

Introduction

Le son se propage très bien dans les milieux liquides, c'est pourquoi l'acoustique est très utilisée en Océanographie. En effet, les ondes sonores constituent le seul moyen d'**investigation et de transmission** à grande distance utilisable dans le monde marin. La plupart des instruments utilisés en milieu marin transmettent et reçoivent des informations grâce à l'acoustique.

Applications de l'acoustique sous-marine :

- Transmission et réception des données
- Sondeur de pêche
- Sismique et réflexion
- Positionnement
- Cartographie des fonds sous-marins
- Profileurs sous-marins

De nombreux domaines utilisent donc des procédés acoustiques :

- **Physique des océans** : étude des anomalies de propagation, mesure de vitesse et de direction de courants (Effet doppler), tomographie
- **Biologie marine** : Sondeur et sonar de pêche
- **Géologie marine** : Sismique réflexion et réfraction, sonar latéral
- **Géomorphologie** : Bathymétrie (Sondeur multifaisceaux).
- **Positionnement** : Dédution de la position d'un point géographique (signaux acoustiques reçus de plusieurs balises).
- **Transmission** : Transmission de données entre un système autonome et une station (submersible, AUV).

Les expériences sur l'acoustique sous-marine ont débuté au début du XXe siècle avec Paul Langevein, les applications à ce domaine n'ont vu le jour que pendant et à la suite du second conflit mondial (détection de sous-marins). Le développement des écho-sondeurs a ensuite largement participé à son essor.

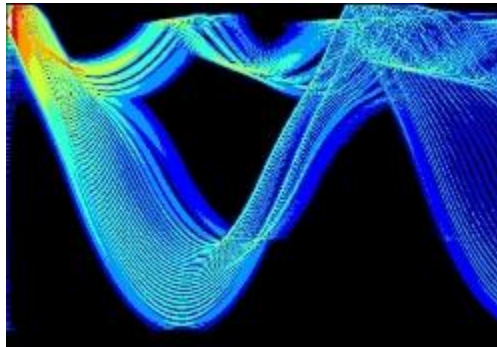
Ce document va présenter dans une première partie des généralités sur l'acoustique, et va ensuite s'intéresser à l'acoustique directement appliqué au milieu sous-marin. Une troisième partie abordera de plus près la trajectographie des rayons acoustique à travers la colonne d'eau.

1. Acoustique générale

Cette première partie va porter sur l'explication et la caractérisation des phénomènes acoustiques. Il ne sera pas encore question ici d'aborder les relations avec le milieu marin, mais simplement de bien comprendre les propriétés d'une onde acoustique, ses paramètres, et ses éventuelles variations.

Dans une première sous partie, nous définirons le plus simplement possible ce qu'est une onde acoustique. La deuxième sous partie traitera des paramètres régissant une onde acoustique, la suivante présentera le phénomène ondulatoire, la quatrième sous partie abordera le principe de

trajectographie d'un rayon acoustique, et enfin la dernière sous partie apportera une approche énergétique du phénomène acoustique.



1.1. Définition d'une onde

1.1.1. Les types d'ondes

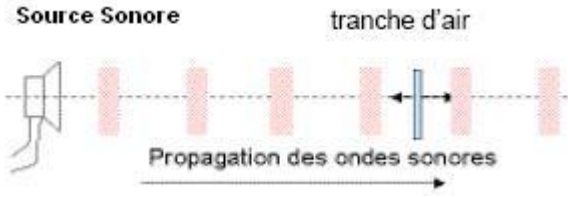
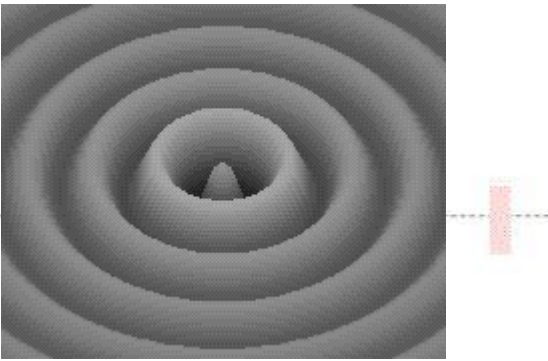
Un son est produit par la vibration d'un corps solide ou fluide. La production d'un son nécessite donc une source de vibration et une structure résonnante.

Deux types de vibrations peuvent former un signal sonore : les ondes **transversales** et les ondes **longitudinales**.

<p>Une onde est longitudinale lorsque le déplacement des points du milieu de propagation s'effectue dans la même direction que celle de la propagation.</p>	<p>Une onde est transversale lorsque le déplacement des points du milieu de propagation s'effectue perpendiculairement à la direction de propagation.</p>
<p><i>Onde Longitudinale (Bauer et al, 2005)</i></p>	<p><i>Onde Transversale (Bauer et al, 2005)</i></p>

1.1.2. Propagations des ondes:

Il existe deux modes de propagation: la **propagation plane** et la **propagation sphérique**. Pour distinguer ces deux modes de propagation, on doit définir la notion de surface d'onde: On appelle surface d'onde, une surface dont les points sont atteints simultanément par un même signal.

<p>Dans le cas d'une onde plane, les surfaces d'ondes sont des plans parallèles normaux à la direction de propagation.</p>	<p>Pour les ondes sphériques, les surfaces d'ondes sont des sphères concentriques.</p>
 <p>Représentation d'une onde plane</p>	 <p>Représentation d'une onde sphérique (Lafrenière, 2002)</p>

1.2. Paramètres

Une onde sonore varie en fonction de différents paramètres. Ces paramètres vont contrôler la forme de l'onde. On trouve notamment la célérité, la longueur d'onde ou encore la fréquence.

1.2.1. La célérité

La célérité correspond à la distance parcourue par l'onde en une seconde et est exprimée en mètres par seconde. Elle dépend et varie selon la masse volumique du milieu de propagation. En effet plus la densité du milieu est grande plus la célérité augmente.

1.2.2. La période, la longueur d'onde et la fréquence

La période est le temps nécessaire à une onde sinusoïdale pour effectuer une oscillation complète. Elle s'exprime en secondes.

La longueur d'onde correspond à la distance parcourue par le son pendant une période T, c'est-à-dire une oscillation. Elle est exprimée en mètres par la formule:

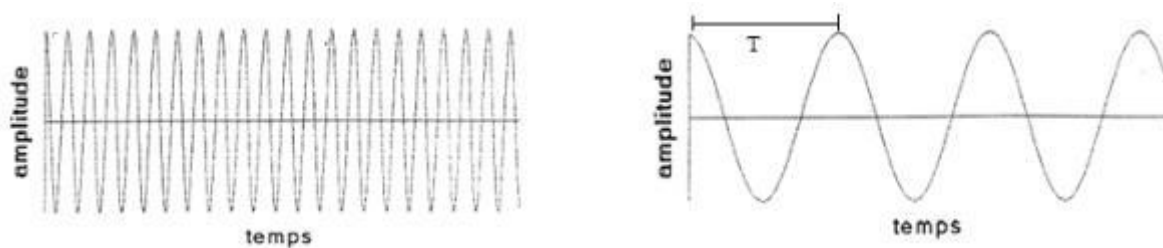
$$\lambda = C \cdot T = C / F$$

λ : La longueur d'onde en mètres.

C: La célérité en m.s⁻¹.

T: La période en secondes.

F: La fréquence en Hertz.

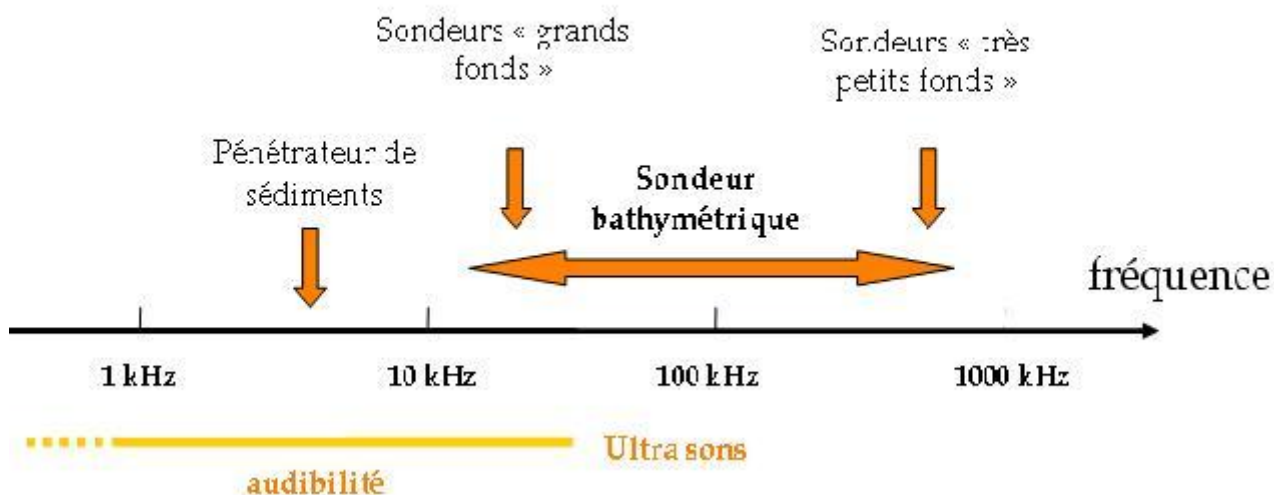


Comparaison de signaux de longueurs d'onde différentes, celle de gauche étant plus courte.

Dans cette formule rentre en compte la fréquence, qui est le nombre d'oscillation qu'effectue une onde pendant une seconde. L'unité de la fréquence est le hertz.

La gamme de fréquences émise par l'émetteur est importante, car elle détermine la qualité de résolution et de pénétration des fonds. Plus la fréquence est élevée, plus la qualité de résolution est élevée, et plus la portée de l'onde est faible.

- Quand la fréquence \uparrow , le coefficient d'absorption \uparrow , la portée \downarrow



Emission et fréquence (Bisquay, s.d.)

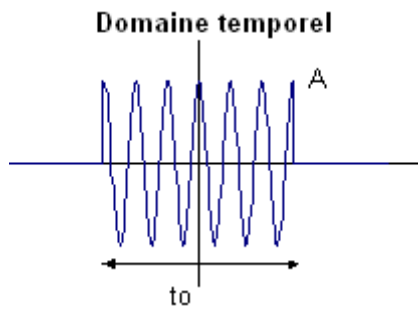
sondeurs	Plage de profondeur	Fréquence	Types de levé
Grands fonds	100 à 12 000 m	10 – 15 kHz	Talus, dorsale et plaines abyssales
Moyens fonds	30 à 3000 m	30 – 50 kHz	Plateau, talus
Petits fonds	5 à 500 m	80 – 120 kHz	Plateau continental
Très petits fonds	0 à 100 m	200 à 400 kHz	Zones littorales

Classes d'équipements (Bisquay, s.d.)

1.2.3. Ping et Chirp

Tous les émetteurs émettent des signaux à des fréquences différentes, on peut cependant distinguer deux grands types de signaux acoustiques:

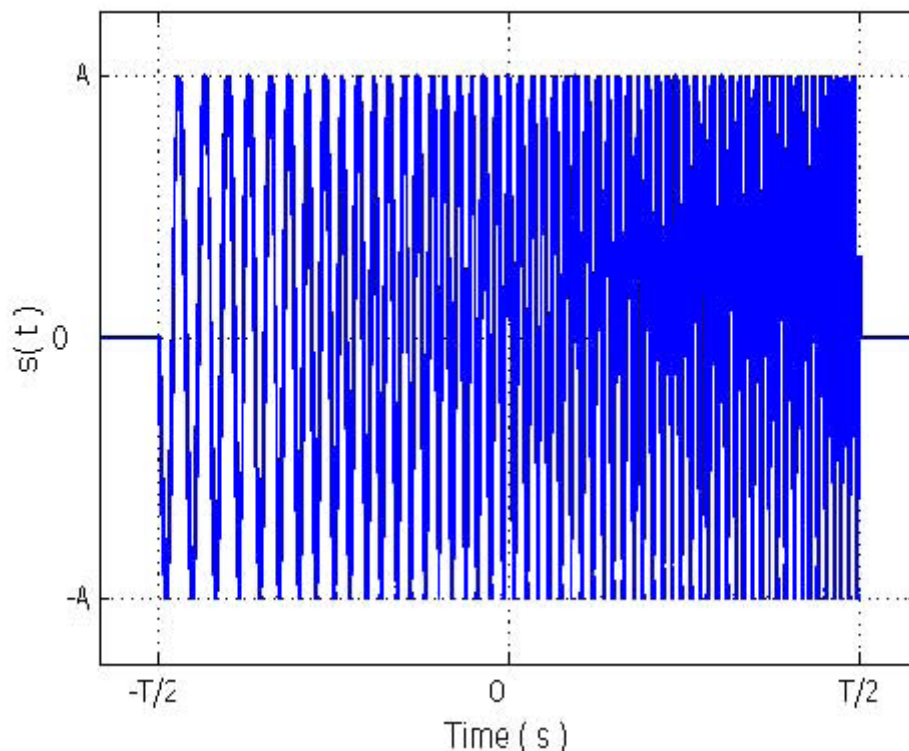
- Le PING ou impulsion monochromatique



Impulsion monochromatique (Gwyn, 2003)

Certains émetteurs acoustiques émettent des signaux sonores à une fréquence déterminée. Tout le signal aura donc la même fréquence:
On parle d'**impulsion monochromatique**.

- Le CHIRP ou signal modulé en fréquence



Signal modulé en fréquence (Gwyn, 2003)

D'autres émetteurs envoient des signaux sur une large gamme de fréquence. On parle de **signaux modulés en fréquence**.
Le signal est plus long et il balaye une large gamme de fréquence.

[1.3. Le phénomène ondulatoire](#)

1.3.1. Description du phénomène

Une onde sonore est une fonction sinusoïdale dont l'équation dans le temps s'écrit:

$$G(t) = A \sin (\omega T + \delta)$$

avec :

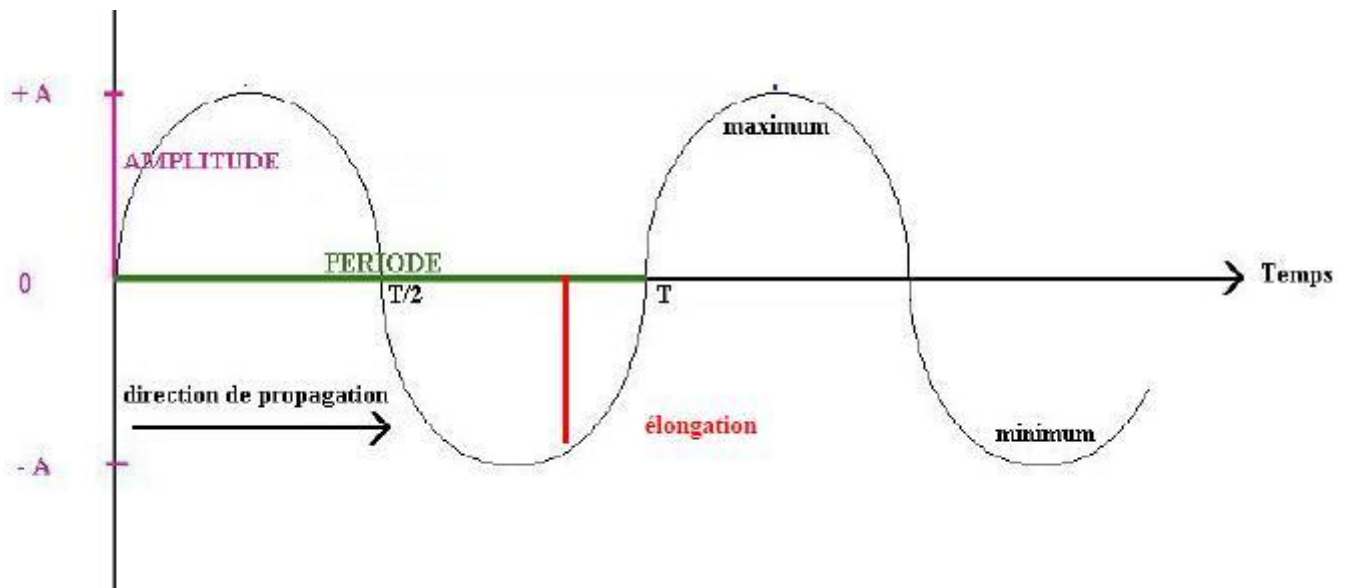
A l'amplitude

ω la pulsation propre

T la période

δ la phase

Une onde acoustique peut être représentée sous la forme d'une sinusoïde qui s'atténue avec le temps et la distance.



Représentation d'une onde sonore (Bauer et al., 2006)

1.3.2. Phase ondulatoire

La vitesse de phase est la distance parcourue par une onde par unité de temps. (À ne pas confondre avec la longueur d'onde, qui est la distance parcourue en une période). On définit également la vitesse de groupe du paquet d'ondes, qui est la vitesse de propagation de l'ensemble du train d'ondes.

En présence de dispersion, il existe une séparation entre la vitesse de phase et la vitesse de groupe du paquet d'ondes. On peut montrer que ces deux vitesses sont liées par une relation:

$$U = C + l \times \frac{dC}{dl}$$

Où :

$C = w/l$ est la vitesse de phase.

$U = d/dl$ est la vitesse de groupe.

l est le nombre d'onde (nombre de cycle par unité de distance).

1.3.3. Impédance acoustique

L'impédance acoustique (Z) s'identifie à la résistance d'un milieu donné qui propage des ondes sonores en tenant compte de la force excitatrice et des déplacements des particules. Elle se mesure en Rayles ($1 \text{ Rayle} = 1 \text{ Kg.m}^2.\text{s}^{-1}$).

L'impédance acoustique dépend de la masse volumique et de la compressibilité du milieu, c'est-à-dire de son aptitude à reprendre sa forme originale après déformation.

Pour une même force génératrice, les particules de deux milieux différents vibreront différemment, proportionnellement à la résistance rencontrée dans chacun des milieux.

Sa formule est :

$$Z = P/V \text{ ou } Z = \rho \cdot C$$

Z: Impédance en Rayles

P: Pression acoustique produite par la perturbation sonore générée par la source, elle est exprimée en Pa.

V: Vitesse de vibration des molécules (différent de la célérité) en m.s^{-1} .

C: La célérité du signal en m.s^{-1} .

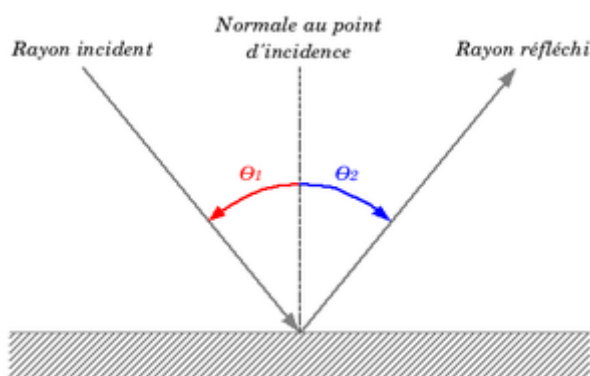
ρ : La masse volumique du milieu traversé en Kg.m^{-3} .

L'impédance est proportionnelle à la vitesse de propagation, c'est à dire la vitesse à laquelle la vibration est transmise à travers le milieu.. Plus l'impédance acoustique est grande, plus la vitesse de propagation est grande, et plus la vitesse d'une particule dans le milieu de propagation est petite.

1.4. Trajectographie des rayons

Lors du passage d'une onde entre deux milieux aux propriétés différentes, il se produit deux phénomènes; la réflexion et la réfraction. Ceux ci provoquent un changement de direction de l'onde qui se "sépare". Le changement de direction dépend des caractéristiques du milieu.

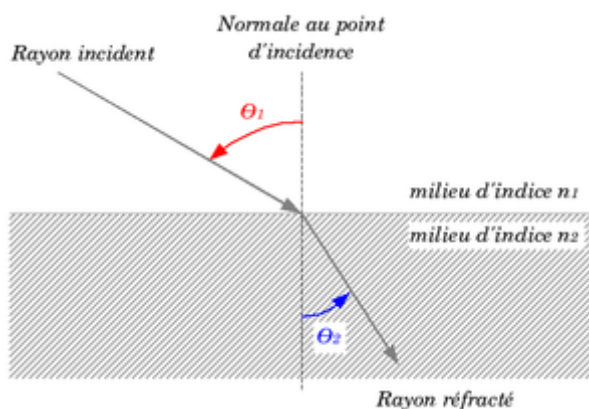
Toute onde qui rencontre un milieu différent est réfléchi, c'est à dire que lorsqu 'elle rencontre l'interface elle "repart" dans le même milieu avec le même angle par rapport à la verticale. Soit $\theta_1 = \theta_2$:



Principe de réflexion (Wikipedia, 2006)

Ce phénomène de réflexion est accompagné de la diffusion lorsque la surface réfléchissante n'est pas parfaitement plane et lisse, ce qui est quasiment toujours le cas. Ce phénomène est la dispersion de l'onde (ou d'une partie) dans toutes les directions de l'espace.

L'autre partie de l'onde passe dans le second milieu mais sa direction est changée, c'est la réfraction. Pour connaître l'angle de réfraction on applique la loi des Snell-Descartes qui prend en compte l'angle incident (θ_1) et l'indice de réfraction du milieu.



Principe de réfraction (Wikipedia, 2006)

La différence de caractéristiques entre les milieux est due aux indices de réflexions et de réfractions.

Indice de réflexion

L'indice de réflexion est le suivant :

$$R = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$$

R: L'indice de réflexion.

Z1: Impédance acoustique du milieu initial en **Rayles**.

Z2: Impédance acoustique du milieu secondaire en **Rayles**

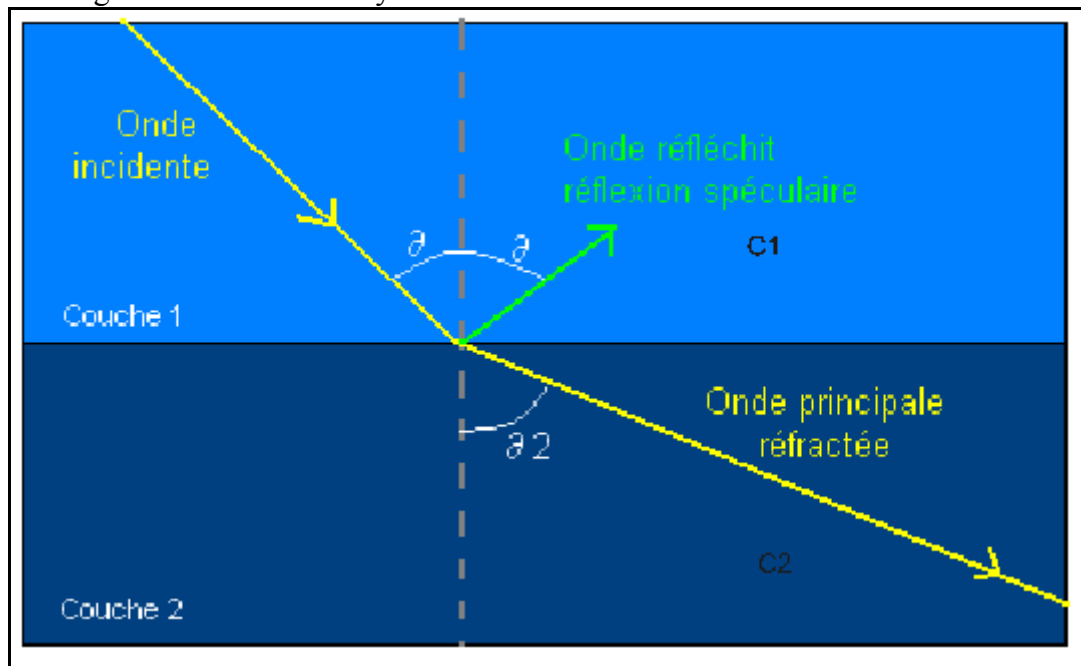
Plus l'indice de réflexion augmente et plus l'écho est important, on peut donc utiliser cet indice pour approcher la nature des fonds marins.

Indice de réfraction

C'est un nombre sans dimension. Il dépend du milieu et de la longueur d'onde du signal acoustique. Lorsqu'une onde passe d'un milieu 1 à un milieu 2 selon un angle donné par la loi de Snell-Descartes qui est :

$$\sin \theta_1 / C_1 = \sin \theta_2 / C_2$$

- N1:** Indice de réfraction du milieu 1.
N2: Indice de réfraction du milieu 2.
I1: Angle d'incidence du rayon sonore.
I2: Angle de réfraction du rayon sonore.



Comportement d'une onde se propageant dans un milieu à célérité non constante (Pannetier et al., 2006)

1.5. Approche énergétique

Une onde sonore met en jeu une certaine énergie acoustique. Celle-ci se définit par son intensité et sa puissance qui sont proportionnelles.

1.5.1. Intensité acoustique

L'intensité sonore est le flux moyen d'énergie par unité de temps à travers l'unité de surface d'onde. Elle correspond à la puissance par unité de surface et est exprimée par I en W.m^{-2} .

$$I = P \cdot V = P/Z$$

I = Intensité acoustique en Watts.m^{-2} .

P = Pression acoustique en Pa.

V = Vitesse particulaire en m.s^{-1} .

Z = Impédance acoustique en Rayles.

Plus on s'éloigne de la source, plus l'intensité sonore diminue. En effet, l'énergie totale se propage dans toutes les directions; elle se retrouve alors dans une sphère dont la surface augmente. L'intensité sonore décroît comme l'inverse du carré de la distance. La perte de propagation est donc de $1/R^2$, R est le rayon de la sphère.

Pour caractériser l'intensité sonore on utilise le décibel (dB) qui est l'unité de mesure des niveaux sonores.

On mesure le niveau sonore d'une onde à partir du logarithme de son intensité acoustique. I_0 comme référence correspondant au seuil moyen de perception humaine pour une fréquence de 1000Hz.

On définit le niveau sonore L d'une onde d'intensité I par l'expression :

$$L = 10 \log_{10}(I/I_0)$$

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}.$$

\log_{10} désigne le logarithme à base 10 ou logarithme décimal.

I_0 a un niveau sonore de 0 décibel (dB), le seuil de douleur de l'oreille humaine correspond à une intensité d'environ 1 W.m^{-2} soit un niveau sonore de 120 dB.

Niveau sonore (en dB)	Correspondance
140	Avion au décollage
120	Seuil de douleur
90	Discothèque
70	Réfectoire bruyant
50	Restaurant
20	Chuchotement

Une diminution de 3dB équivaut à une perte d'intensité sonore de moitié, ainsi si I_1 possède une intensité sonore de 1 W.m^{-2} et I_2 de $0,5 \text{ W.m}^{-2}$ alors la différence du niveau sonore entre ces deux points vaut -3 dB.

1.5.2. Puissance sonore

C'est la quantité d'énergie rapportée à une surface en Watts:

$$E = I.S$$

E = Puissance acoustique en Watts.

S = Surface en m^2 .

I = Intensité acoustique en dB.

Dans le cas d'une sphère:

$$E = I.4\pi R^2$$

Pour tout connaître sur le décibel cliquez sur [en savoir plus...](#)

2. Acoustique dans la colonne d'eau

Nous allons à présent entrer dans le domaine qui nous intéresse plus particulièrement, à savoir l'utilisation de l'acoustique en milieu marin. En effet les rayons acoustiques utilisés afin d'effectuer diverses mesures en océanographie vont subir des transformations et des déviations lorsqu'ils vont traverser la couche d'eau dans laquelle les mesures seront mises en oeuvre. C'est grâce à la connaissance des paramètres physico-chimiques de la masse d'eau qu'il va être possible de définir au préalable les variations que vont subir les rayons acoustiques.

Ce deuxième aspect de l'acoustique va être subdivisé en trois. Le premier paragraphe va expliquer comment la célérité d'une onde sonore va varier en fonction de sa profondeur dans la colonne d'eau, et en fonction de quels paramètres cette célérité va varier. Nous allons ensuite voir que des modèles mathématiques ont été établis afin de définir la célérité d'une onde acoustique dans l'eau de mer. Lors de mesures acoustiques en mer, il est nécessaire de connaître la célérité du son dans l'eau à l'endroit où sont effectuées les mesures. Les modèles prédéfinis sont entrés dans un ordinateur, qui calculera directement la célérité du son grâce aux caractéristiques de la masse d'eau. Et enfin dans une troisième partie, les différents moyens de perte d'énergie d'une onde acoustique vont être abordés.

2.1. Célérité du son dans l'eau de mer

2.1.1. Paramètres influençant la célérité

La célérité du son dans la colonne d'eau dépend de la masse volumique du milieu traversé et de son coefficient de compressibilité.

$$C = 1 / \sqrt{(\rho.K)}$$

C: Célérité du son en $m.s^{-1}$.

ρ : Masse volumique du milieu traversé en $kg.m^{-3}$.

K: Coefficient de compressibilité du milieu (en bar^{-1}).

Dans le cas de l'eau de mer, les paramètres influençant principalement la célérité du son sont la température, la salinité et la pression. En effet, la masse volumique de l'eau de mer va dépendre de la température et de la salinité de l'eau, alors que le coefficient de compressibilité va être fonction de la pression.

a) La température

La température dans les océans mondiaux décroît généralement lorsque l'on va de la surface vers le fond. Cependant les variations de température sont remarquables uniquement dans les premières couches des océans. Dans un océan ouvert, la température aura une importante variation jusqu'à environ 1000m, due au soleil, au brassage des vagues, aux courants, ou encore aux apports extérieurs. En dessous de cette profondeur, la température ne varie quasiment plus. Il arrive que dans les mers fermées, la température n'est d'influence que jusqu'à 200m, mais le principe reste le même. La limite au-dessous de laquelle la température ne varie plus beaucoup est la thermocline permanente.

Il existe une autre limite de température à prendre en compte, c'est la thermocline saisonnière. Cette limite n'est présente qu'en été. La température va fortement varier autour de cette limite, ce qui aura une influence sur la célérité.

b) La salinité

La salinité moyenne dans les océans mondiaux est d'environ 35 ‰. Les variations géographiques sont assez importantes. On peut trouver des valeurs de salinité de 38,5‰ en Méditerranée, et des valeurs de salinité de 14 ‰ en mer Baltique. La salinité va avoir une influence, mais très légère, sur la densité à l'échelle d'un océan. Néanmoins les variations de salinité vont être remarquables dans certaines situations locales comme les estuaires ou les pôles (Fonte des glaces).

c) La pression

Les variations de température et de salinité ont une influence qui est relativement faible par rapport à l'influence des variations de pression. Ainsi le facteur qu'il faudra majoritairement prendre en compte pour étudier les variations de célérité sera la pression. La pression est de 1 bar en surface et elle augmente ensuite de 1 bar tous les 10m. La pression aura une influence moindre dans les couches superficielles, et un rôle plus important dans les couches profondes, par rapport au rôle de la température et de la salinité.

2.1.2. Variations de la célérité dans la colonne d'eau

a) Influence des paramètres

La célérité d'une onde dans l'eau de mer est donc directement fonction de la température, de la salinité et de la pression. En effet lorsque la température va augmenter, la densité de l'eau va diminuer, et donc la célérité va augmenter (la densité et la célérité sont inversement proportionnelles). Lorsque la salinité ou la pression augmente, le coefficient de compressibilité diminue, et ceci entraîne une augmentation de la célérité, car la célérité est inversement proportionnelle au coefficient de compressibilité.

b) Variations dans la colonne d'eau

Au dessus de la thermocline saisonnière, c'est la pression (la profondeur) qui aura le plus d'influence sur la célérité, en effet la température est assez homogène dans cette zone. L'augmentation de la pression va entraîner une augmentation de la célérité dans cette zone. La célérité va ensuite diminuer entre la thermocline saisonnière et la thermocline permanente. Entre ces deux limites, la température va fortement diminuer, et donc la densité va augmenter. C'est cela qui va entraîner la diminution de célérité. Lorsque l'on passera sous la thermocline permanente, la température ne variera plus, ou très peu. Seule la pression va avoir une influence sur la célérité: l'augmentation de pression provoquera donc une augmentation de célérité.

2.2. Modèles de détermination de la célérité

Il existe plusieurs façons de mettre en équation les relations entre la température, la salinité et la profondeur permettant d'obtenir la valeur de la célérité du son.

Nous allons voir ici 4 modèles utilisant différents paramètres qui sont:

C: La célérité en m.s^{-1} .

T: La température en $^{\circ}\text{C}$.

S: La salinité en ‰.

D: L'immersion en mètres.

Cw: Le coefficient établie à partir des coefficients de contribution d'eau pure en fonction de l'influence de la pression et de la température

A et B: Le coefficients déterminant l'influence de la salinité, de la température et de la pression.

P = Pression, en kg.cm⁻².

<p><u>Modèle de LOWETT</u> $C = 1449.2 + 3.5 T + (S - 35) + 0.018 D$</p>	<p><u>Modèle de MEDWIN</u> La gamme d'utilisation de l'équation de Medwin est : Température de 0 à 30°C. Salinité de 0 à 45‰. Profondeur de 0 à 100 mètres. $C = 1449.2 + 4.6 T - 0.055T^2 + (1.34 - 0.01 T)(S - 35) + 0.0161 D$</p>
<p><u>Modèle de CHEN MILLERO</u> La gamme d'utilisation de ce modèle est : Température de 0 à 40 °C. Salinité de 0 à 40‰. Pression de 0 à 1000 bars (Wong et Zhu, 1995). $C(S,T,P)=C_w(T,P)+A(T,P)S+B(T,P)S^{3/2}+D(T,P)S^2$</p>	<p><u>Modèle de DEL GROSSO</u> La gamme d'utilisation de ce modèle est: Température: 0 à 30°C. Salinité: 30 à 40‰. Pression: 0 à 1000 kg.cm⁻². $C(S,T,P) = C_{000} + C_T + C_S + C_P + C_{STP}$</p>

2.3. Perte d'énergie d'une onde sonore

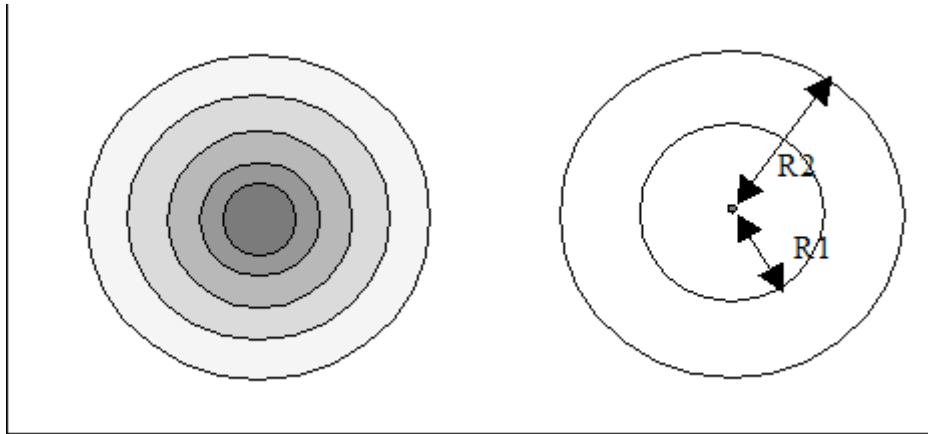
2.3.1. Perte d'énergie par divergence géométrique

Nous avons vu que la propagation d'une onde sonore se fait de manière sphérique ou plane. Dans les deux cas l'énergie acoustique s'étale sur une surface de plus en plus grande. L'énergie se conserve mais elle est répartit sur une surface de plus en plus grande, ce qui provoque une diminution de l'intensité:

C'est le **phénomène de perte par divergence géométrique**.

L'intensité diminue proportionnellement à l'inverse de la surface donc la perte par divergence exprimée en décibels vaut donc :

$$PT = 20 \log \text{Rayon}$$



Atténuation de l'onde sonore par divergence géométrique (Lurton, 1998)

Prenons un milieu homogène illimité et d'une source rayonnant dans toutes les directions. L'énergie émise est conservée, mais se répartit sur des sphères de plus en plus grandes.

2.3.2. Perte d'énergie par amortissement

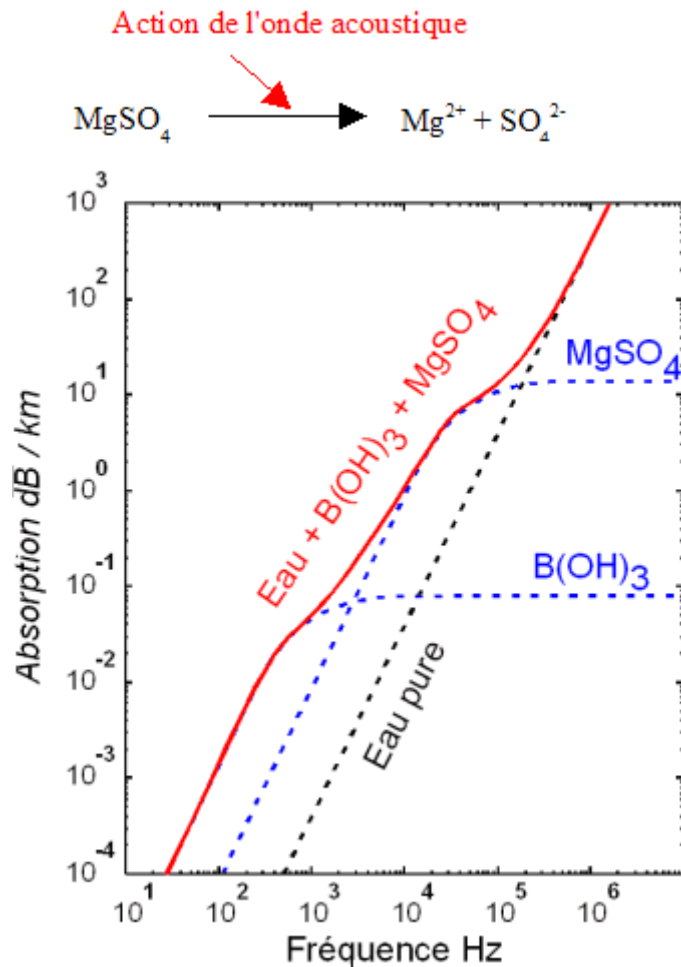
L'eau de mer constitue un milieu dispersif et hétérogène (stratification) une partie de l'énergie acoustique d'un signal est transmise au milieu sous la forme d'énergie calorifique. Ce phénomène est dû à la viscosité de l'eau de mer qui induit des forces de frottements à l'échelle moléculaire lors du passage d'une onde. C'est **l'absorption moléculaire**. Cependant l'absorption par la viscosité du milieu ne constitue pas la majeure partie de l'absorption des ondes acoustiques.

En effet, lors du passage d'une onde acoustique dans l'eau de mer, une partie des sels (ou composés ioniques) se dissocient, en particulier le sulfate de magnésium (MgSO_4) mais aussi les molécules d'acide borique (B(OH)_3).

Il existe donc une **atténuation par dissociation de composés chimiques**.

L'amortissement est exprimé grâce à un **coefficient d'absorption** tenant principalement compte de la dissociation des composés ioniques, et négligeant la viscosité du fluide. Ce coefficient est exprimé en dB perdu par kilomètre.

Le coefficient d'absorption est directement lié à la fréquence de l'onde sonore, en effet plus la fréquence de l'onde est importante et plus l'absorption sera grande. Ce facteur limite donc largement la portée des dispositifs acoustiques sous marin.



Absorption de l'énergie acoustique à différentes fréquences dans de l'eau de mer pour une température et une pression particulière. (Le Calvé, s.d.).

Sur la figure de droite, nous constatons que plus la fréquence augmente et plus l'absorption est importante. De plus cette figure met en évidence les effets cumulés de la dissociation du sulfate de magnésium et de l'acide borique.

2.3.3. Perte totale de propagation

La perte totale de propagation correspond à la perte par divergence géométrique additionnée à la perte par amortissement.

Pour l'évaluation de la perte totale de propagation et donc les performances des systèmes acoustiques sous-marins on utilise la formule: Soit en décibel :

$$\mathbf{PT=20\log R+R\alpha}$$

Avec R : rayon

Et α : coefficient d'absorption (directement lié à la fréquence)

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

$$\mathbf{2PT=40\log R+2R\alpha}$$

2.3.4. Absorption par les bulles d'air

Une cause supplémentaire de pertes de propagation, très difficile à quantifier, est la présence de bulles d'air, soit à proximité de la source sonore, soit sur le trajet des ondes sonores. Lorsque cela se produit un système acoustique peut se trouver complètement inopérant: absorption des signaux émis dans la couche de bulles, niveau de bruit supplémentaire provoqué par l'éclatement des bulles, masquage des systèmes de réception. Ces bulles sont dues à la forme de la coque, aux conditions météorologiques, à l'activité biologique par exemple. La présence de bulles est inévitable mais sa minimisation doit être soigneusement recherchée.

Le phénomène d'absorption des ondes acoustiques par les bulles devient particulièrement gênant en sismique réflexion. Certains sédiments sont complètement hermétiques à la pénétration du son en présence de bulles. En effet les vases riches en matière organique produisent du méthane. Les structures géologiques ne sont alors plus observables sur les profils sismiques. Ce phénomène est appelé **phénomène de table**.

3. Trajectographie dans la colonne d'eau

Dans cette troisième partie, nous allons nous intéresser à la façon dont une onde sonore va réussir à traverser un milieu donné. En effet, nous savons qu'une onde sonore va subir des transformations, va voir sa direction modifiée, lorsque elle va vouloir traverser un milieu, ou passer d'un milieu à un autre. C'est dans cette partie que nous allons aborder les notions de réflexion et de diffusion. Dans cette dernière partie, nous verrons qu'il existe des zones dans la colonne d'eau qui favorisent la propagation des ondes sonores, on parlera alors de chenal sonore, et au contraire, d'autres zones ne permettent pas aux ondes sonores de se propager, ce seront les zones de silence.

3.1. Diffusion et réflexion

3.1.1. Diffusion

Lorsqu'une onde acoustique rencontre une interface rugueuse (surface et fond), une partie de l'énergie incidente est dispersée et génère des ondes secondaires dans toutes les directions. Ces ondes secondaires sont diffusées dans des directions qui dépendent des irrégularités du fond. C'est le **phénomène de diffusion**.

La partie diffusée du signal est appelée signal incohérent mais il est cependant très utile pour la topographie sous-marine (sondeur multi-faisceau).

Associé au phénomène de diffusion, il existe le **phénomène de rétrodiffusion**. La plupart des systèmes sonores sont destinés à recevoir des signaux renvoyés par des cibles. Celles-ci dépendent de l'étude, elles peuvent être des objets posés sur le fond ou enfouis comme des pipelines ou des épaves ou bien encore des bancs de poissons dans la hauteur d'eau. La partie de l'onde sonore diffusée par la cible et qui est renvoyée vers l'émetteur est dite rétrodiffusée sous forme d'ondes secondaires. La cible agit donc comme une source secondaire qui réémet l'onde acoustique. (voir figure 1)

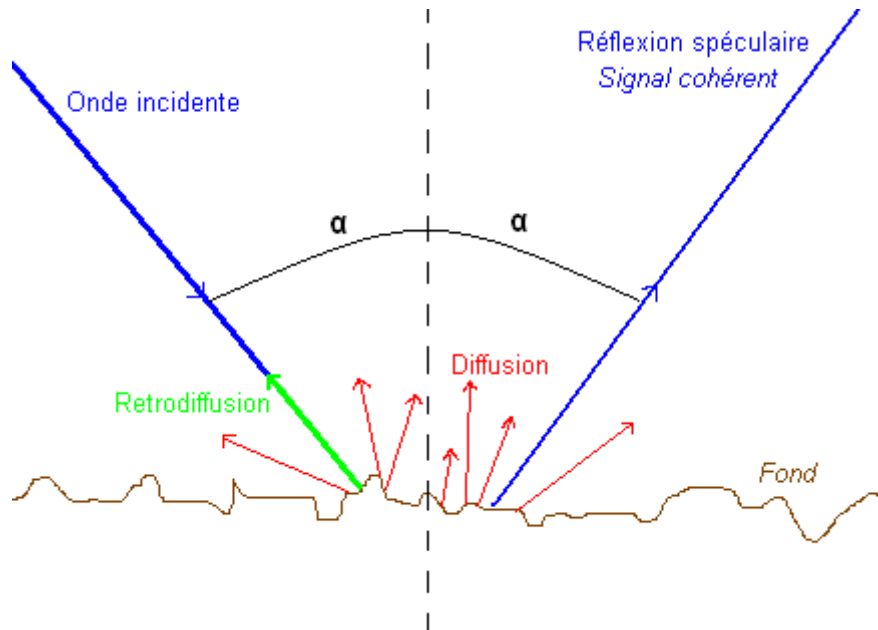
3.1.2. Réflexion

Toutefois, une partie de l'onde incidente est réfléchi, sans déformation mais avec une perte d'amplitude: C'est le **phénomène de réflexion**.

L'onde réfléchi est renvoyée selon une direction symétrique par rapport à la normale du point d'incidence : c'est la réflexion spéculaire (voir figure)

La partie réfléchi du signal est appelée signal cohérent.

Plus la différence d'**impédance** entre deux matériaux est importante et plus la réflexion est forte. La proportion réfléchi de l'énergie incidente est caractérisée par un coefficient (rapport entre la dimension de l'obstacle et la longueur d'onde du signal). L'interface eau/roche est un meilleur **réflecteur** que l'interface eau/vase, en effet la variation d'impédance (densité) est plus importante.



Diffusion et réflexion sur le fond d'une onde acoustique (modifiée, d'après Lurton, 1998)

Le signal sonore peut suivre des trajets très différents en fonction du nombre de réflexions qu'il subit. On parle de trajets multiples.

3.1.3. Trajets multiples

L'air a une très faible impédance comparée à l'eau (milieu de propagation). Donc la surface est un très bon réflecteur, tout comme le fond. Le milieu de propagation de l'onde est donc limité par la surface et le fond, les signaux subissent donc des réflexions successives sur ces interfaces. A chaque réflexion, le signal subira une perte d'amplitude. Un signal peut donc se propager selon des trajets sonores multiples et tous différents. Le signal principal (trajet direct) est donc suivi d'une traînée d'échos dont l'amplitude va en diminuant (amplitude fonction du nombre de réflexions subies) : **Phénomène d'échos multiples** (ou de cible).

En fonction de la configuration on peut ne pas recevoir d'écho ou en recevoir des centaines. Ils ne sont pas identifiables individuellement mais ils se caractérisent par une traînée continue sur le spectre des fréquences (voir figure 2).

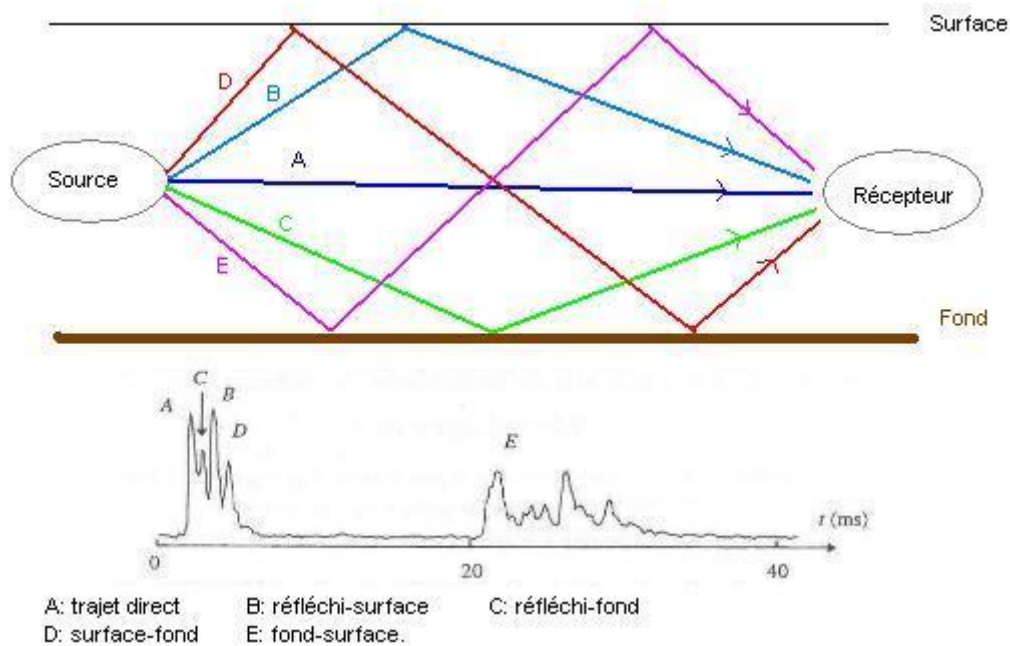


Illustration de la notion de trajets multiples dans la colonne d'eau et sur le spectre de fréquence. (modifiée, d'après Lurton, 1998)

3.1.4. Réverbération

On appelle réverbération tout retour d'énergie vers le système sonar autrement que par rétrodiffusion de la cible (voire 1.1). On distingue les effets de réverbérations de fond et de surface ainsi que ceux de volume. La réverbération est donc l'ensemble des phénomènes d'échos multiples parasites venant brouiller la réception du signal cohérent attendu (bruit).

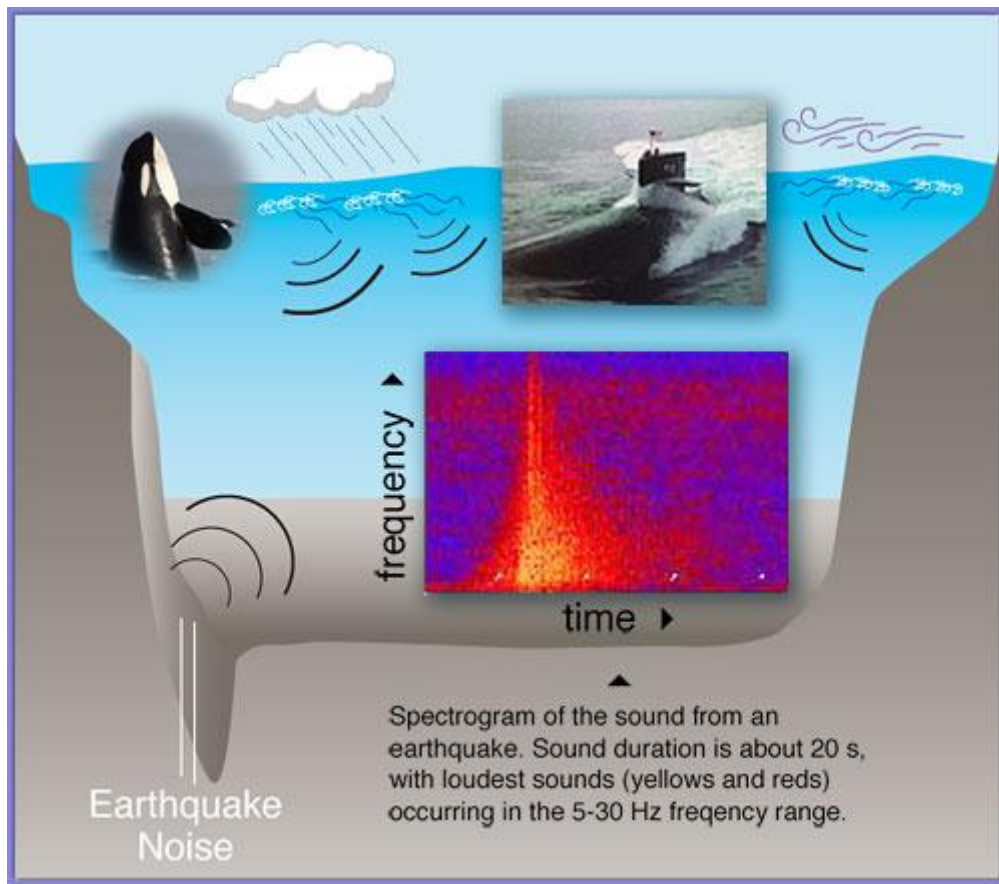
Il est difficile pour nous de faire la différence entre écho de cible et phénomène de réverbération, elle est arbitraire. Un sondeur de pêche utilise la rétrodiffusion due aux bancs de poissons et considère comme réverbération nuisible la rétrodiffusion par la surface et le fond de la mer. A l'inverse pour une utilisation cartographique, la rétrodiffusion sur les poissons sera considérée comme réverbération nuisible contrairement à celle de la surface et du fond.

3.1.5. Bruits liés à l'environnement

On a vu précédemment que les récepteurs vont enregistrer des échos d'ondes liés aux trajets multiples.

Un autre facteur perturbera la réception de l'onde, c'est le bruit lié à l'environnement. En effet il existe des signaux sonores déjà présents dans la colonne d'eau (bruit de moteur, bruit lié au mouvement de l'eau en surface, mammifères marins etc...).

Lors de la réception d'un signal sonore, il sera donc nécessaire de filtrer les signaux reçus.



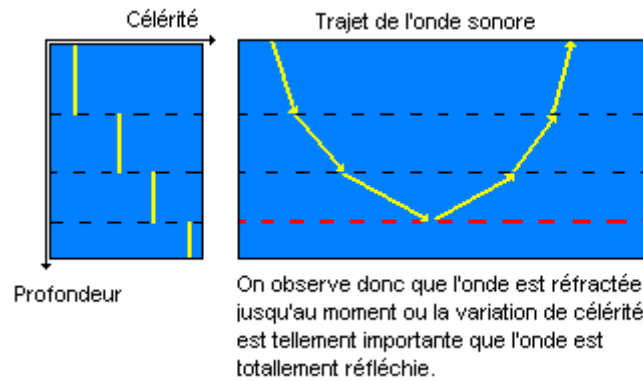
Bruits résiduels dans la masse d'eau (Acoustical Society of America, 2004)

3.2. Courbure des rayons sonores

La colonne d'eau est très souvent stratifiée, comme nous l'avons vu précédemment la célérité du son dans l'eau de mer varie en fonction de la densité (Température, Pression, Salinité).

Les variations de densités ont également une influence sur la direction de l'onde sonore. Lors du passage de l'onde sonore dans deux milieux de natures différentes, la célérité de l'onde varie et provoque un changement de direction de celle-ci.

Si le gradient de célérité est verticale (ce qui est le plus courant), alors l'augmentation de la célérité provoque une réfraction de l'onde qui tend de plus en plus vers l'**horizontale**. Lorsque cette augmentation de célérité est assez importante (seuil), l'onde est totalement réfléchie, la transmission dans la couche d'eau inférieure n'est plus possible.



Réflexion et réfraction dans la couche d'eau en fonction de la célérité (modifiée, d'après Lurton, 1998)

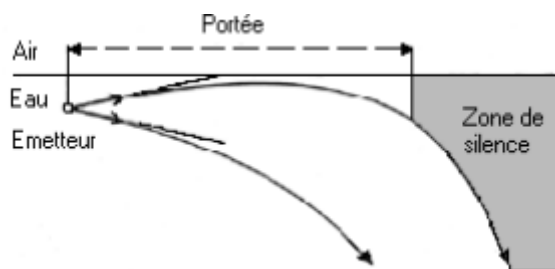
Si la célérité diminue alors l'onde est réfractée et tendra de plus en plus vers la **verticale**. La courbure se fait donc dans l'autre sens.

Dans la réalité, la variation de célérité se fait de manière plus continue, la déformation de la direction se fait donc également de manière continue. De plus elle peut augmenter ou diminuer au sein de la couche d'eau.

C'est pourquoi la trajectographie des rayons sonores est très complexe et induit des zones plus ou moins propices à la propagation du son : zone de silence et chenal sonore.

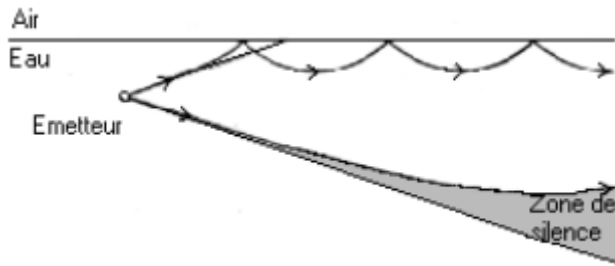
3.3. Zone de silence

La courbure des rayons sonores due au gradient de célérité empêche le son d'insonifier toute la masse d'eau. Il y a alors création de zones de silence; il est impossible de prospecter dans ces zones par l'acoustique.



Zone de silence due à une célérité décroissante.

Ici nous observons la zone de silence induite par la courbure des rayons sonores dans le cas où la célérité diminue avec la profondeur

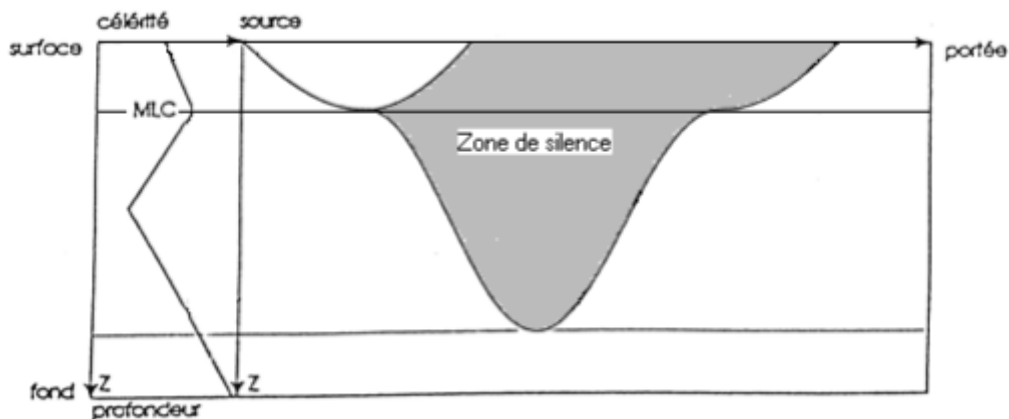


Zone de silence due a une célérité croissante

Dans le second cas, nous observons la zone de silence dans le cas ou la célérité augmente avec la profondeur.

Bien sûr, dans la colonne d'eau, la célérité peut augmenter dans une certaine tranche d'eau puis diminuer dans une seconde.

Les thermoclines qu'elles soient saisonnières (surface) ou permanentes (profondeur) sont fréquentes dans les océans du globe. En plus de former des barrières thermiques, elles constituent des maximums de célérité. C'est à dire des zones ou la célérité varie fortement



Zone de silence créée par l'existence d'un Maximum Local de Célérité (MLC)

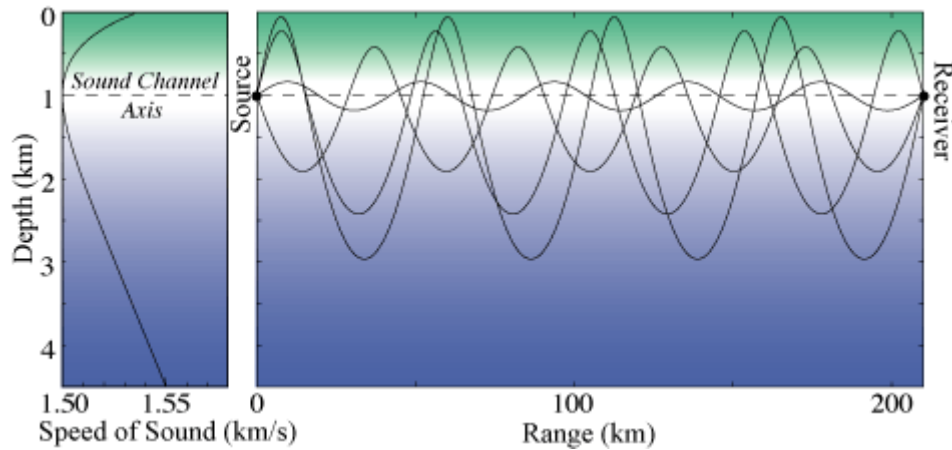
Les variations de célérité peuvent créer des zones de silence très importantes, en particulier s'il existe un maximum local de célérité. Tous les systèmes acoustiques sont donc limités par une portée qui dépend directement des caractéristiques de l'eau de mer.

3.4. Chenal sonore

Comme nous l'avons vu précédemment (*voir chapitre célérité*), et en généralisant, la célérité varie dans la couche d'eau de la façon suivante:

- Elle augmente très légèrement dans la couche mélangée de surface (absente sur la première figure)
- Elle diminue dans la zone de la thermocline permanente ou saisonnière
- Elle augmente à nouveau sous la zone de thermocline car elle dépend de la profondeur

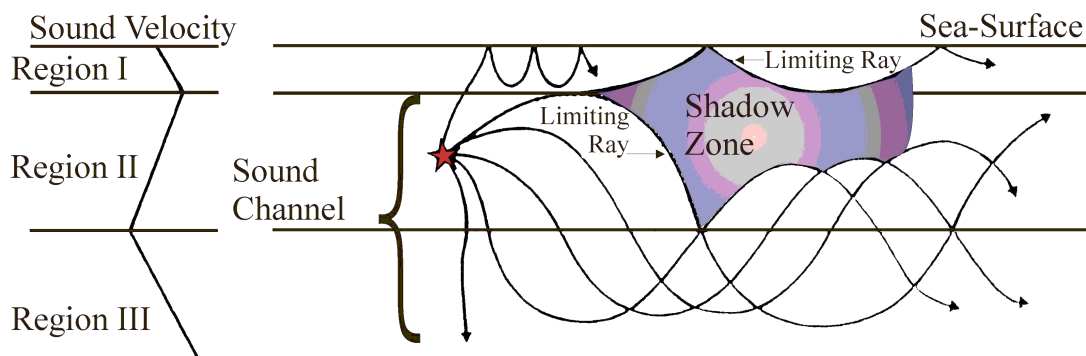
Prenons le cas des océans présentant une thermocline, nous pouvons constater qu'une zone semble être particulièrement adaptée à la transmission du son à grande distance.



Trajet des rayons sonores lors d'une émission dans la zone de thermocline

La zone autour de la thermocline est propice à la propagation du son. En effet à la base de la thermocline, les rayons subissent des réfractions successives (due aux variations de célérité) qui les font osciller. Cette zone est appelée **chenal sonore**.

Les rayons ne rencontrent ni le fond ni la surface C'est pourquoi, ils peuvent se propager sur de longues distances en perdant progressivement de l'énergie.



Trajet des rayons sonores et mise en évidence du chenal sonore et de la zone de silence

GLOSSAIRE

ABSORPTION MOLÉCULAIRE: Amortissement des ondes sonores dû à la viscosité du fluide et à la relaxation des molécules.

ACOUSTIQUE: Partie de la physique qui s'intéresse aux propriétés, à la production, à la propagation et à la réception des sons.

ALTERNATIF: Se dit d'un phénomène qui oscille entre deux états.

AMPLITUDE: Valeurs maximales (en maximum et minimum) de l'oscillation d'une onde par rapport à sa position moyenne.

BANDE PASSANTE: Ensemble des fréquences où le système est opérationnel. Le facteur de qualité est directement lié aux fréquences utilisées.

BRUIT: Phénomène sonore parasite qui s'ajoute au signal utile.

CÉLÉRITÉ: Distance parcourue par l'onde en une seconde.

COEFFICIENT DE COMPRESSIBILITÉ: Caractérise la capacité d'un milieu à être compressé. Varie avec la température, la salinité et la profondeur.

DÉCIBEL: Unité logarithmique permettant d'exprimer des niveaux sonores de pression, d'intensité, ou de puissance.

DENSITÉ: Rapport de la masse et du volume d'un milieu.

DIFFUSION: Dispersion de l'énergie dans toutes les directions.

DIVERGENCE GÉOMÉTRIQUE: Propagation de l'énergie sur des sphères concentriques de rayon croissant.

FRÉQUENCE: Nombre d'oscillations par seconde.

IMPÉDANCE: Résistance à la transmission de la pression sonore caractérisant la nature du fond. Rapport de la pression et de la vitesse vibratoire particulière.

INTENSITÉ: Valeur moyenne du flux d'énergie traversant une surface unitaire perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde pendant une unité de temps.

LONGUEUR D'ONDE: Distance parcourue par une onde entre deux états similaires consécutifs.

ONDE PLANE: Forme d'onde dont les surfaces d'ondes sont des plans parallèles. La direction de propagation est unique et constante.

ONDE PROGRESSIVE: Se dit d'une onde qui n'est pas stationnaire.

ONDE SONORE: Déformation alternative d'un milieu physique.

ONDE SPHÉRIQUE: Forme d'onde dont les surfaces d'ondes sont des sphères concentriques.

ONDE STATIONNAIRE: Se dit d'une onde dont l'évolution reste identique au cours du temps.

PÉRIODE: Temps écoulé entre deux états similaires consécutifs de l'onde.

PERTE CONVENTIONNELLE DE PROPAGATION: Amortissement des ondes sonores dû à l'action conjuguée de la divergence géométrique et de l'absorption moléculaire.

PRESSION ACOUSTIQUE: Différence entre la pression instantanée mesurée et la pression hydrostatique.

PROPAGATION: Déplacement progressif d'énergie dans un milieu déterminé.

PUISSANCE: Quantité d'énergie sur une surface donnée. Produit de l'intensité par la surface considérée.

RÉFLEXION SPÉCULAIRE: Renvoi de l'onde selon une direction symétrique par rapport à la normale au point d'incidence.

RÉFLEXION: Renvoi d'une onde provoqué par la rencontre d'une surface.

RÉFRACTION: Changement de direction d'une onde passant d'un milieu à un autre.

RELAXATION: Dissociation de composés ioniques due à une variation de pression.

RÉTRODIFFUSION: Renvoi de l'onde dans la direction opposée à la direction incidente.

RÉVERBÉRATION: Retour d'énergie à la source sonore autre que par rétrodiffusion.

SURFACE D'ONDE: Surface dont les particules sont atteintes par un même ébranlement initial.

TRAJECTOGRAPHIE: Ensemble des trajectoires des ondes induites par l'angle d'incidence de l'onde et les caractéristiques du milieu.

VISCOSITÉ: Capacité d'un fluide à transmettre une déformation. Plus le fluide est visqueux, plus il absorbe de l'énergie et moins la déformation se propage loin.

VITESSE VIBRATOIRE PARTICULAIRE: Vitesse d'une particule sans prendre en compte la vitesse due au mouvement global de l'onde.