

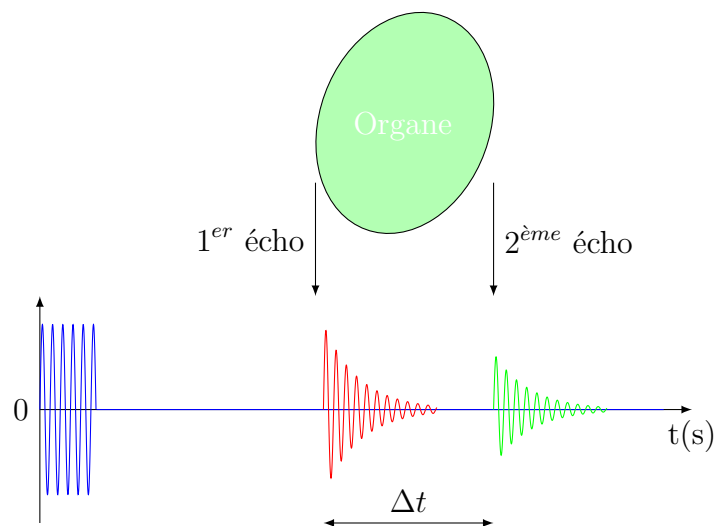
U.E 2.11
PHYSIQUE FONDAMENTALE

SEMESTRE 1

Chapitre 4 :
Ultrasons

David ALBERTO
david.alberto@ac-normandie.fr

DTS I.M.R.T
2020 / 2021



Dans ce chapitre . . .

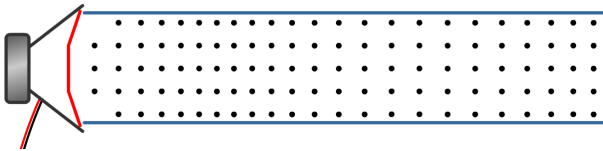
I.	Nature du son	1
I.1	○ Mécanisme de propagation	1
I.2	○ Grandeurs caractéristiques d'une onde sonore	1
I.3	○ Production et détection des ultrasons	2
II.	Acoustique	2
II.1	○ Intensité sonore I	2
II.2	○ Niveau sonore L	2
II.3	○ Courbe de sensibilité de l'oreille humaine	3
III.	Influence du milieu de propagation	3
III.1	○ Absorption	3
III.2	○ Diffraction	4
III.3	○ Impédance acoustique	4
III.4	○ Coefficient de changement de milieu	5
III.5	○ Visualisation graphique de l'intensité dans les tissus	6
IV.	Principe de l'échographie de type A	7

I. NATURE DU SON

I.1 ○ Mécanisme de propagation

Animation :

Propagation d'une onde sonore plane



La membrane du HP vibre, et transmet les vibrations aux tranches d'air voisines. Ces tranches d'air comprimées se dilatent, et propagent le mouvement aux tranches d'air voisines. Légendes : zones de compression, de dilatation. Chaque tranche d'air revient ensuite à sa position initiale :

lorsque l'onde se propage, il y a propagation d'énergie sans déplacement de matière.

Contrairement aux ondes EM, le son nécessite un milieu matériel pour se propager.

I.2 ○ Grandeurs caractéristiques d'une onde sonore

a. Fréquence

La fréquence de l'onde sonore prend une **valeur imposée par l'émetteur**.

La fréquence **ne dépend pas du milieu** dans lequel se propage l'onde : elle reste constante durant le trajet de l'onde. Une fréquence élevée se traduit par un son aigu, une fréquence basse par un son grave.

b. Célérité

Contrairement aux ondes électromagnétiques, pour lesquelles la célérité est toujours considérée voisine de $3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, la célérité des ondes sonores varie beaucoup selon le milieu matériel traversé.

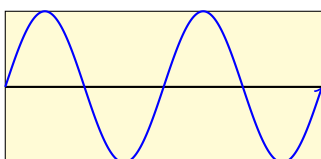
Plus le milieu est rigide, plus la célérité augmente : ainsi elle augmente en passant d'un milieu *gazeux* à un milieu *liquide* et d'un milieu liquide à un milieu *solide*.

Lorsqu'une onde sonore change de milieu, sa célérité change, mais pas sa fréquence. Pour un même milieu, la célérité de l'onde sonore augmente lorsque la température augmente.

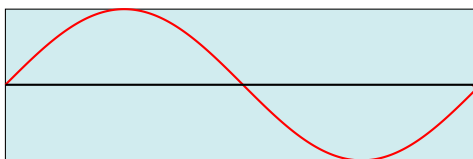
Milieu	Célérité ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
air (0 °)	331
air (20 °)	344
eau	1500
os	2630
cuivre	5000

c. Longueur d'onde

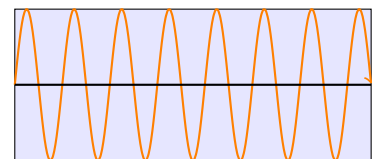
La relation $\lambda = \frac{c}{f}$ est applicable. Par conséquent, si f est constante alors que c varie, on peut en conclure que, en changeant de milieu, la longueur d'onde varie comme la célérité :



milieu 1



milieu 2 : célérité plus élevée, λ plus élevée



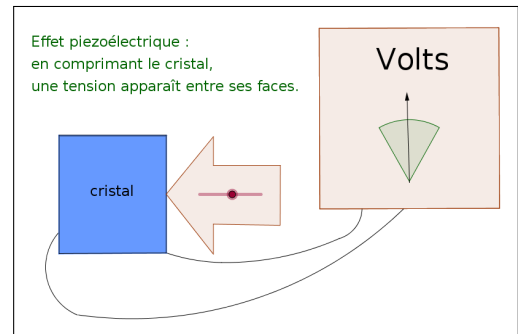
milieu 3 : célérité plus faible, λ plus faible

I.3 ○ Production et détection des ultrasons

Animation Geogebra :

<https://www.geogebra.org/m/JJjn8ufV>

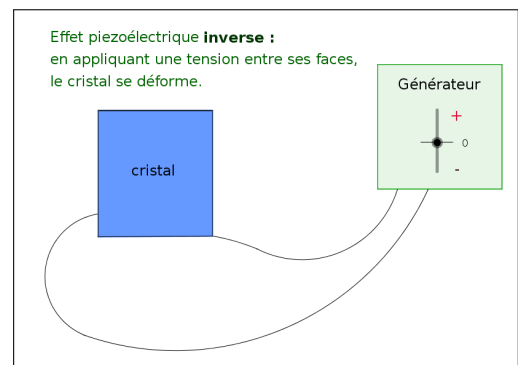
Certains matériaux, comme le quartz, possèdent une propriété : en exerçant une pression sur le cristal, il apparaît une tension électrique sur ses faces. C'est l'**effet piézo-électrique**. Cet effet permet de **détecter des ondes ultrasonores**.



Animation Geogebra :

<https://www.geogebra.org/m/Uu9XQHUB>

Cet effet est *réversible* : si on applique une tension à leurs bornes, le cristal se déforme. Ainsi, l'application d'une tension alternative sinusoïdale crée une vibration du cristal. C'est l'**effet piézo-électrique inverse**. Cet effet permet de **produire des ondes ultrasonores**.



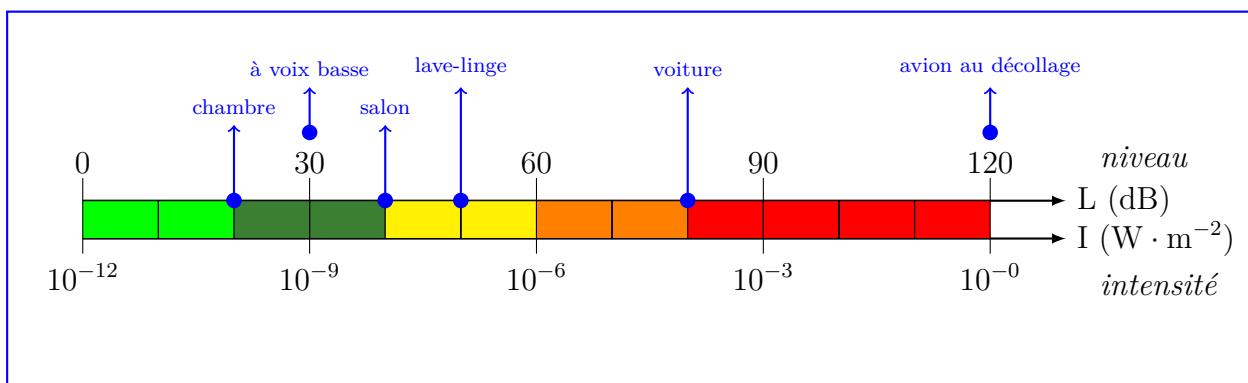
La réversibilité de cet effet permet de concevoir des sondes échographiques pouvant jouer les rôles à la fois d'émetteur et de récepteur. En pratique, les matériaux utilisés sont des céramiques.

II.ACOUSTIQUE

II.1 ○ Intensité sonore I

C'est la puissance transportée par l'onde par unité de surface. Elle s'exprime en $W \cdot m^{-2}$.

L'intensité sonore peut couvrir une gamme très étendue de valeurs :



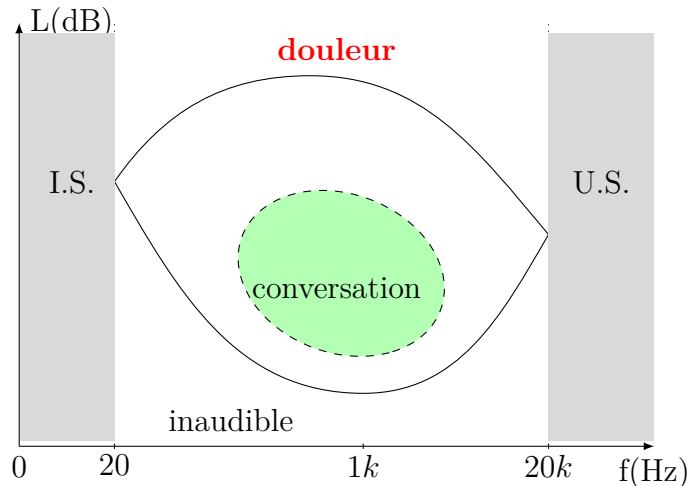
II.2 ○ Niveau sonore L

Pour traduire la sensibilité de l'oreille aux sons, on définit le **niveau sonore L**, en décibels (dB).

- Seuil de douleur : 120 dB
- Si un son devient deux fois plus fort, alors L augmente de 3,0 dB

II.3 ◦ Courbe de sensibilité de l'oreille humaine

- courbe inférieure : seuil d'audition.
- la sensibilité de l'oreille varie avec la fréquence, elle est maximale autour de 1 kHz (fréquences de la voix).
- les **infrasons** sont les sons de fréquence inférieure à 20 Hz. Ils sont inaudibles.
- les **ultrasons** sont les sons de fréquence supérieure à 20 kHz. Ils sont inaudibles.



III. INFLUENCE DU MILIEU DE PROPAGATION

III.1 ◦ Absorption

En se propageant, l'intensité sonore diminue, suite à l'interaction de l'onde avec la matière : une partie de l'énergie est dissipée dans le milieu sous forme de chaleur (agitation thermique).

L'intensité sonore diminue de façon exponentielle avec la distance x parcourue :

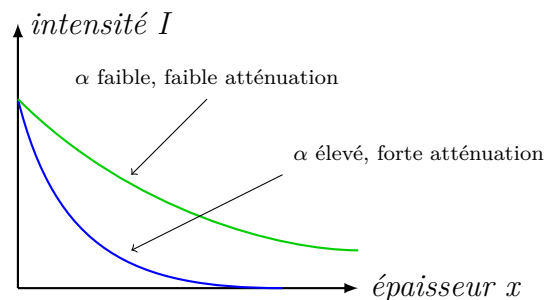
$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}$$

α : coefficient d'atténuation (cm^{-1})

Le coefficient d'atténuation α dépend du milieu de propagation.

Il varie également avec la fréquence de l'onde, de façon très sensible :

plus la fréquence est élevée, plus l'atténuation est forte.



III.2 ○ Diffraction

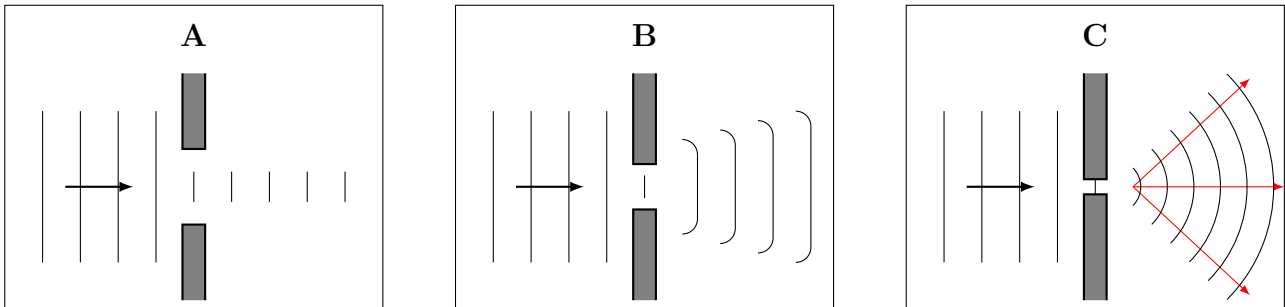


FIGURE 1 – Diffraction : A - absente B - légère C - marquée

Lorsqu'un faisceau d'ondes sonores planes traverse une ouverture ou rencontre un obstacle, ce faisceau peut se déformer en s'étalant sur les côtés : c'est le phénomène de **diffraction**.

En échographie, il faut éviter ce phénomène, car l'onde doit se propager en ligne droite et rester aussi plane que possible. Sinon, le signal revenant en écho sera trop faible.

Or, la diffraction n'apparaît qu'à la condition suivante : **si la longueur d'onde de l'onde est voisine (ou supérieure) à la dimension de l'obstacle**.

On peut limiter la diffraction en envoyant des ondes de *longueur d'onde faible*, c'est-à-dire de *fréquence élevée*.

En mettant en parallèle les phénomènes d'atténuation et de diffraction, une contradiction apparaît : l'atténuation requiert une faible fréquence, alors que la diffraction exige une fréquence élevée.

Le choix de la fréquence en échographie résulte donc d'*un compromis* entre ces deux exigences. En pratique, les fréquences utilisées sont de l'ordre du MHz.

III.3 ○ Impédance acoustique

L'impédance d'un milieu caractérise sa capacité à reprendre sa forme après déformation par l'onde sonore.

Elle est définie par la relation :

$$Z = \rho \times c$$

L'impédance acoustique ne dépend pas de la fréquence de l'onde sonore.

milieu	ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	c ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Z ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
air	1,3	343	446
eau	1000	1480	$1,48 \cdot 10^6$
muscle	1040	1580	$1,64 \cdot 10^6$
graisse	920	1450	$1,33 \cdot 10^6$
os	1900	4000	$7,60 \cdot 10^6$

On peut retenir que **les tissus mous** ont des impédances comparables, voisines de celle de l'eau, et nettement inférieures à celle des os.

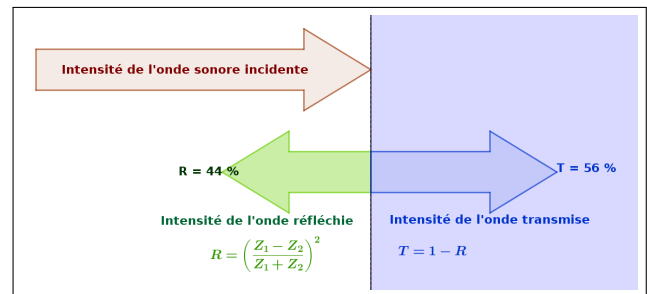
L'impédance très faible de l'air permet de distinguer les poumons des autres organes.

III.4 o Coefficient de changement de milieu

Animation : <https://ggbm.at/jgzp8cgf>

À une interface entre deux milieux différents, l'onde incidente se partage :

- une partie de l'onde est *transmise*
- une partie est *réfléchie*, et sera détectée en écho par la sonde échographique



Le pourcentage d'onde transmise se note \mathbf{T} : c'est le **coefficient de transmission**.

Le pourcentage d'onde réfléchie se note \mathbf{R} : c'est le **coefficient de réflexion**.

Si on note I_{inc} l'intensité de l'onde incidente :

- l'intensité transmise vaut : $I_{transmise} = T \times I_{inc}$
- l'intensité réfléchie vaut : $I_{réfléchie} = R \times I_{inc}$
- on peut aussi écrire : $I_{inc} = I_{transmise} + I_{réfléchie}$ (par conservation de l'énergie)

Les valeurs des coefficients R et T dépendent uniquement des impédances des deux milieux de part et d'autre de l'interface :

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \quad \text{et} \quad T = 1 - R \quad (\text{ces formules ne sont pas à retenir})$$

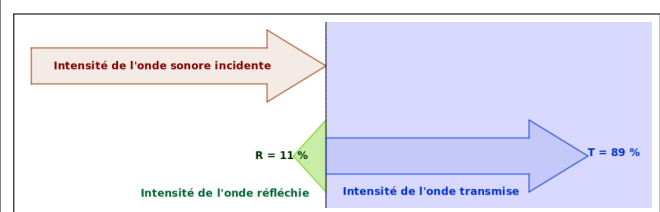
Trois situations peuvent se présenter, selon les rapports entre les impédances Z_1 et Z_2 :

Les milieux sont d'**impédances voisines** :

l'onde est presque uniquement *transmise*.

L'interface est dite *peu visible*.

C'est le cas de l'interface graisse - muscle.

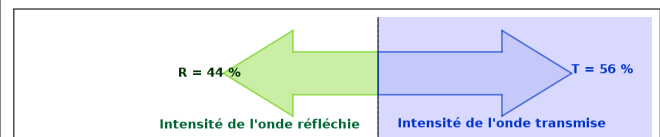


Les **impédances sont assez différentes** :

L'interface est dite *visible*.

Les fractions transmise et réfléchie sont comparables.

C'est le cas de l'interface muscle - os.

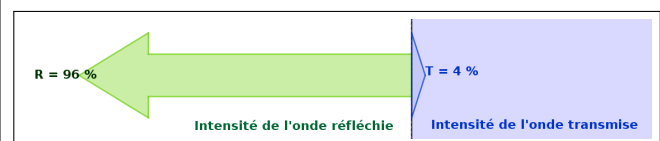


Les **impédances sont très différentes** :

l'onde est essentiellement *réfléchie*.

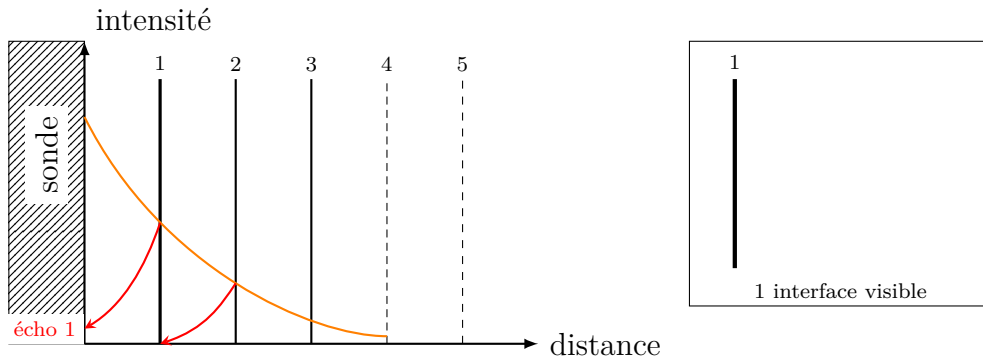
C'est le cas de l'interface air - graisse.

Dans ce cas, l'onde reste en dehors des tissus.

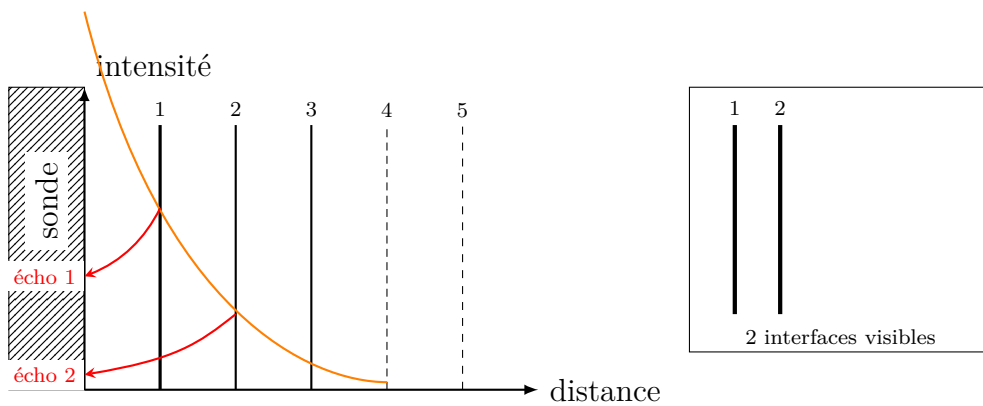


Pour pallier ce problème, on applique du **gel échographique** entre la sonde et la peau. Le gel possédant une impédance proche de celle des tissus mous, on se retrouve dans la première situation (forte transmission).

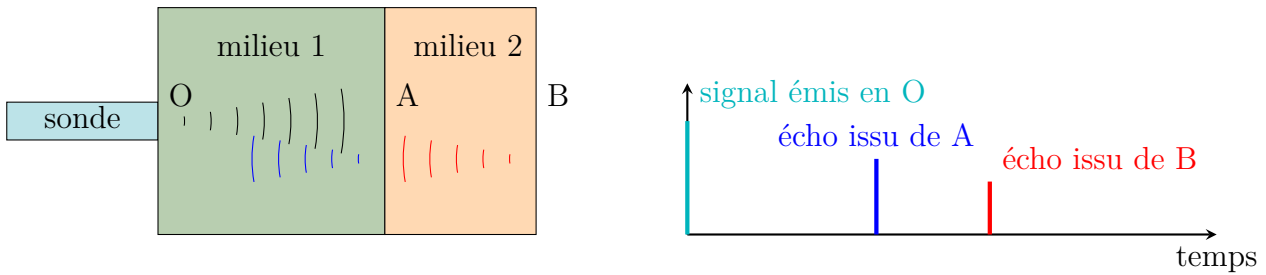
III.5 ○ Visualisation graphique de l'intensité dans les tissus



À cause de l'atténuation dans les tissus, le signal reçu en écho par la sonde risque d'être insuffisant pour détecter les interfaces les plus profondes. Même si une interface a été atteinte par l'onde sonore, un écho trop atténué ne sera pas détecté. C'est pourquoi l'onde émise doit avoir une intensité très élevée.



IV.PRINCIPE DE L'ÉCHOGRAPHIE DE TYPE A



Cette échographie consiste en une **mesure de durée**.

La sonde émet des ondes ultrasonores sous forme de *salves*. L'appareil enregistre le temps écoulé durant l'aller-retour (entre l'émission d'une salve et les échos successifs après réflexion sur diverses interfaces).

L'émission sous forme de salves est nécessaire, car pour pouvoir détecter l'onde retour, la sonde ne peut pas simultanément émettre.

Connaissant la durée de l'aller-retour et la célérité de l'onde dans le milieu, on peut en déduire précisément les dimensions des tissus traversés.

Exemple de calcul :

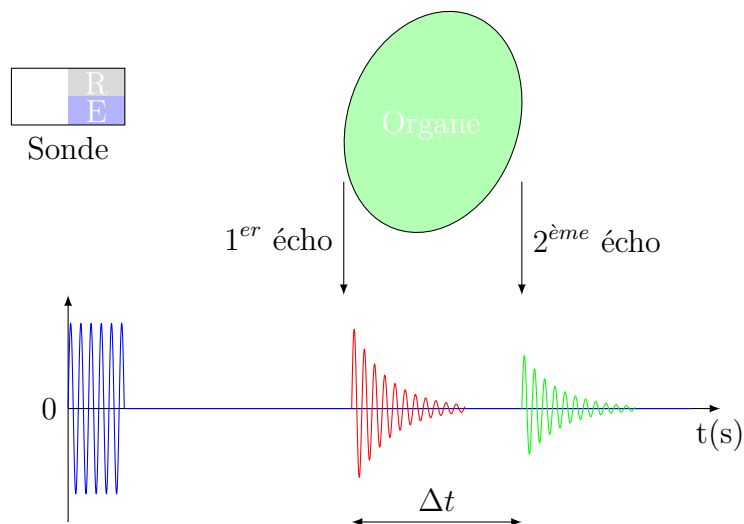
l'écho issu de l'interface A est détecté 50 μs après l'émission. Déterminer la profondeur de l'interface A.

Donnée : c = 1540 m

$$d = v \times \Delta t$$

$$2 \times OA = c \times \Delta t \quad \text{car } \Delta t \text{ est la durée de l'aller-retour}$$

$$OA = \frac{c \times \Delta t}{2} = \frac{1540 \times 50 \cdot 10^{-6}}{2} \simeq 0,0385 \text{ m}$$



En mesurant le délai entre deux échos, on peut déterminer la taille d'un organe.