

Bases physiques des ultrasons

❖ Nature des ultrasons

1. Ondes sonores
2. Vitesse de propagation = célérité
3. Production des ondes sonores
4. Caractéristiques de l'onde
5. Les gammes de fréquences des U.S.
6. Equation d'onde

❖ Puissance d'une onde U.S.

1. Impédance d'un milieu
2. Puissance acoustique = intensité acoustique
3. Puissance acoustique et amplitude
4. Réflexion - Transmission

❖ Atténuation - Propagation - Diffraction

❖ Echographie statique

❖ Echographie dynamique - effet Doppler

1. Emetteur fixe - Récepteur mobile
2. Emetteur mobile - Récepteur fixe
3. Emetteur mobile - Récepteur mobile

1. Ondes sonores

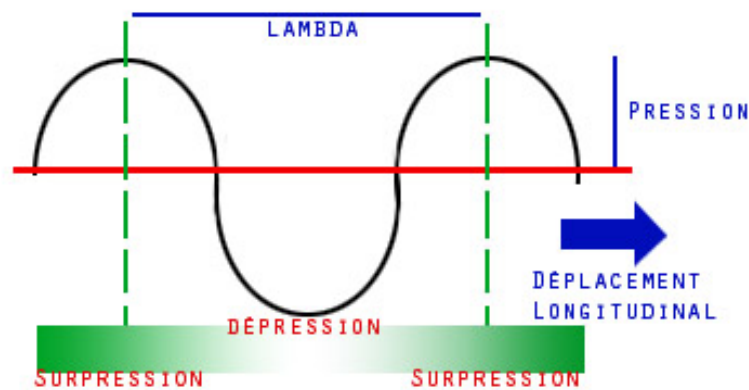
Une **onde** est une énergie qui se déplace et qui occasionne le déplacement d'une perturbation dans un milieu.

Une **onde progressive** est une onde qui se déplace.

Une **onde mécanique** est une onde constituée d'énergie mécanique ; la perturbation est un déplacement local des particules du milieu.

Une **onde sonore** est une onde mécanique.

Le milieu de propagation de l'onde ultrasonore est soumis à une succession de surpressions et de dépressions et ses particules constitutives sont alors animées d'un mouvement de type sinusoïdal de va-et-vient dans l'axe de déplacement des ultrasons.



Propriétés du milieu pour une onde mécanique :

- Pour que les particules du milieu puissent revenir à leur état initial, il faut que le milieu soit élastique.
- L'élasticité d'un milieu est caractérisée par un coefficient : le coefficient d'élasticité : B

La **masse volumique** μ (kg/m^3) du milieu influence la propagation de l'onde.

2. Vitesse de propagation = célérité



La célérité d'une onde mécanique dépend du milieu :

- élasticité (nature du milieu : gaz, liquide, solide)
- masse volumique

Milieu	c en m/s
Eau (37°)	1500
Air	340
Poumon	650 - 1160
Aluminium	6000
Os	2700 - 4100
Sang	1560
Foie	1549
Cerveau	1540
Muscle	1545 - 1630
Graisse	1450

Les tissus mous sont composés à 80% d'eau : la vitesse c est du même ordre que celle du son dans l'eau.

Dans un solide ou un liquide :

$$V = \sqrt{B/\rho}$$

B : élasticité du milieu

ρ : masse volumique du milieu

Dans un gaz :

$$V = \sqrt{\gamma P/\rho} = \sqrt{\gamma R T/\rho}$$

γ : coefficient qui définit la nature du gaz :

P : pression en Pascal (Pa)

$$1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 1013 \text{ hPa}$$

Loi des gaz parfaits : $P \times V = n \times R \times T$

P en Pa

V en m^3

n en mol

R en $8,314 \text{ (JK}^{-1}\text{mol}^{-1}\text{)}$

T en K

$$T \text{ (Kelvin)} = \theta \text{ (}^\circ\text{C)} + 273,15$$

3. Production des ondes sonores



Pour produire des ondes sonores, il faut placer un dispositif perturbant localement le milieu élastique.

Si on veut obtenir une onde sonore périodique, il faut que la perturbation soit aussi périodique.

ex : lame ou corde vibrante ; système à dépression / surpression

Pour les U.S., il s'agit d'un **transducteur à effet piézoélectrique**.

Un **transducteur** est un dispositif qui transforme une forme d'énergie en une autre. Il transforme l'énergie électrique de très haute fréquence en une énergie mécanique vibratoire de même fréquence.

Cette transformation est réversible car les contraintes mécaniques vibratoires provoquées par la variation de la pression acoustique permettent de recueillir des impulsions électriques alternatives.

Le phénomène **piézoélectrique** c'est la capacité du transducteur de transformer une énergie en une autre et donc d'être à la fois récepteur et émetteur d'U.S.

On produit généralement des U.S. en faisant vibrer une **lame cristalline de quartz** que l'on soumet à une tension électrique alternative.

Lorsque cette fréquence coïncide avec l'une des fréquences propres de la lame de quartz, laquelle dépend de son épaisseur, l'amplitude des oscillations mécaniques est très importante et provoque la propagation d'ondes ultrasonores dans l'air environnant. Une valeur typique de cette fréquence est 1 MHz obtenue pour une épaisseur d'environ 5 mm. En réalité, cette épaisseur est bien plus grande que celle de la lame de quartz ; c'est l'épaisseur d'un ensemble constitué d'une lame mince de quartz flanquée de deux lames d'acier. Un tel ensemble vibre en fait à la fréquence définie par l'épaisseur totale.

La fréquence de l'onde U.S. est donc définie par **l'épaisseur de la céramique**. Ainsi pour changer de fréquence d'émission faut-il, en général, changer de céramique donc de sonde.

4. Caractéristiques de l'onde



- Périodicité temporelle

<u>Période</u> :	T (en s)	
<u>Fréquence</u> :	$f = 1/T$	f (en Hz)
<u>Pulsation</u> :	$\omega = 2\pi f = 2\pi/T$	ω (en rad/s)

- Périodicité spatiale

Longueur d'onde : λ = distance parcourue par l'onde en une période

$$\lambda = vT = v/f \quad \lambda \text{ (en m)}$$

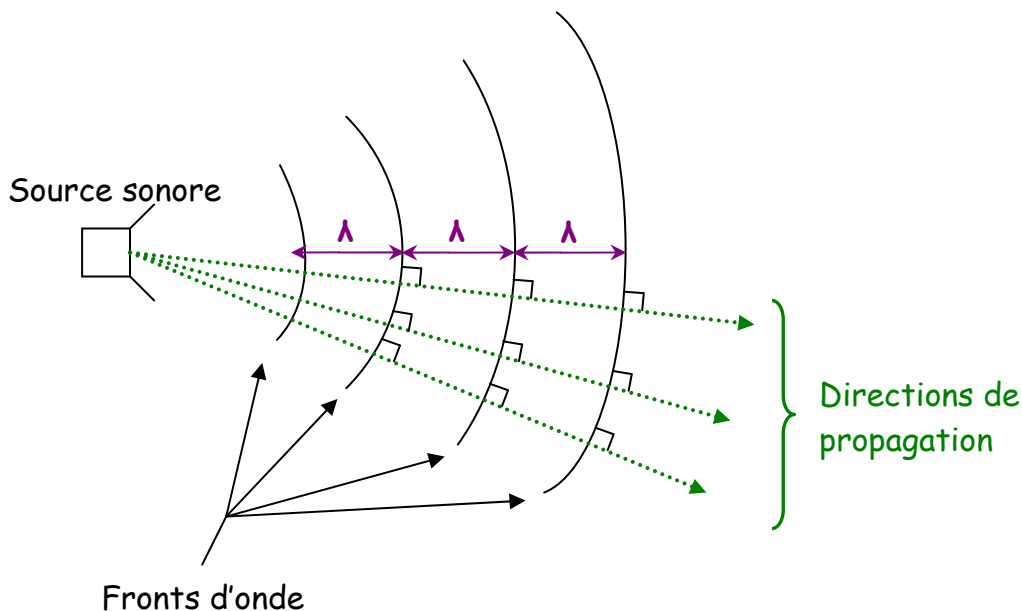
Un éloignement des particules du milieu produit une dépression.

Un rapprochement produit une surpression.

Deux points séparés par un multiple de λ vibrent en phase.

Deux points consécutifs qui vibrent en phase sont séparés par une longueur d'onde.

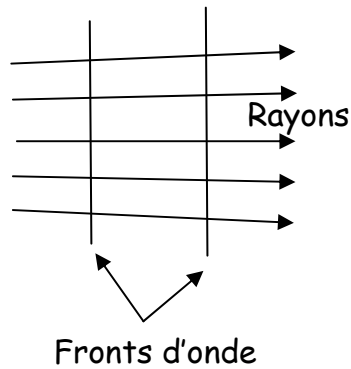
- Nature de l'onde



Ondes sphériques émises par une source ponctuelle. Les arcs de cercles représentent des fronts d'onde sphériques centrés sur la source. Les rayons sont des lignes radiales pointant vers l'extérieur à partir de la source et perpendiculaires aux fronts d'onde.

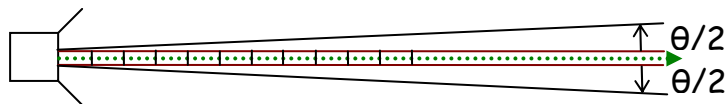
Si on se place très loin de la source sonore (le rayon de la sphère est très grand), on considère que les fronts d'onde sont plans : ce sont des fronts d'ondes planes.

Les ondes U.S. sont des ondes très **directives**. En effet ; la directivité est liée à la fréquence des U.S. A basse fréquence, la propagation se fait dans toutes les directions. A très haute fréquence, la propagation se fait essentiellement vers l'avant, d'où une meilleure qualité d'image.



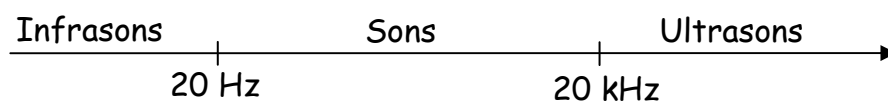
A grande distance de la source ponctuelle, les fronts d'onde deviennent des plans presque parallèles et les rayons deviennent des droites pratiquement parallèles et perpendiculaires aux plans. Ainsi, une partie d'un front d'onde sphérique équivaut approximativement à une onde plane.

On dit ainsi qu'une onde est directive si l'angle de divergence est très petit ($\ll 1$)

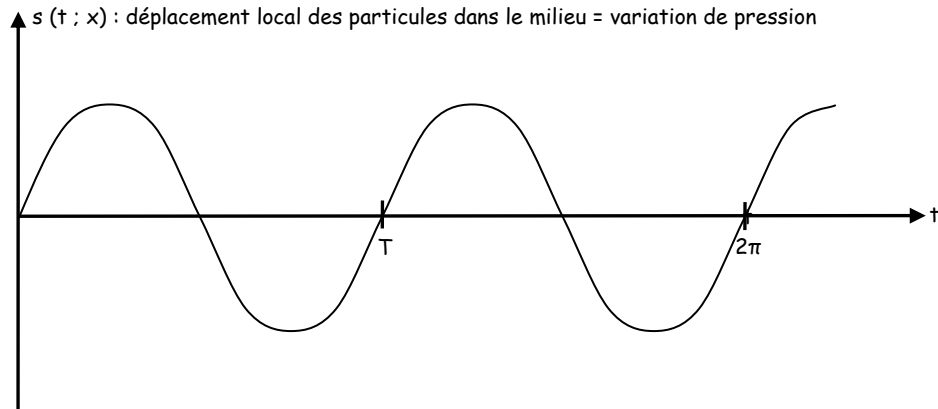


Angle de divergence = θ

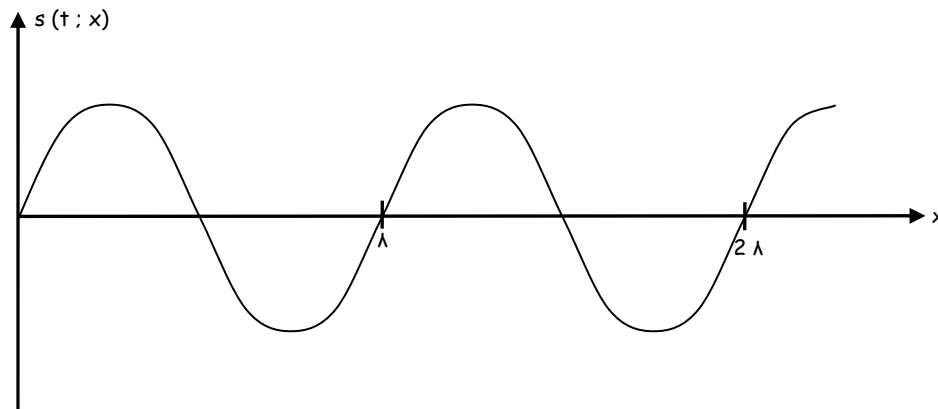
5. Les gammes de fréquences des U.S.



6. Equation d'onde

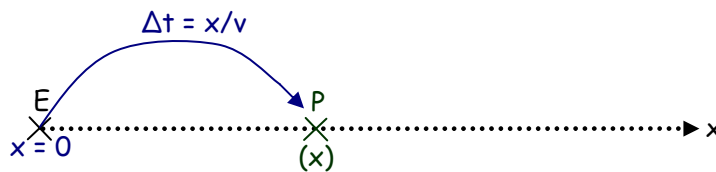


$s(t; x)$ est du type $S_m \sin \omega t$
 x est fixe $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$



$s(t; x)$ est du type $S_m \sin kx$
 $k = 2\pi/\lambda = \text{nombre d'ondes}$

Désormais, considérons le w et le t .



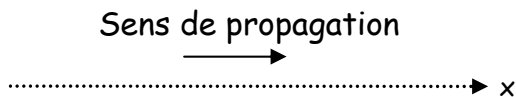
v = vitesse de propagation

$$s_E(t) = S_m \sin \omega t$$

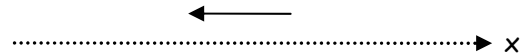
$$\begin{aligned} s(t; x) &= S_m \sin(\omega(t - \Delta t)) \\ &= S_m \sin(\omega t - \omega \Delta t) \\ &= S_m \sin(\omega t - 2\pi/T \times x/v) \\ &= S_m \sin(\omega t - kx) \end{aligned}$$

S_m = amplitude

$$\omega = 2\pi/T \quad k = 2\pi/\lambda$$



$$s(t ; x) = S_m \sin (\omega t - kx)$$



$$s(t ; x) = S_m \sin (\omega t + kx)$$

❖ Puissance d'une onde U.S.



1. Impédance d'un milieu

L'impédance d'un milieu traduit la capacité de ce milieu à propager une onde U.S.

$$Z = \rho \times v$$

Z : impédance (en Rayl = $\text{kg}/(\text{s} \times \text{m}^2)$)

ρ : masse volumique (en kg/m^3)

v : vitesse de propagation de l'onde dans ce milieu (en m/s)

Remarque : $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Exemple :

Air : $v = 340 \text{ m/s}$

1 mol d'air a une masse = 29 g

Dans 25 L il y a 1 mol.

$Z = \rho v$

$$\rho = m/\text{vol} = 29/25 = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ kg/dm}^3$$

$$\begin{aligned} \rho &= 1,16 \times (10^{-3} \text{ kg} \times (10^{-1} \text{ m})^{-3}) \\ &= 1,16 \times (10^{-3} \times 10^{+3} \text{ kg/m}^3) \\ &= 1,16 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= 1,16 \times 340 \\ &= 394 \text{ kg/s/m}^2 \text{ ou Rayl} \end{aligned}$$

2. Puissance acoustique = intensité acoustique (en médecine)



$$I = P_a / s$$

I : intensité acoustique en W/m²

P : puissance acoustique en W

S : section en m²

$$I_{dB} = 10 \log I_0 / I(x)$$

I : intensité acoustique en W/m²

I₀ : intensité acoustique de référence en W/m²

Seuil d'audibilité : 10⁻¹² W/m²

3. Puissance acoustique et amplitude



Soit l'onde acoustique définie par la fonction d'onde :

$$S(t) = S_m \sin(\omega t - kx)$$

S_m = l'amplitude de l'onde ; elle dépend de ΔP_m, la variation de pression maximale et de X_m, le déplacement local maxi des particules du milieu.

ω = 2πf = pulsation (en rad/s)

k = 2π/λ = nombre d'ondes

La puissance acoustique (transportée) est :

$$P_a = \frac{1}{2} Z \omega^2 S_m^2$$

4. Réflexion - Transmission



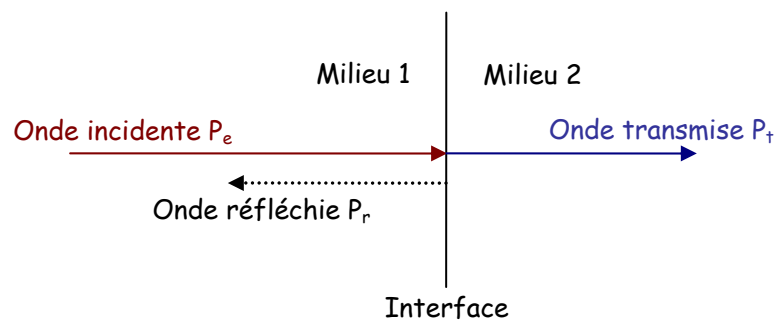
Une interface est la frontière entre deux milieux d'impédances différentes.

L'écho correspond à un signal enregistré lorsqu'une partie de l'énergie contenue dans le faisceau incident retourne vers la sonde.

Plusieurs conditions doivent être réunies afin que l'appareil enregistre des échos :

- le faisceau doit atteindre la zone réfléchissante ;
- l'énergie du signal réfléchi doit être suffisante pour atteindre la sonde ;
- la réflexion du faisceau doit se faire vers la sonde ;
- cette réflexion doit s'effectuer sur une surface la plus orthogonale au faisceau ultrasonore ;
- le milieu de propagation doit comporter des variations suffisantes d'impédances acoustiques pour qu'il y ait formation d'échos.

Il y a réflexion lorsque le faisceau rencontre une interface.



Milieu 1 : $Z_1 = \rho_1 v_1$

Milieu 2 : $Z_2 = \rho_2 v_2$

0

Le coefficient de réflexion est de :

$$R = P_r/P_e = (Z_1 - Z_2)^2 / (Z_1 + Z_2)^2$$

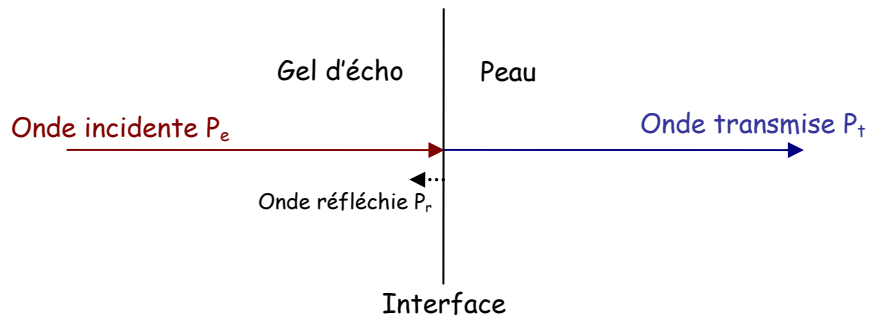
Le coefficient de transmission est de :

$$T = P_t/P_e = 4Z_1Z_2 / (Z_1 + Z_2)^2$$

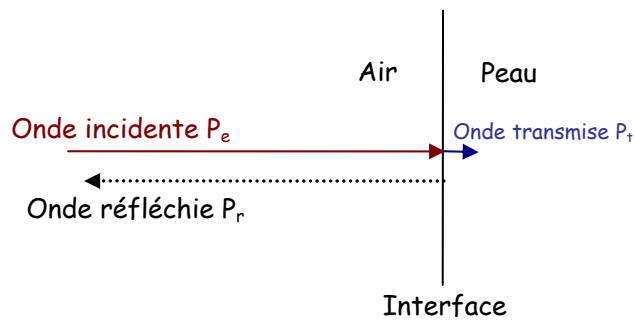
Ces coefficients sont toujours < 1 est sans unité !!!

$$R + T = 1$$

Si $Z_1 \approx Z_2$, $R \approx 0$, il n'y a presque pas d'onde réfléchie, par contre elle est presque intégralement transmise.



En revanche, si $Z_1 \ll Z_2$, $R \approx 1$, l'onde est quasiment réfléchi en totalité.



❖ Atténuation - Propagation - Diffraction



L'absorption est le phénomène de pertes d'énergie de l'onde au cours de sa propagation.

Cette perte d'énergie est due :

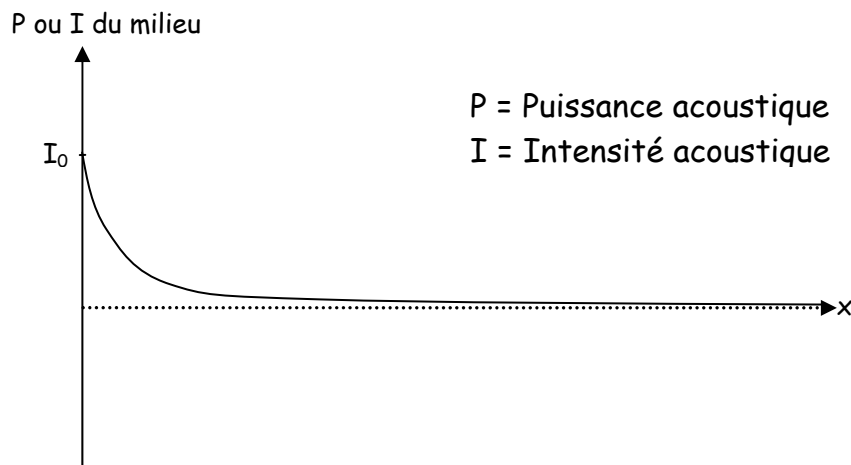
- à la viscosité du milieu (impédance);
- à la divergence du faisceau (à la fréquence)

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

I_0 = intensité acoustique initiale (en W/m^2)

x = distance parcourue par l'onde (en m ou cm)

μ = coefficient linéique d'absorption (en m^{-1} ou cm^{-1})



μ dépend donc de l'impédance et de la fréquence de l'onde.

L'**absorption** des U.S. dans un milieu homogène est d'autant plus grande que :

- la fréquence est grande ;
- le milieu a une masse spécifique ρ ou une impédance acoustique Z faible (l'air absorbe plus que l'eau)

Petit exemple : en boîte de nuit ; on ne perçoit que les sons graves en dehors de la boîte. Les sons graves sont des ondes à basse fréquence. L'atténuation est donc faible, donc μ diminue.

L'air constitue un barrage à l'échographie, c'est pourquoi il est nécessaire d'utiliser un gel à base d'eau qui facilite la transmission des U.S. de la sonde à la peau.

Un autre exemple ; pour une écho pelvienne il est nécessaire de boire beaucoup d'eau pour une meilleure transmission des U.S.

Les poumons ne sont pas visibles en échographie.

L'air a un Z faible, l'atténuation est forte et le μ est élevé.

Exemple :

Une onde U.S. de $f = 1$ MHz traverse de la graisse de $\mu = 10 \text{ m}^{-1}$

- Quelle est l'atténuation de l'onde après une traversée de 20 cm ?
- Exprimer cette atténuation en dB.

a. $I(x = 20\text{cm}) = I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-(10 \times 0,2)} = 0,135 I_0$

Donc l'atténuation sort d'un simple produit en croix.

$(I_0 - I(x))/I_0 = 1 - I(x)/I_0 = 1 - 0,135 = 0,865$ soit l'atténuation est de 86,5 % du faisceau initial.

b. **Atténuation en dB : $A_{dB} = 10 \log I_0/I(x)$**
 $= 10 \log (1/0,138) = 8,7 \text{ dB}$

Remarque : en physique la puissance s'exprime en W/m^2
en médecine la puissance et l'intensité en W/m^2

On observe le phénomène de **diffraction** lorsqu'une onde ultrasonore rencontre un obstacle. Il y a alors émission d'autres ondes ultrasonores dans des directions différentes de la direction de l'onde incidente.

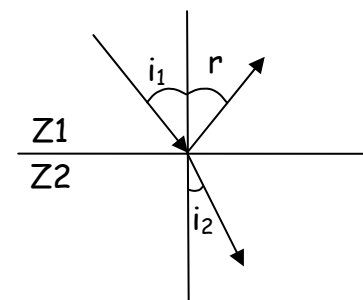
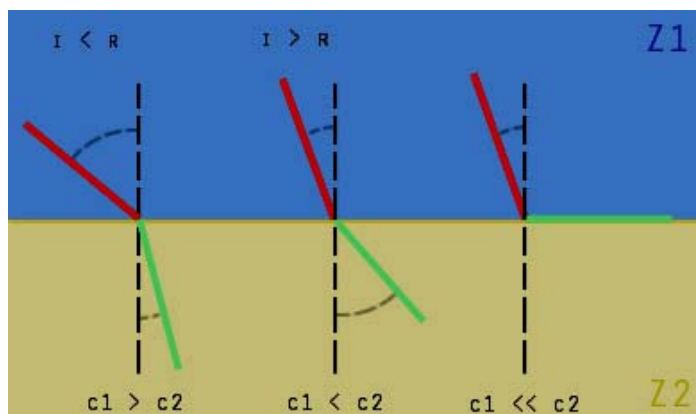
D'où une détérioration de la qualité de l'image en altérant la qualité de l'onde propagée et l'apparition d'une intensité non nulle dans la zone d'ombre habituelle (création d'artefacts).

Atténuation à la traversée d'un milieu hétérogène :

Dans un milieu hétérogène, l'atténuation est due à 3 phénomènes :

- l'**absorption** qui suit la loi de l'absorption dans un milieu homogène vue ci-dessus ;
- la **diffraction** qui dépend de la grandeur relative de l'obstacle
- la **réfraction** qui suit la loi du dioptré acoustique (même principe que pour le dioptré optique)

Le faisceau incident i est dans le même plan que le faisceau réfracté.



Loi du dioptré acoustique :

$$\sin i_1 / \sin i_2 = c_1 / c_2$$

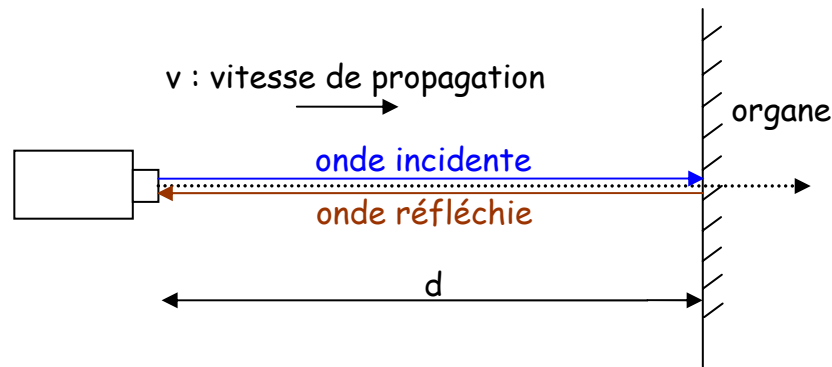
$$i_1 = r$$

r = angle de réflexion

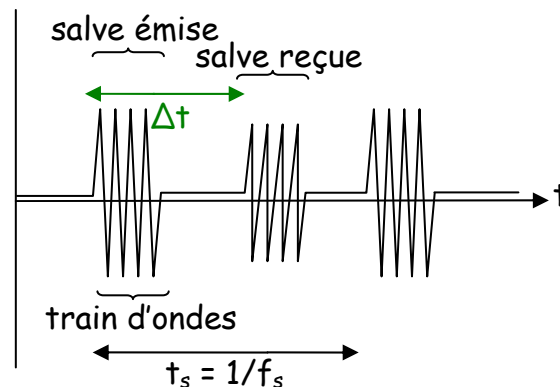
L'onde transmise se propage dans un milieu ayant une célérité différente si bien qu'elle fait avec l'interface un angle différent de l'angle d'incidence i_1 : elle est réfractée. L'angle de réfraction i_2 est plus petit que l'angle d'incidence si la célérité du deuxième milieu (c_2) est plus faible que dans le premier (c_1). A l'inverse il est plus grand si c_2 est supérieur à c_1 .

L'importance de cette réfraction obéit à la **loi de SNELL**.

En écho, il faut toujours tenir la sonde perpendiculaire à la structure étudiée.



Δt = durée du retard de l'onde réfléchie



$$v = 2d/\Delta t$$

$2d$ = durée d'un aller-retour

Exemple : Si la sonde émet des salves avec une fréquence f_s ; si la vitesse de propagation dans le milieu est v , quelle est la **distance maximale d'exploration** ?

Durée entre deux salves : $t_s = 1/f_s$

Il faut que l'onde réfléchie arrive à la sonde avant l'émission de la salve suivante. Donc :

$$d_{\max} = v \times t_s / 2 = v / 2f_s$$

Il est ainsi important d'introduire une donnée essentielle : la **fréquence de récurrence**. Il s'agit de la fréquence de répétition des impulsions. Après l'émission d'une impulsion, la sonde est utilisée pour recevoir les échos. Lorsqu'il s'est écoulé un temps suffisant pour que les échos des structures les plus profondes soient revenues, on peut réémettre une nouvelle impulsion et ainsi de suite.

Lorsqu'un faisceau ultrasonore, émis par une source, traverse des tissus biologiques, il rencontre un certain nombre de cibles, ou interfaces fixes. La fréquence réfléchiée par ces cibles fixes est identique à la fréquence émise: on dit qu'il n'y a pas de différence entre la fréquence d'émission et la fréquence de réception. Si la cible se déplace, comme les globules rouges du sang circulant, il se produit une modification de la fréquence du faisceau réfléchi.

1. Emetteur fixe - Récepteur mobile

Soit un émetteur produisant des U.S. de fréquence f . Ces U.S. se propagent dans un milieu à la vitesse v .



- Le récepteur R se déplace dans la direction des U.S. et se rapproche de l'émetteur E avec une vitesse v_R .
 - Si le récepteur était fixe en une seconde ; le récepteur percevrait f fronts d'onde.
 - Si le récepteur est animé d'une vitesse v_R , le récepteur perçoit $f' = f + v_R/\lambda$ fronts d'onde en une seconde.

$$f' = f + v_R/\lambda \quad \text{or} \quad \lambda = v/f$$

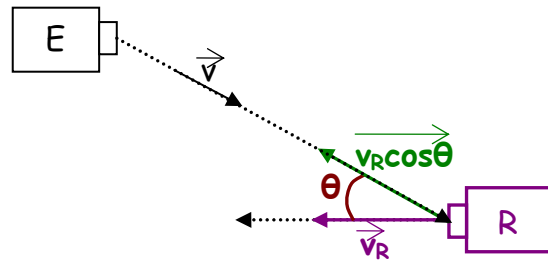
$$f' = f + v_R/(v/f) = f(1 + v_R/v)$$

$$f' = f \times (v + v_R)/v$$

- Le récepteur se déplace dans la direction des U.S. et s'éloigne de l'émetteur avec une vitesse v_R .

$$f' = f \times (v - v_R)/v$$

Donc si R $\longrightarrow$ E alors $f' > f$
 si R $\longleftarrow$ E alors $f' < f$



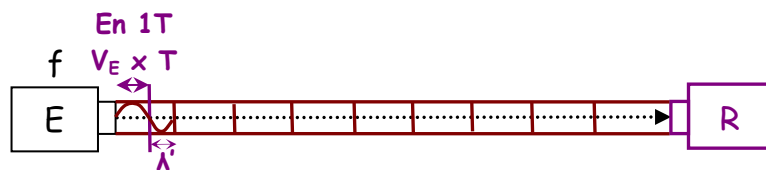
$$f' = f \times (v + v_R \cos\theta) / v$$

La différence de fréquence ΔF est positive si la cible se rapproche de la source et négative si elle s'en éloigne. ΔF est appelé la fréquence Doppler. En exploration vasculaire, la valeur de ΔF se situe entre 50 Hz et 20 KHz ce qui, par chance, correspond à une gamme de fréquences perceptible par l'oreille humaine.

2. Emetteur mobile - Récepteur fixe



Soit un émetteur produisant des U.S. de fréquence f . Ces U.S. se propagent dans un milieu à la vitesse v .



- Si l'émetteur était fixe, il émettrait des U.S. de longueur d'onde :

$$\lambda = v / f$$
- Si l'émetteur est animé d'une vitesse v_E dans le sens de propagation, il émet des U.S. de longueur d'onde :

$$\lambda' = \lambda - v_E T$$

$$\lambda' = \lambda - v_E T$$

$$\text{or } f' = v / \lambda' \text{ ou } \lambda' = v / f'$$

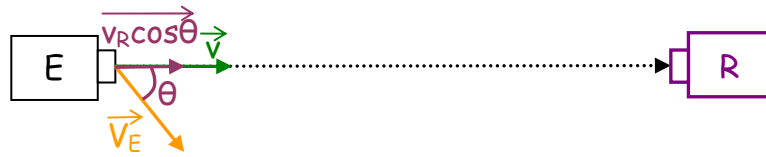
$$\lambda = v / f \text{ et } T = 1 / f$$

$$\text{Donc } v / f' = v / f - v_E / f = (v - v_E) / f$$

$$f' = f \times v / (v - v_E)$$

- Si l'émetteur s'éloigne du récepteur :

$$f' = f \times v / (v + v_E)$$



$$f' = f \times v / (v + v_E \cos \theta)$$

Si l'émetteur se rapproche du récepteur, $f' > f$.

3. Emetteur mobile - Récepteur mobile



$$f' = f \times (v +/- v_R) / (v +/- v_E)$$

Si le récepteur se rapproche de l'émetteur de l'émetteur :

$$f' = f \times (v + v_R) / (v +/- v_E) \dots$$

...et si l'émetteur se rapproche du récepteur, on aura donc :

$$f' = f \times (v + v_R) / (v - v_E)$$