avoir à récupérer physiquement un système immergé ;
- pour la transmission de commandes à un système automatisé ;
- pour la communication phonique entre plongeurs ou entre submersibles (téléphone sous-marin).

Communications numériques sous-marines

La transmission de données par acoustique sous-marine est en général faite sous forme de signaux numériques. L'information à transmettre est codée en symboles binaires, les symboles faisant l'objet de l'émission de signaux acoustiques différents ; par exemple, les symboles « 0 » et « 1 » peuvent correspondre à l'émission de deux impulsions de *fréquences différentes* (modulation *FSK Frequency Shift Keying*) ou encore à des *changements de phase* d'une sinusoïde (modulation *PSK Phase Shift Keying*). Les systèmes acoustiques sous-marins de transmission de signaux numériques bénéficient des méthodes mises au point dans le domaine des télécommunications. Seule la norme internationale de téléphone sous-marin impose une modulation *BLU* analogique autour d'une porteuse à 8 kHz (avec une qualité de restitution sonore très médiocre).

Les transmissions de données par acoustique sous-marine posent un certain nombre de problèmes difficilement contournables. Le premier est celui du débit possible des données : les fréquences utilisables étant au maximum de l'ordre de quelques dizaines de kilohertz pour atteindre des portées acceptables, les bandes passantes disponibles sont réduites et, avec elles, la quantité d'information transmissible. Par ailleurs, les aléas de la propagation dégradent fortement la qualité des signaux transmis, en particulier les phénomènes de trajets multiples et de réverbération, de même que les fluctuations rapides d'amplitude dues aux interférences et à la diffusion (évanouissements ou *fading*). Les résultats obtenus avec un système donné dépendront donc beaucoup de ses conditions d'utilisation.

Pour combattre les effets de la propagation, on met en œuvre des antennes directives qui permettent de diminuer les effets des trajets multiples et de la réverbération. Les signaux servant à la transmission peuvent être optimisés pour contrer certains phénomènes : le même symbole peut être émis à diverses fréquences pour diminuer les risques de *fading* ; des symboles successifs peuvent être émis avec des intervalles temporels excédant la durée de l'étalement prévu des trajets multiples. On peut par ailleurs utiliser aussi des techniques de codage des signaux numériques, permettant de détecter et de corriger *a posteriori* certaines erreurs de transmission. Enfin, diverses méthodes de traitement des signaux sont mises en œuvre en réception. La plus connue est l'*égalisation* qui consiste à appliquer en réception un filtre adaptatif compensant la réponse du canal de transmission, celle-ci étant estimée à partir de signaux d'apprentissage.

Les performances et les degrés de sophistication des systèmes sont très variables selon l'application visée et les techniques utilisées. Les transmissions de commandes à des systèmes automatisés (en exploitation pétrolière *offshore* par exemple) réclament un taux de fiabilité totale malgré un environnement sonore souvent difficile et ne nécessitent par contre qu'un faible débit d'information. Inversement, la transmission de

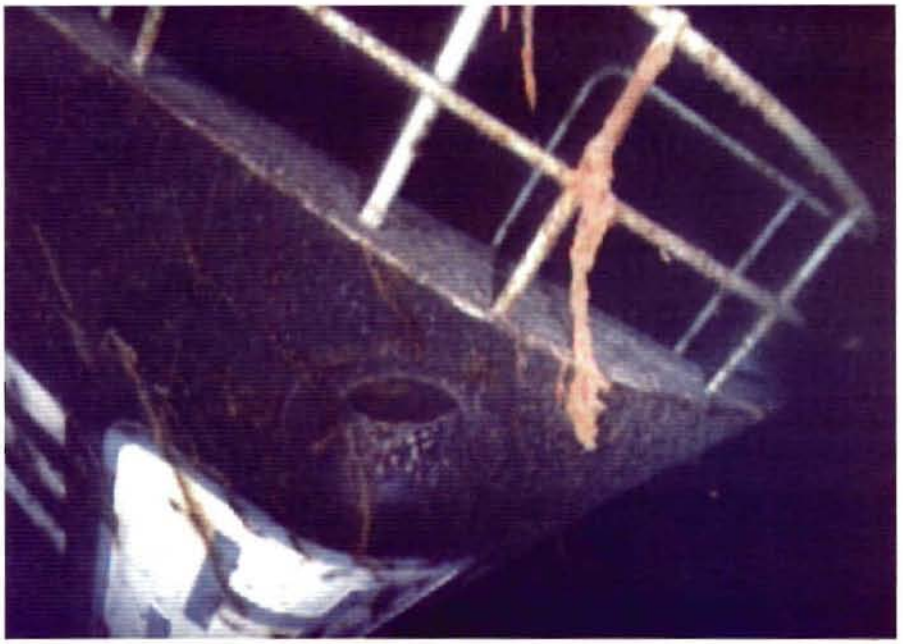


Figure 58 - Photo d'épave de navire (bastingage de proue) prise par le sous-marin Nautile à 2 700 m de profondeur, telle que reçue en surface après transmission acoustique par le système Tiva ; cette image illustre bien tout l'intérêt de la transmission acoustique pour le suivi, depuis la surface, d'une intervention en mer profonde.

données de mesures ou d'images numérisées dans le cadre d'opérations scientifiques peut s'effectuer dans des conditions acoustiques bien contrôlées mais est très exigeante en débit numérique. Dans des conditions favorables de propagation telles la transmission verticale par grands fonds, on peut atteindre des débits de l'ordre de 10 kbits/s sur des hauteurs d'eau de 5 000 m ; par exemple, le système *Tiva* installé sur le submersible *Nautile* de l'Ifremer transmet des images vidéo numérisées à une cadence de quelques images par seconde, permettant de suivre depuis la surface des opérations d'intervention à grande profondeur.

Perspectives et conclusion

Après plus d'un demi-siècle d'expansion et de progrès techniques rapides, l'acoustique sous-marine se situe maintenant à un moment-clé de son développement. En effet, son ressort traditionnel de recherche fondamentale et appliquée, à savoir les besoins des marines militaires, est aujourd'hui sinon cassé du moins sérieusement détendu. Les effectifs des équipes étatiques et industrielles spécialisées ont littéralement fondu en quelques années ; le problème de la sauvegarde d'une réelle politique à long terme dans le domaine de l'acoustique sous-marine militaire se pose. Une partie de l'énorme capital technologique correspondant profitera au secteur civil, dont l'activité économique est actuellement en expansion. Toutefois ce transfert risque fort de rester limité, d'abord parce que le poids financier de l'acoustique sous-marine à vocation civile, lié aux moyens de ses utilisateurs, est sans comparaison possible avec les budgets consentis par les marines militaires dans leurs périodes fastes ; ensuite parce que les avancées technologiques militaires récentes effectuées à grands frais par les meilleures équipes vont être préservées pour des raisons évidentes de maintien de suprématie navale ; et enfin parce que les besoins de la Marine ne sont pas forcément ceux de la Science et de l'Industrie, en terme d'applications cela va sans dire, mais aussi en terme d'adéquation entre les performances des matériels, les desiderata des utilisateurs et la dure réalité économique ! De plus, au fil des ans l'industrie acoustique sous-marine civile, structurée en petites unités à forte capacité d'innovation, a su développer ses propres méthodes et produits, bien adaptés aux besoins d'utilisateurs très variés et aux exigences d'un marché fortement concurrentiel, et proposer bon nombre d'avancées technologiques remarquables.

Il est évident que la principale clé des progrès à venir est à chercher dans l'extraordinaire développement actuel des techniques informatiques. La mise en œuvre du traitement numérique des signaux en acoustique sous-marine civile n'est apparue qu'au début des années quatre-vingts ; et depuis une dizaine d'années l'utilisation du micro-ordinateur comme élément de base des systèmes de traitements de données s'est complètement banalisée. Cette véritable révolution a permis de faire progresser les capacités des sonars parallèlement à l'évolution des performances du *hardware*, et ce à des niveaux de coût de revient impensables à l'époque, relativement récente, où le choix portait sur des récepteurs électroniques analogiques et de coûteux processeurs spécialisés. La généralisation de l'emploi d'énormes capacités de calcul est complétée par la large diffusion d'outils logiciels très performants, utilisables soit dans les opérations de traitement des signaux physiques, soit en aval dans l'exploitation des données obtenues. Cette banalisation de la puissance de calcul change radicalement le paysage de l'activité en recherche et développement ; tout devient possible, les traitements d'antenne, les filtrages de signaux, les opérations de cartographie les plus sophistiquées ou les plus gigantesques, qui semblaient devoir rester de pures spéculations scientifiques ou des curiosités hors de prix, sont maintenant à la portée de petites équipes spécialisées.

Les applications industrielles et scientifiques de l'ASM sont, ainsi qu'on l'a exposé au chapitre précédent, de plus en plus nombreuses, performantes et diverses. Alors que les besoins pour la pêche et la navigation semblent quelque peu marquer le pas, l'essor de l'industrie pétrolière offshore, qui ne fait que se confirmer au fil des ans, constitue évidemment un puissant moteur, dont les besoins recoupent ceux des secteurs applicatifs connexes de la recherche scientifique en océanographie physique ou en géologie marine, ou de l'ingénierie sous-marine. Les techniques les plus impliquées par cette tendance concernent bien sûr les sonars de bathymétrie-imagerie utilisés dans les phases d'exploration des fonds, mais aussi, dans les activités d'exploitation des sites pétroliers, les systèmes de positionnement sous-marin et de transmission de données, qui n'ont pas encore vraiment connu le développement que l'on peut en attendre et dont l'emploi est très certainement appelé à se généraliser largement dans les années à venir.

Secteur spécialement dynamique, les systèmes de bathymétrie-imagerie sont en très rapide évolution aujourd'hui. Il est peu probable que l'on voit émerger à court terme des sonars proposant des performances de couvertures nettement plus importantes que celles connues aujourd'hui (les limites imposées par la physique - réfraction, atténuation, cavitation - sont maintenant souvent atteintes), et une révolution comparable à celle de l'apparition des multifaisceaux dans les années soixante-dix n'est pas en vue. Par contre, une amélioration de la qualité de la cartographie est à l'ordre du jour, via les performances de traitements d'antennes d'une part et les potentialités des post-traitements d'autre part, et ce grâce à la progression des capacités en traitement numérique évoquées plus haut. Dans un autre registre, beaucoup de progrès ont été réalisés ces dernières années en transmission acoustique sous-marine de données, éventuellement en liaison avec d'autres domaines des télécommunications ; dans ce domaine comme dans celui du positionnement acoustique, l'effort à mener aujourd'hui réside dans le développement d'appareillages pratiques et économiquement viables plutôt que dans la mise au point de nouveaux principes.

Si l'on peut donc s'attendre, dans un futur proche, à des évolutions notables et rapides dans le domaine des capacités de traitement et d'exploitation des systèmes ASM, et pour tempérer ce qui vient d'être dit, il convient toutefois de garder présent à l'esprit que l'acoustique sous-marine reste une technologie soumise à de solides verrous physiques. D'une part, le milieu de propagation et l'environnement sont certes de mieux en mieux connus voire exploités ; mais des contraintes très fortes persistent. Le fonctionnement du sondeur multifaisceaux le plus performant peut être très perturbé par une simple couche superficielle de bulles d'air provoquées par de mauvaises conditions de mer ; autre exemple, l'océan considéré comme canal de transmission de données n'autorise que des débits d'informations très limités, aussi sophistiqués que soient les transmetteurs utilisés, et qui ne permettront jamais d'obtenir les performances atteintes en transmission hertzienne ou par câble. D'autre part, les maillons physiques des systèmes ASM (les transducteurs et leur infrastructure) restent extrêmement critiques ; si les techniques de réduction

des bruits provoqués par les navires ont connu des progrès extraordinaires ces dernières années, force est de constater que les performances des transducteurs n'ont pas évolué à une vitesse comparable à celle des possibilités de traitement numérique ; ceci non point faute d'efforts consentis ou de compétences disponibles, mais parce qu'il s'agit là de dispositifs mécaniques très optimisés, dont la mise au point implique un large éventail de spécialités alliant l'approche scientifique théorique au tour de main artisanal, et dont l'évolution est fatalement très progressive. Or, c'est pourtant dans ce domaine que se trouve le secret des systèmes vraiment réussis ; alors que l'on peut considérer que, sur le plan des performances en traitement numérique des signaux et des données, une certaine uniformisation va s'imposer (dans ce secteur comme dans tant d'autres), le savoir-faire technologique en matière de transducteurs sera, paradoxalement, de plus en plus un facteur-clé de qualité, et donc de réussite technique et commerciale.

À côté de ces riches perspectives de progrès technologiques, l'avenir d'une recherche plus fondamentale en acoustique sous-marine apparaît plus incertain. Son financement a été assuré depuis un demi-siècle par les marines militaires mais se trouve brutalement tari, à quelques exceptions près. Or on ne voit pas très bien actuellement de solution de remplacement : les clients civils de l'acoustique sous-marine (industrie offshore, océanographie, pêche...) ne semblent pas à même de remplir ce rôle, n'ayant pas soit les moyens de financer des travaux fondamentaux dans ce domaine, soit le temps d'en attendre les résultats ! Les grands programmes-cadres européens pourraient constituer une alternative intéressante à condition de fixer des axes de recherche forts et précisément définis. Les conséquences de cette situation nouvelle de désaffection ne sont pas encore trop sensibles car le différentiel entre le fondamental et le technologique est encore suffisant pour que ce dernier puisse progresser encore sur sa lancée ; mais le problème se posera tôt ou tard, et le maintien de compétences scientifiques *ad hoc* s'avérera alors crucial.

L'acoustique sous-marine est une technologie qui n'a pas la chance, comme les télécommunications électromagnétiques, de générer des applications destinées directement à un large marché de consommateurs. Elle reste donc (et restera sans doute) un outil de professionnel et, par conséquent, soumise à des fluctuations conjoncturelles liées aux heurs et malheurs des professions qui la font vivre. Elle possède par contre un atout maître : on ne lui connaît pas de substitut en matière de moyen de transmission dans le milieu marin ! Elle est donc incontournable pour l'exploration et l'exploitation des océans, dont elle est devenue aujourd'hui un acteur indispensable, après plus de quatre-vingts années d'améliorations techniques continues et parfois spectaculaires. Ses progrès actuels et à venir la conforteront, nous en sommes bien persuadés, dans ce rôle essentiel et passionnant d'outil privilégié d'investigation et de communication au sein de l'univers sous-marin... qui n'est plus le « Monde du Silence » !

Bibliographie

Urick R.J., 1983. Principles of Underwater Sound, 3rd ed., McGraw-Hill. New-York, 423 p.

Burdic W.S., 1992, Underwater Acoustic System Analysis. Prentice-hall, 2° éd., 445 p.

Brekhovskikh L.M., Lysanov Yu.P., 1992. Fundamentals of Ocean Acoustics. Springer-Verlag, 2e éd., Heidelberg, 270 p.

Medwin H., Clay C.S., 1977. Acoustical Oceanography. Wiley, New York, 544 p

Nielsen R.O., 1991. Sonar Signal Processing. Artech House, Norwood, 368 p

Le Chevalier F., 1989, Principes de traitement des signaux radar et sonar. Masson, Paris, 270 p.

Bouvet M, 1991. Traitements des signaux pour les systèmes sonar. Masson, 484 p

McLennan D.N., Simmonds E.J., 1992. Fisheries Acoustics. Chapman & Hall, London, 325 p.

Diner N., Marchand Ph., 1996. Acoustique et pêche maritime. Éditions Ifremer, Plouzané, 147 p.

Réalisation, mise en page : XLC (02 98 30 50 07)

Achevé d'imprimer sur les presses de Cloître Imprimeurs

ISBN 2-905434-92-9 / Dépôt légal 3e trimestre 1998

© 1998, Ifremer. Tous droits de reproduction, même partielle, par quelque procédé que ce soit, sont réservés pour tous pays.

Crédits photos : Ifremer.

Acoustique sous-marine.

Présentation et applications.

Les ondes sonores constituent le seul moyen d'investigation et de transmission à grande distance utilisable en pratique dans le milieu marin. Apparue au début du XXe siècle, l'acoustique sous-marine est devenue une des technologies essentielles utilisées pour l'exploration et l'exploitation des océans à des fins scientifiques, industrielles ou militaires. Elle peut prétendre jouer aujourd'hui dans l'océan le même rôle que les ondes radio et radar dans l'atmosphère et dans l'espace, et est largement employée dans les domaines de la navigation, de la pêche, de la défense, de l'océanographie et de l'ingénierie marine. Cet ouvrage présente de manière claire et synthétique les phénomènes physiques fondamentaux régissant les ondes acoustiques sous-marines, les principes de fonctionnement des systèmes sonar, et un panorama de leurs applications.

Mots-clés : acoustique sous-marine, propagation, traitement du signal, sonar, sondeur.

Underwater acoustics.

Presentation and applications

Sound waves are the only practical means of remote investigation and transmission in seawater. All along the XXth century, underwater acoustics became one of the major technologies used for exploration ans exploitation of the oceans for scientific, industrial, or military purposes. It is nowadays able to play, inside the oceans, the roles devoted to radio and radar in atmosphere and space, and is widely employed in the fields of navigation, fisheries, defence, oceanography and ocean engineering. This book presents, in a clear and concise way, the basic physical phenomena governing underwater acoustical waves, the general features of sonar systems, and an overview of their applications.

Key words: *underwater acoustics, propagation, signal processing, sonar, echosounder.*

ÉDITIONS IFREMER
BP 70, 29280 Plouzané, France
Tél. 02 98 22 40 13 - Fax 02 98 22 45 86
e-mail : editions@ifremer.fr



ISBN 2-905434-

Prix : 19

ÉDITIONS IFREMER