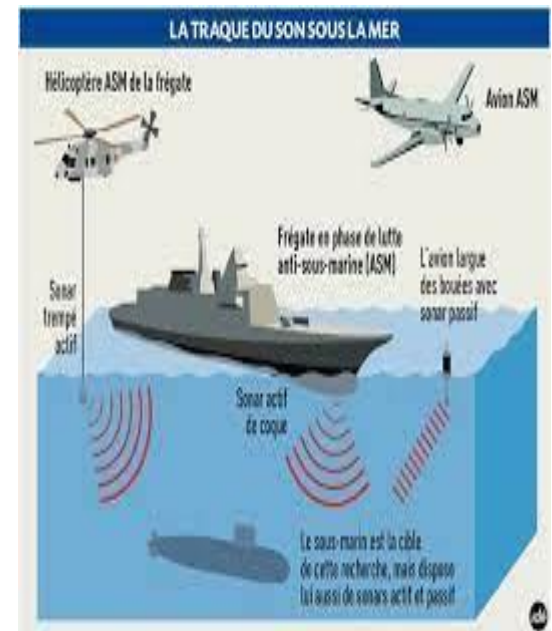
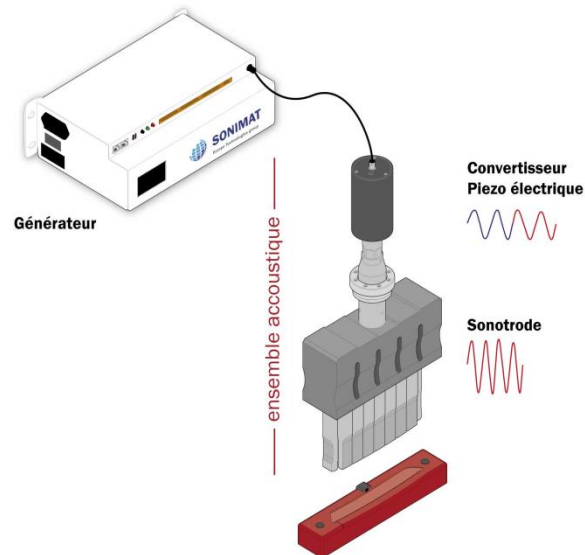


## TD3 de physique4 (Onde acoustique dans les fluides et dans les solides)



Echographie



## *Plan*

☒ *Rappel de cours*

☐ *Corrigé de l'exercice 4*

☐ *Corrigé de l'exercice 6*

☐ *Questions et réponses*

## Pourquoi l'acoustique ?

### Application simple des ondes acoustiques

#### ✓1-Mesurer des distances

*Le sonar*



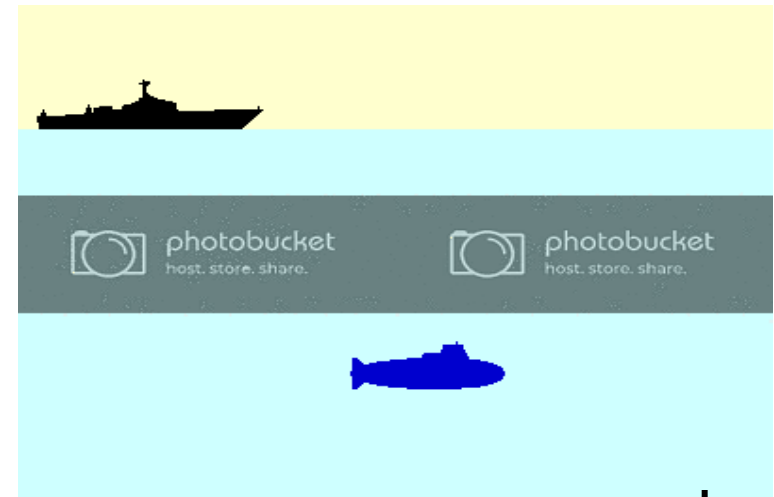
*émettre une onde  
acoustique*



*Rencontrer  
un obstacle*



*Revenir vers  
l'émetteur*



## Pourquoi l'acoustique ?

✓ 2-Technique d'imagerie

La vibration sonore  
est convertie en image

L'échographie



sonde se déplace sur la peau  
en glissant au moyen d'un gel  
( Effet Doppler)

émettre une onde  
acoustique  
(ultrasonores)



Pourquoi le  
gel? Réponse  
Exo 4

## Pourquoi l'acoustique ?

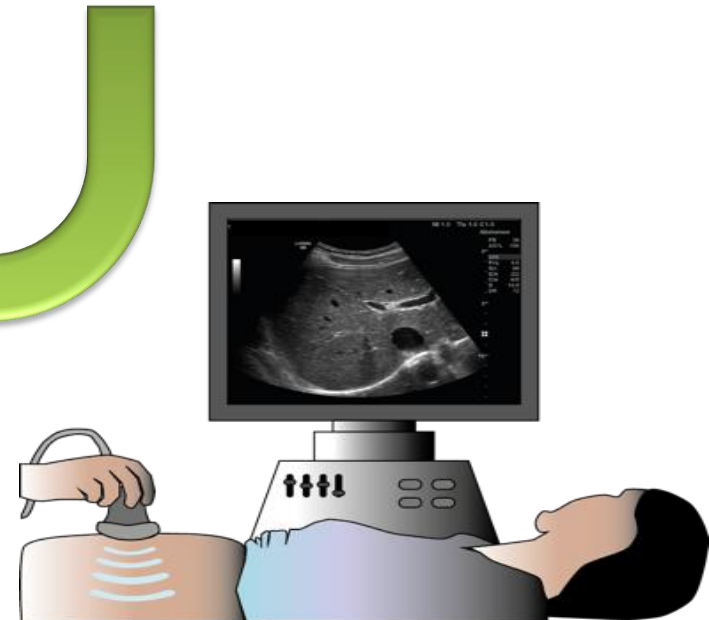


*Des matériaux différents  
présentent des  
impédances acoustiques  
différentes*



*Différentes  
intensités*

*Les Ultrasons reçus (par  
la sonde) sont  
convertis en images par  
un ordinateur*



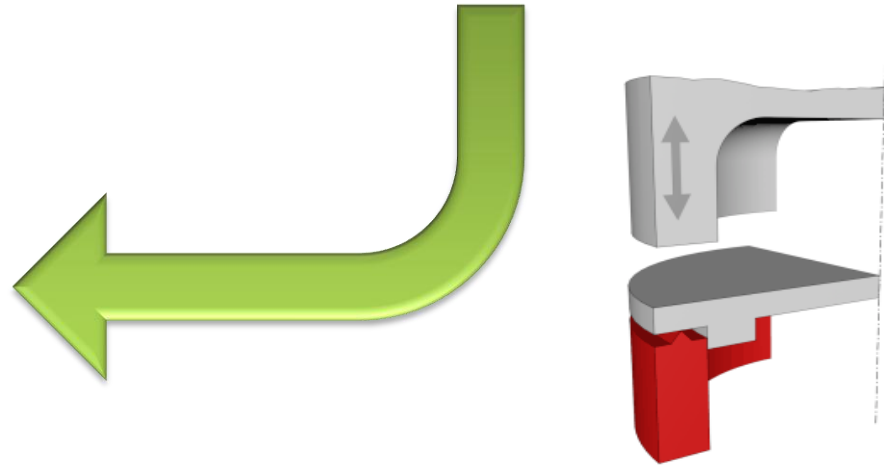
## *Pourquoi l'acoustique ?*

### *✓3-Le soudage par ultrasons*

*un assemblage rapide et économique  
des matériaux plastiques( une  
jonction solide et précise)*

*envoyer des vibrations  
ultrasons  
par un vibrant  
métallique  
( la sonotrode)*

*La soudure s'effectue  
à l'aide de la chaleur  
engendrée à l'interface  
des deux pièces*



## Pourquoi l'acoustique ?

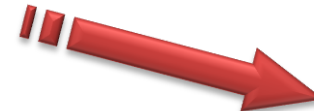
### ✓4-Systèmes de détection et protection (infrason)

Les infrasons une arme invisible et inaudible.

#### Volcans



*la poussée de magma  
(émis infrason)*



*aider à prévoir  
les dégâts*

#### Séismes



*mouvements de montée  
et de descente du sol (émis  
infrason) détectées jusqu'à  
2000 km de distance*



Remarque

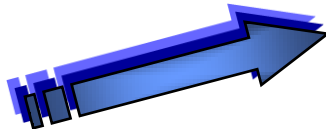
L'impédance  
acoustique



*L'impédance acoustique d'un milieu caractérise la résistance du milieu à la propagation d'une onde*

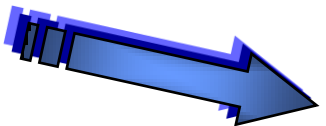
Attention !!!!!

L'impédance  
acoustique



*Milieux de propagation **infinis***

$$Z_c = \rho v$$



*Milieux avec des effets géométriques*

$$Z_c = \frac{\rho v}{S}$$

**Tuyaux  
Sonores**

## *Plan*

☒ *Rappel de cours*

☒ *Corrigé de l'exercice 4*

☐ *Corrigé de l'exercice 6*

☐ *Questions et réponses*

**Exercice 4 :** Une onde acoustique plane se propageant dans l'eau arrive sous incidence normale à la surface de séparation de deux avec l'air. On désigne respectivement par  $Z_1$  et  $Z_2$  les impédances caractéristiques de l'air et de l'eau. Une onde incidente de pression d'amplitude  $P_i$  et de pulsation  $\omega$  se propage dans l'air et à l'interface air/eau, il se produit un phénomène de réflexion et transmission. On désigne par  $U$ ,  $\dot{U}$ ,  $P_r$ ,  $P_t$  et  $I$  respectivement le déplacement des particules, la vitesse des particules la pression acoustique et l'intensité acoustique. Les indices  $i$ ,  $r$  et  $t$  se rapportent respectivement à l'onde incidente, l'onde réfléchie et l'onde transmise.

**Partie 1 :**

1/ Donner l'expression générale des ondes pressions résultantes  $p_1(x,t)$  dans l'air et  $p_2(x,t)$  dans l'eau.

2/ Etablir les expressions des coefficients de réflexion ( $R_p$ ) et de transmission ( $T_p$ ) en en fonction des impédances caractéristiques  $Z_1$  et  $Z_2$  des deux milieux

3/ Etablir les expressions des impédances en un point  $x$

- Dans la partie  $x < 0$  en fonction de  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $k$ ,  $x$  et du nombre complexe  $j$  ;
- Dans la partie  $x > 0$  en fonction de  $Z_2$ .
- Déduire l'expression en  $x = 0$ . Ce résultat était-il prévisible ?

**Partie 2 :**

1 Calculer les valeurs numériques des rapports suivants :  $P_r/P_i$ ,  $P_t/P_i$ ,  $U_r/U_i$ ,  $\frac{\dot{U}_r}{\dot{U}_i}$ ,

$I_R/I_i$  et  $I_T/I_i$

2/ Répondre aux mêmes questions en supposant que l'onde acoustique se propage de l'air vers l'eau.

## Exercice 4

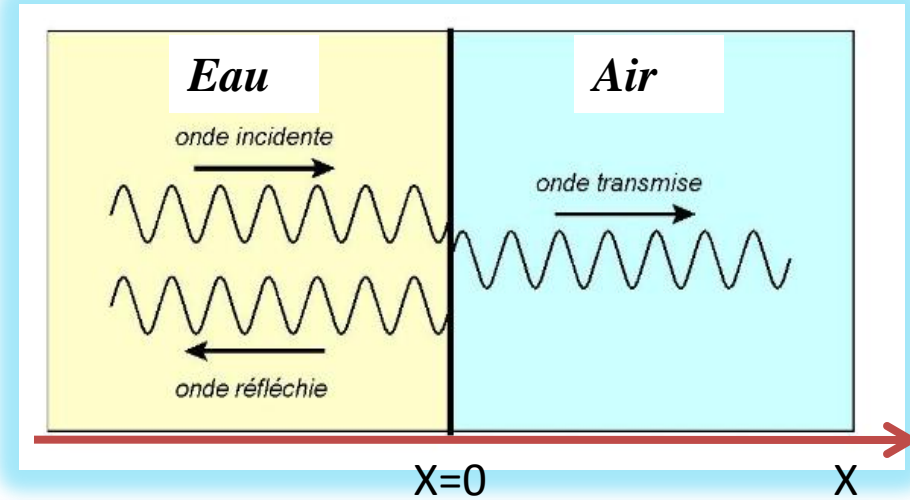
1/L'expression générale des ondes de pression?

➤ Dans l'eau

$$p_1(x,t) = p_i e^{j(\omega t - k_1 x)} + p_r e^{j(\omega t + k_1 x)}$$

➤ Dans l'air

$$p_2(x,t) = p_t e^{j(\omega t - k_2 x)}$$



Avec :  $k_1 = \frac{\omega}{v_1}$ ,  $v_1 = \sqrt{\frac{1}{\rho_{\text{eau}} \chi_{\text{eau}}}}$  et  $Z_1 = Z_{\text{eau}} = \rho_{\text{eau}} v_{\text{eau}}$

$k_2 = \frac{\omega}{v_2}$ ,  $v_2 = \sqrt{\frac{1}{\rho_{\text{air}} \chi_{\text{air}}}}$  et  $Z_2 = Z_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} v_{\text{air}}$

## Exercice 4

2/l'expression des coefficients de réflexion  $R_p$  et de transmission  $T_p$ ?

$$R_p = \frac{p_r}{p_i} \quad \text{et} \quad T_p = \frac{p_t}{p_i}$$


à l'interface



- Continuité du déplacement ( ou vitesse ) des particules
- Continuité de la pression


$$\begin{cases} p_1(0, t) = p_2(0, t) \\ \dot{U}_1(0, t) = \dot{U}_2(0, t) \end{cases}$$


## Exercice 4

Continuité de la pression en  $x=0$    $p_i e^{j(\omega t - k_1 x)} + p_r e^{j(\omega t + k_1 x)} = p_t e^{j(\omega t - k_2 x)}$



$$p_1(0, t) = p_2(0, t) \Rightarrow p_i + p_r = p_t \dots \dots \dots (1)$$

Continuité de la vitesse en  $x=0$    $\dot{U}_1(x, t) = \dot{U}_2(x, t) \Rightarrow \dot{U}_1(0, t) = \dot{U}_2(0, t)$

Avec les deux relations  
$$\begin{cases} U(x, t) = -\frac{1}{\kappa} \int p(x, t) dx \\ \dot{U}(x, t) = \frac{du(x, t)}{dt} \end{cases}$$

### Exercice 4

On trouve



$$U_1(x, t) = -\frac{1}{\kappa} \int p_1(x, t) dx = -\frac{1}{\kappa} \left[ \int p_i(x, t) dx + \int p_r(x, t) dx \right] dx$$

$$U_2(x, t) = -\frac{1}{\kappa} \int p_2(x, t) dx$$

$$U_1(x, t) = \frac{1}{j\kappa k} (p_i e^{j(\omega t - k_1 x)} - p_r e^{j(\omega t + k_1 x)})$$



$$U_1(x, t) = \frac{\omega}{\kappa k} (p_i e^{j(\omega t - k_1 x)} - p_r e^{j(\omega t + k_1 x)}) = \frac{1}{z_1} (p_i e^{j(\omega t - k_1 x)} - p_r e^{j(\omega t + k_1 x)})$$

## Exercice 4

$$\dot{U}_1(0,t) = \frac{p_i - p_r}{z_1} e^{j\omega t}$$

$$\dot{U}_2(0,t) = \frac{p_t}{z_2} e^{j\omega t}$$

$$\dot{U}_1(0,t) = \dot{U}_2(0,t) \Rightarrow \frac{p_i - p_r}{z_1} = \frac{p_t}{z_2} \dots \dots \dots (2)$$

$$p_1(0,t) = p_2(0,t) \Rightarrow p_i + p_r = p_t \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{p_i - p_r}{z_1} = \frac{p_t}{z_2} \dots \dots \dots (2)$$

## Exercice 4

$$\begin{cases} (1) + (2) \Rightarrow 2p_i = \left(1 + \frac{z_1}{z_2}\right) p_t \Rightarrow \frac{p_t}{p_i} = \frac{2z_2}{z_1 + z_2} \\ (1) - (2) \Rightarrow 2p_r = \left(1 - \frac{z_1}{z_2}\right) p_t \end{cases}$$



$$T_p = \frac{2z_2}{z_1 + z_2}$$


$$\frac{(1) - (2)}{(1) + (2)} = \frac{p_{r0}}{p_{i0}} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}$$



$$R_p = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}$$

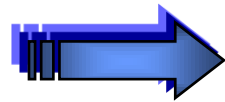
## Exercice 4

3/ Les expressions des impédances ?



$$Z(x) = \frac{P}{\dot{U}}$$

- Dans le cas  $x < 0$



$$Z(x) = \frac{P}{\dot{U}} = \frac{p_i e^{j(\omega t - k_1 x)} + p_r e^{j(\omega t + k_1 x)}}{\frac{1}{z_1} (p_i e^{j(\omega t - k_1 x)} - p_r e^{j(\omega t + k_1 x)})}$$

$$Z(x) = z_1 \frac{e^{j(\omega t - k_1 x)} + R_p e^{j(\omega t + k_1 x)}}{e^{j(\omega t - k_1 x)} - R_p e^{j(\omega t + k_1 x)}} = \frac{e^{j(\omega t - k_1 x)} + \left( \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \right) e^{j(\omega t + k_1 x)}}{e^{j(\omega t - k_1 x)} - \left( \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \right) e^{j(\omega t + k_1 x)}}$$

### Exercice 4



$$Z(x) = Z_1 \frac{Z_2(e^{-jk_1x} + e^{+jk_1x}) + Z_1(e^{-jk_1x} - e^{+jk_1x})}{Z_2(e^{-jk_1x} - e^{+jk_1x}) + Z_1(e^{-jk_1x} + e^{+jk_1x})}$$

$$Z(x) = Z_1 \frac{Z_2(2\cos(k_1x)) + Z_1(-2j\sin(k_1x))}{Z_2(-2j\sin(k_1x)) + Z_1(2\cos(k_1x))}$$



$$Z(x) = Z_1 \frac{Z_2 - jZ_1 \tan(k_1x)}{Z_1 - jZ_2 \tan(k_1x)}$$

## Exercice 4

- Dans le cas  $x > 0$



$$Z(x) = \frac{P}{\dot{U}} = \frac{p_t e^{j(\omega t - k_2 x)}}{\frac{p_t}{Z_2} e^{j(\omega t - k_2 x)}} = Z_2$$

- Dans le cas  $x = 0$

$$\text{en } x=0, \quad Z_1(0) = Z_2(0) = Z_2$$



**Résultat prévisible**

## Exercice 4

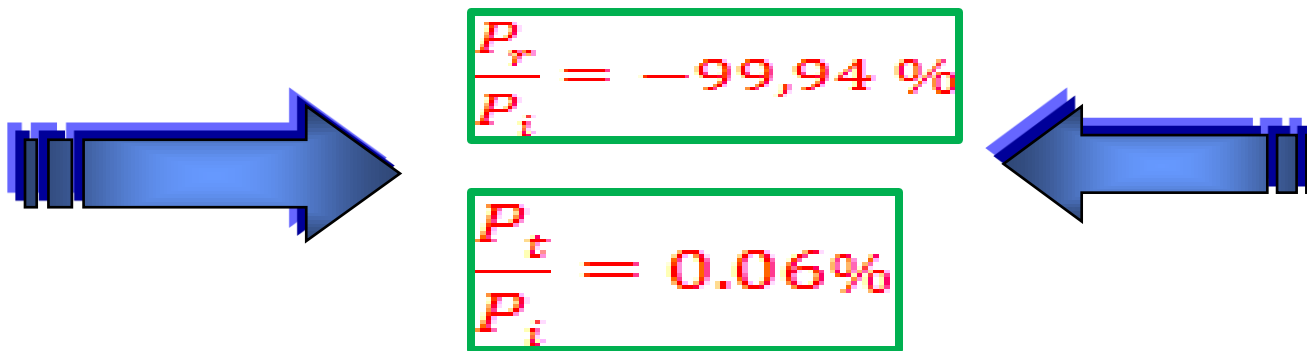
### II. Partie 2

Valeurs numériques des rapport

$$\frac{P_r}{P_i}, \frac{P_t}{P_i}, \frac{U_r}{U_i}, \frac{\dot{U}_r}{\dot{U}_i}, \frac{I_r}{I_i}, \frac{I_t}{I_i}$$

$$\frac{P_r}{P_i} = ? \text{ et } \frac{P_t}{P_i} = ?$$

$$z_1 = z_{\text{eau}} = 1475 \times 10^3 \text{ Rayleigh} \quad \text{et} \quad z_2 = z_{\text{air}} = 412 \text{ Rayleigh}$$



$$\frac{P_r}{P_i} = -99,94 \%$$

$$\frac{P_t}{P_i} = 0.06 \%$$

$$R_p = \frac{P_r}{P_i} \quad \text{et} \quad T_p = \frac{P_t}{P_i}$$

## Exercice 4

$$\frac{U_r}{U_i} = ?$$

$$U_1(x, t) = -\frac{1}{\kappa} \int p_1(x, t) dx = -\frac{1}{\kappa} \left[ \int p_i(x, t) dx + \int p_r(x, t) dx \right] dx$$

$$U_1(x, t) = \frac{1}{j\kappa k} (p_i e^{j(\omega t - k_1 x)} - p_r e^{j(\omega t + k_1 x)}) \Rightarrow \begin{cases} U_i = \frac{p_i}{j\kappa k} \\ U_r = -\frac{p_r}{j\kappa k} \end{cases} \Rightarrow \frac{U_r}{U_i} = -\frac{P_r}{P_i} = +99,94 \%$$

## Exercice 4

$$U_2(x,t) = -\frac{1}{\kappa} \int p_2(x,t) dx = -\frac{1}{\kappa} \int p_t e^{j(\omega t - k_2 x)} dx = \frac{p_t}{j\kappa k} e^{j(\omega t - k_2 x)} \Rightarrow U_t = \frac{P_t}{j\kappa k}$$

$$\dot{U}_1(x,t) = j\omega U_1(x,t) \quad \text{et} \quad \dot{U}_2(x,t) = j\omega U_2(x,t)$$

$$\frac{\dot{U}_r}{\dot{U}_i} = \frac{j\omega U_r}{j\omega U_i} = \frac{U_r}{U_i} = -\frac{P_r}{P_i} = + 99,94 \%$$

## Exercice 4

$$\frac{I_r}{I_i} = ? \text{ et } \frac{I_t}{I_i} = ?$$

$$I = \frac{P^2}{2Z_c} \Rightarrow \begin{cases} I_i = \frac{p_i^2}{2Z_1} \\ I_r = \frac{p_r^2}{2Z_r} \\ I_t = \frac{p_t^2}{2Z_t} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{I_r}{I_i} = \frac{p_r^2}{p_i^2} = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \Rightarrow \frac{I_r}{I_i} = 99.88 \% \\ \frac{I_t}{I_i} = \frac{p_t^2}{p_i^2} = \frac{4Z_2 Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} \Rightarrow \frac{I_t}{I_i} = 0.12 \% \end{cases}$$

## Exercice 4

2/Dans le cas où l'onde se propage de l'air vers l'eau

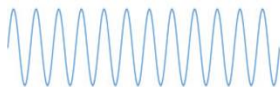
Dans ce cas  $z_1 = z_{\text{air}}$  et  $z_2 = z_{\text{eau}}$

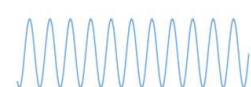


$$\frac{P_r}{P_i} = +99,94 \% , \frac{I_r}{I_i} = 99.88\% , \frac{I_t}{I_i} = 0.12 \%$$

## Exercice 4

### Conclusion

*Eau*  *Air*

*Air*  *Eau*

✓ Les ondes sonores sont presque entièrement réfléchies à l'interface (eau-air)



Car l'impédance de l'eau est environ **3600 fois** plus élevée que celle de l'air



Transmission très faible  
✓ l'application d'un **gel** sur la peau  
du patient (Echographie)

## *Plan*

☒ *Rappel de cours*

☒ *Corrigé de l'exercice 4*

☒ *Corrigé de l'exercice 6*

☐ *Questions et réponses*

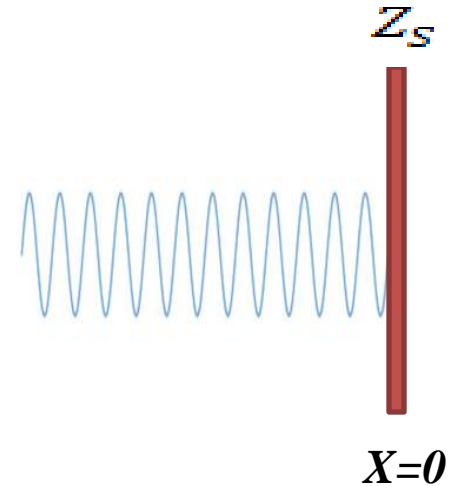
**Exercice 6:** On définit l'impédance acoustique d'une surface réfléchissante par  $Z_s = p_s / \dot{u}_s$  où  $p_s$  est la pression sur la surface et  $\dot{u}_s$  la vitesse de particules perpendiculaires à cette surface. Dans les conditions normales de température et de pression, on considère une onde acoustique plane de fréquence  $f=200$  Hz qui se propage dans l'air avec une vitesse de  $340$  m/s et qui arrive sous une incidence normale sur un mur dont l'impédance acoustique est égale à  $Z_s = 1000 - j 1300$  rayleighs (MKSA).

- 1) Calculer le coefficient de réflexion pour la pression acoustique ;
- 2) Calculer le taux d'ondes stationnaires ;
- 3) A quelle distance du mur se trouve le premier maximum et le premier minimum de vibration ?

## Exercice 6

$$Z_s = \frac{P_s}{U_s} \quad Z_s = 1000 - j1300$$

Onde acoustique plane :  
air (  $Z_0$  ),  $f = 200\text{Hz}$ ,  $340\text{ m/s}$

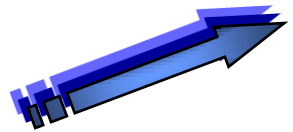


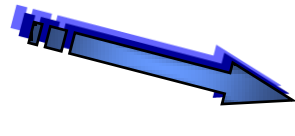
1- Le coefficient de réflexion ?

$$R_p = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} \Rightarrow R_p = \frac{1000 - j1300 - 438.6}{1000 - j1300 + 438.6} \Rightarrow R_p = 0.664 - j0.303$$

## Exercice 6

$$R_p = 0.664 - j0.303$$


$$\|R_p\| = 0.728$$


$$\theta = -0.427 \text{ rad}$$

## 2- Taux d'ondes stationnaires

## Exercice 6

### 3-Maximum et minimum de vibration ?

$$p(x,t) = p_i(x,t) + p_r(x,t) = p_i e^{j(\omega t - kx)} + \|Rp\| e^{i\theta} p_i e^{j(\omega t + kx)}$$

$$= p_i (1 + \|Rp\| e^{j(2kx + \theta)}) e^{j(\omega t - kx)}$$

$$|P(x,t)| = p_i \sqrt{1 + R^2 + 2R \cos(2kx + \theta)}$$

$$p(x,t) \text{ max pour } 2kx + \theta = 2n\pi \quad \Rightarrow \quad x_{\max} = (2n\pi - \theta) \frac{\lambda}{4\pi} \quad (x \leq 0)$$

$$\text{Pour } n = -1 \quad \Rightarrow \quad x_{\max} = \left(-2 + \frac{0.427}{\pi}\right) \frac{\lambda}{4} \quad \Rightarrow \quad = -1.86 \frac{\lambda}{4} = \frac{-1.86 \times 34}{4 \times 20}$$

$$= -0.790m$$

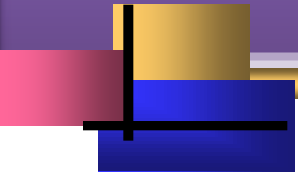
**Exercice 6**

$$p(x,t) \text{ min pour } 2kx + \theta = (2n+1)\pi \quad \Rightarrow \quad x_{\min} = ((2n+1) - \theta) \frac{\lambda}{4}$$

$$\begin{aligned} \text{Pour } n = -1 \quad & \Rightarrow \quad x_{\min 1} = \left(-1 + \frac{0.427}{\pi}\right) \frac{\lambda}{4} \\ & = -0.367 m \end{aligned}$$

## *Plan*

- ☑ *Rappel de cours*
- ☑ *Corrigé de l'exercice 4*
- ☑ *Corrigé de l'exercice 6*
- ☑ *Questions et réponses*



*Merci de votre  
attention*

