

Milieux : interactions, interfaces
homogénéité, rupture

CONTRÔLE NON DESTRUCTIF DES MATERIAUX PAR ULTRASONS



PLAN

Introduction

I- Généralités sur les ultrasons

- 1- Différents types d'ondes
- 2- Caractéristiques des ondes

II- Propagation dans les milieux

- 1- Vitesse de l'onde sonore dans un milieu
- 2-atténuation des ondes sonores
- 3- impédance acoustique
- 4- Interaction aux interfaces
- 5- Interférence

III- Production d'ondes ultrasonores

IV- Détection et caractérisation des défauts

V- Expériences sur des roches

Conclusion

INTRODUCTION

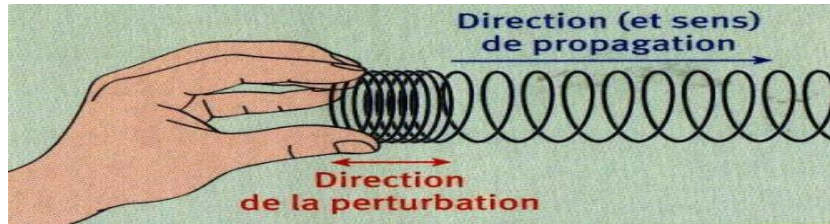
I- Généralités sur les ultrasons

1- Différents types d'ondes

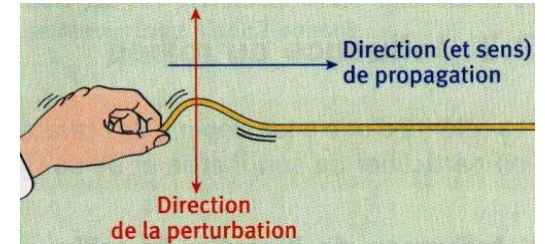
On distingue principalement 2 types d'ondes selon le mode de vibration des particules au sein du milieu:

Les ondes longitudinales, les ondes transversales,

Dans le cas des ondes longitudinales, les particules se déplacent dans la même direction que celle de l'onde.



Mais, pour les ondes transversales, la déformation du matériau se fait orthogonalement à la direction de propagation de l'onde, de l'onde, Comme c'est le cas pour cette corde.



Cependant, aux interfaces entre 2 milieux, peuvent se former d'autres types d'ondes appelées ondes de surface, Mais les ondes transversales et longitudinales sont les plus utilisées dans le CND par ultrasons,

2- Caractéristiques des ondes ultrasonores

- L'onde sonore est une onde de pression
- Son passage induit un champ de déplacement au sein du milieu
- Comme l'onde électromagnétique, elle est périodique et peut être caractérisée par sa période temporelle T , sa fréquence $f=1/T$, sa longueur d'onde λ et sa célérité dans le milieu c . La relation liant ces grandeurs est : $\lambda = cT = c/f$.

II-Propagation dans les milieux

1- Vitesse des ondes ultrasonores

Pour réperer la position d’une discontinuité dans un matériau le CND se sert très généralement de la vitesse de l’onde dans le milieu. Or, cette vitesse est dépendante des caractéristiques de ce milieu.

a- En milieu fluide:

Dans un milieu fluide, l’équation de propagation de l’onde sonore est:

$$\Delta p_1 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} = 0$$

avec p_1 , la variation locale de pression appelée surpression et

$$C = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \chi_s}}$$

la célérité de l’onde sonore dans le fluide dans lequel elle se propage. La célérité diminue ,plus le fluide est dense. Elle diminue aussi, plus le fluide est compressible, Par exemple $c_{air} = 3,410^2 \text{ m.s}^{-1}$; $c_{eau} = 1,410^2 \text{ m.s}^{-1}$.

b- Dans un solide élastique

Dans les milieux solides, on caractérise l’onde acoustique par un champ de déplacement particulaire $u(x, t)$ et la contrainte mécanique σ_{ij} . Dans les solides homogènes, et isotropes, le déplacement élastique u est solution de l’équation du mouvement: $\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \text{div} \sigma + F$ où ρ est la masse volumique du solide et où F est une force volumique représentant une source de volume. Connaissant l’expression de $\text{div} \sigma$ faisant intervenir les coefficients de Lamé μ , λ et en utilisant la décomposition de Helmholtz $u = u_L + u_T$, on obtient avec $F=0$ les équations de propagation suivantes:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_L}{\partial t^2} - C_L^2 \Delta u_L &= 0 \\ \frac{\partial^2 u_T}{\partial t^2} - C_T^2 \Delta u_T &= 0 \end{aligned}$$

où les célérités des ondes longitudinale C_L et transverse C_T sont définies par les relations: $C_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$ et $C_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$. On remarque que les ondes longitudinales se propagent bien plus vite dans les solides que les ondes transversales.

Exemple de vitesses dans divers matériaux

Matériaux	ρ (g,cm-3)	λ (Gpa)	μ (Gpa)	C_L (mm/ μ s)	C_T (mm/ μ s)
Acier	7,5-9	95-140	75-90	5,2-,5	2,9-3,5
Aluminium	2,7	58	6,3	6,3	3,1
Béton	1,3-2,5	5-14	8-21	2,9-6,5	1,8-4
Diamant	3,5	340		19,7	12,1
Plomb	11,5	39	6,3	2,1	0,75
Titane	4,5	77	43	6	3
Verre	2,4-2,8	14-25	20-38	4,4-6,5	2,7-4

On a obtenu pour chaque type de milieu, une équation de D’Alambert, dont une solution est une onde harmonique de la forme $u(x,t) = A \vec{Q} e^{j(\omega t - \vec{k}x)}$ avec \vec{Q} , le vecteur polarisation, \vec{k} le vecteur d’onde. Pour une onde sonore dans un solide, on peut avoir 2 polarisations d’ondes transversales et une polarisation d’onde longitudinale.

2-Atténuation des ondes sonores

Lors de la détection de défauts, l’expérimentateur doit prendre en compte certains phénomènes, notamment l’atténuation du signal qui entraîne la perte de certaines des informations . L’atténuation comprend les 3 phénomènes suivants:

- Absorption
- Divergence du transducteur en champ lointain
- Diffusion de l’onde dans le matériau.

Dans un milieu atténuant l’amplitude du signal décroît avec la distance:

$$A = A_0 e^{-\alpha z}$$

Où A_0 : Amplitude initiale

α : coefficient d’atténuation (N/m)

z : distance parcourue (m)

$$\alpha = \alpha_{absorp} + \alpha_{diverg} + \alpha_{diffu}$$

atténuation par diffusion :

-Dans le domaine de Rayleigh: $\alpha_{diffu} = BT \mu^2 f^4$

-Dans le domaine stochastique: $\alpha_{diffu} = Cd \mu^2 f^2$

-Dans le domaine géométrique: $\alpha_{diffu} = D/d$

3- Impédance acoustique

L'impédance acoustique Z d'un matériel est défini par : $Z = \mu c$ est le rapport de la pression sur la célérité de l'onde dans ce milieu

Z : impédance acoustique ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

μ : masse volumique ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

c : célérité du son dans le milieu ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Exemple d'impédances de certains matériaux:

	Acier	Aluminium	cuivre	Titane	Air	Eau
Impédance acoustique($10^6 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	46,1. 10^6	17. 10^6	41. 10^6	28. 10^6	413	1,48. 10^6

4- Interaction aux interfaces

Le passage des ondes ultrasonores d'un milieu à un autre milieu se fait à travers une interface séparant ces deux milieux. On distingue les interfaces fluide-fluide, fluide-solide, solide-solide etc... . À ces interfaces les ondes subissent différents phénomènes:

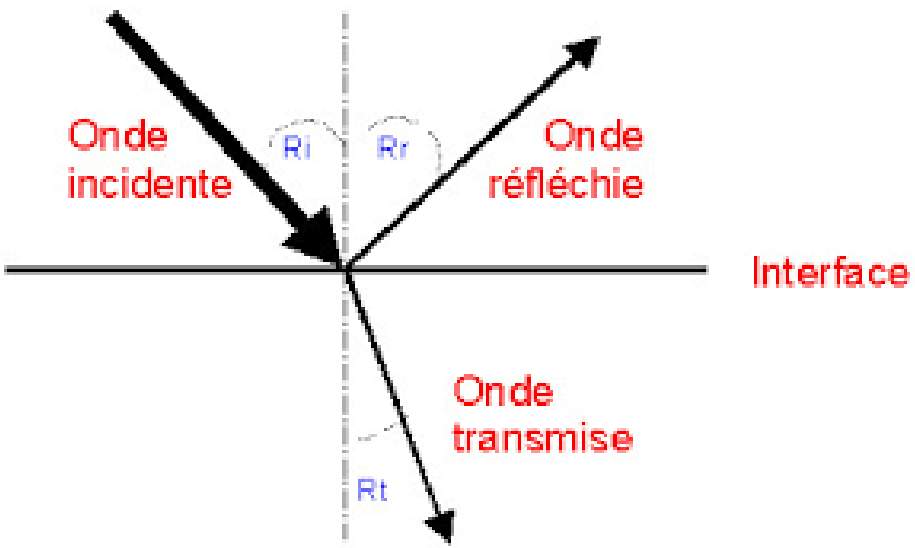
a- réflexion et transmissions à une interface plane

Aux interfaces entre deux milieux d'impédance acoustiques différentes, les ondes sonores incidentes donnent naissance à des ondes réfléchies et des ondes transmises .

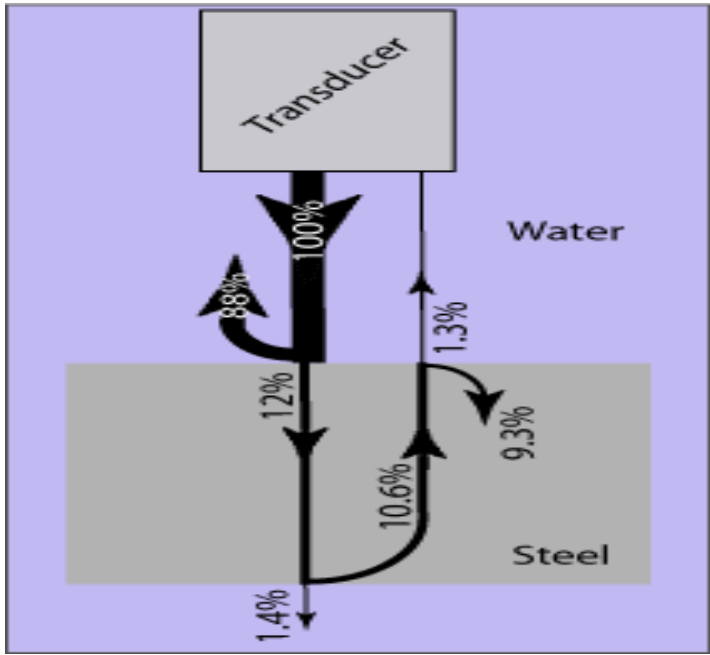
La différence entre les impédances de part et d'autre de l'interface détermine le pourcentage de l'énergie qui sera réfléchi et transmise.

Le coefficient de réflexion(resp de transmission) en puissance est donné par:

$$R=\left(\frac{Z_2-Z_1}{Z_2+Z_1}\right)^2 \quad ; \quad T=\frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2} \quad .T+R=1$$



Exemple: interface Eau-Acier, R=0,88 T=0,12



b- Réfraction

Les ondes arrivant à l'interface entre 2 milieux d'indices de réfraction différents sous une incidence oblique subissent une réfraction. Phénomène dû à la différence des vitesses du son dans ces milieux.

Les ondes transmises ont tendance à adopter des directions différentes (s'éloigner ou se rapprocher de la normale).

Loi de Snell :

$$\frac{\sin R_i}{V_i} = \frac{\sin R_t}{V_t}$$

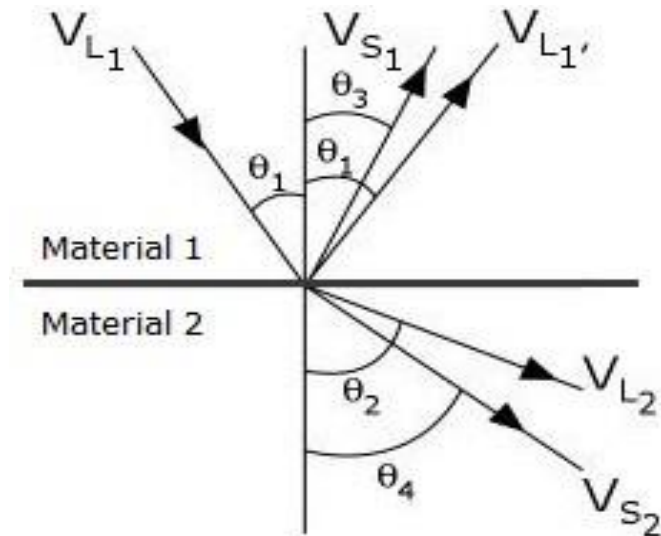
V_i : Vitesse de l'onde incidente

V_t : Vitesse de l'onde réfractée

Les ondes transversales, en raison de leur faibles vitesse se réfractent moins que les ondes longitudinales.

C- Mode de conversion

$$\frac{\sin \theta_1}{V_{L1}} = \frac{\sin \theta_2}{V_{L2}} = \frac{\sin \theta_3}{V_{S1}} = \frac{\sin \theta_4}{V_{S2}}$$



V_{L_1} : Vitesse des ondes longitudinales dans le premier milieu
 V_{L_2} : Vitesse des ondes longitudinales dans le deuxième milieu
 V_{S_1} : Vitesse des ondes transversales dans le premier milieu
 V_{S_2} : Vitesse des ondes transversales dans le deuxième milieu

III- Générations d'ultrasons

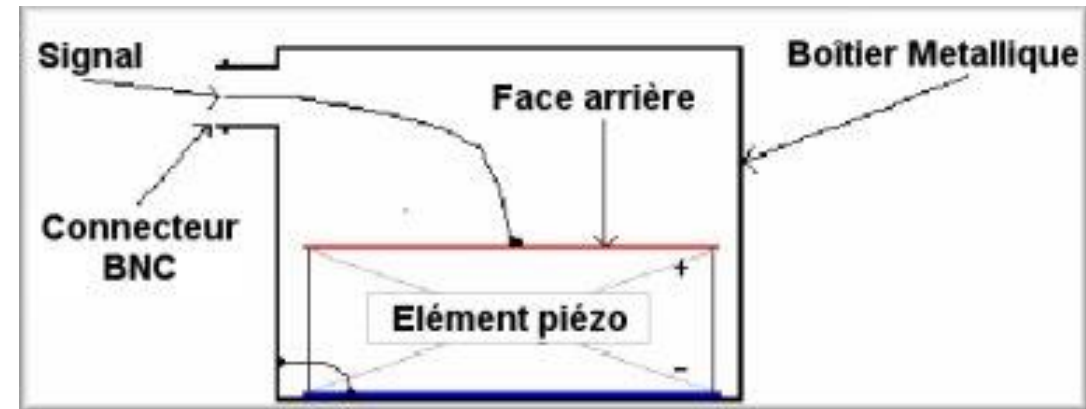
1- Phénomène piézoélectrique

Un matériel est dit piézoélectrique s'il se polarise électriquement sous l'action d'une contrainte (effet direct) et se déforme si un champ électrique lui est appliqué (effet inverse). Exemple de matériaux piézoélectrique: Quartz (SiO_2), le Niobate de Lithium (LiNbO_3) ou le Tantalate de Lithium (LiTaO_3), les céramiques polycristallines comme le PZT (Plomb, zirconium, titane). La faculté d'un matériau piézoélectrique à convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique est caractérisée par le coefficient noté k :

$$k^2 = \frac{\text{Énergie mécanique transformée}}{\text{Énergie électrique fournie}}$$

2- Constituants d'un transducteur piézoélectrique

- . Matériau piézoélectrique.
- . Backing
- . Lame d'adaptation d'impédance
- . Deux électrodes



3- Rayonnement des transducteurs ultrasonores

Le rayonnement d'un traducteur ultrasonore est provoqué par la vibration d'un transducteur qui va entraîner un champ de déplacement dans le milieu de propagation.

–Le champ proche ou zone de Fresnel où on trouve beaucoup d'interférences générant des minima et des maxima locaux.

–Le champ lointain ou zone de Fraunhofer où on a une décroissance d'amplitude régulière et un faisceau divergent.

Pour un transducteur plan circulaire fonctionnant en mode piston , la distance champ proche est:

R: rayon de l'émetteur

$$L = \frac{R^2}{\lambda}$$

λ : longueur d'onde dans le fluide

Divergence du faisceau en champ lointain: $\sin\theta = 1,22 \frac{\lambda}{2a}$

4- différents types de transducteurs piézoélectrique

On distingue 2 groupes majeurs de transducteurs

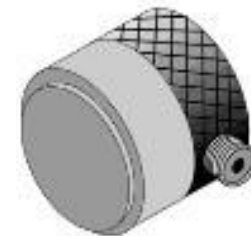
- Transducteurs de contact

Ce transducteur est en contact direct avec la pièce à inspecter par l'intermédiaire d'un gel placé à sa surface

- Transducteurs à immersion

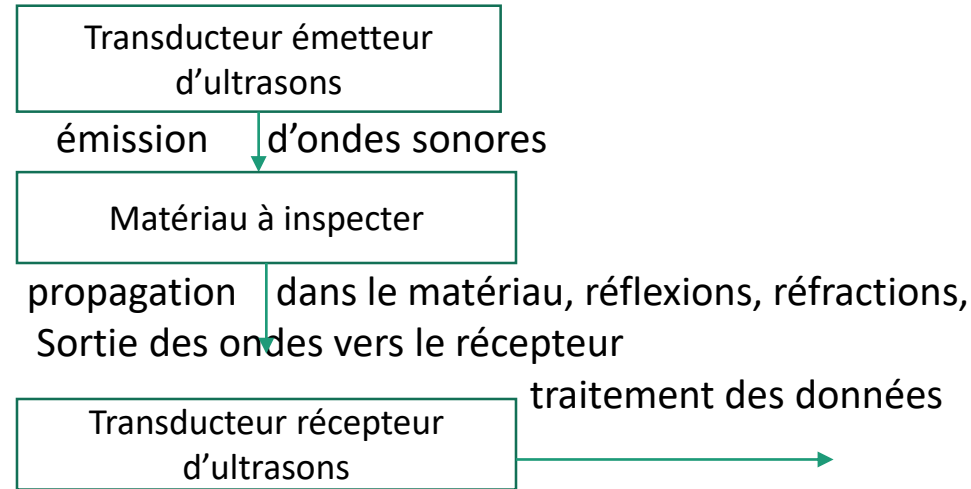
Il existe aussi d'autre types de transducteurs:

- Les transducteurs focalisés
- Les transducteurs doubles
- Les transducteurs à couplage avec l'air
- Transducteurs multiéléments
- les transducteurs EMAT



IV-Détection et Localisation des défauts

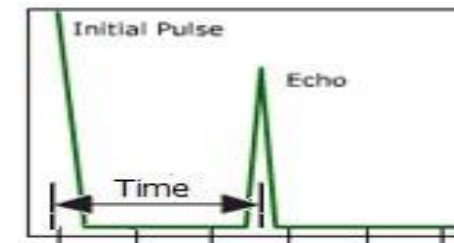
1- Equipements et principe de fonctionnement



2- Représentation des données ultrasonores

Trois types de scan:

- Ascan
- Bscan
- Cscan



3- Technique de mesure et d'étalonnage

- Inspection normale du faisceau

On mesure le temps de parcours d'une impulsion ultrasonique réfléchi sur une surface d'une discontinuité. Puis on calcule la distance de parcours:

$$d = \frac{Vt}{2}$$

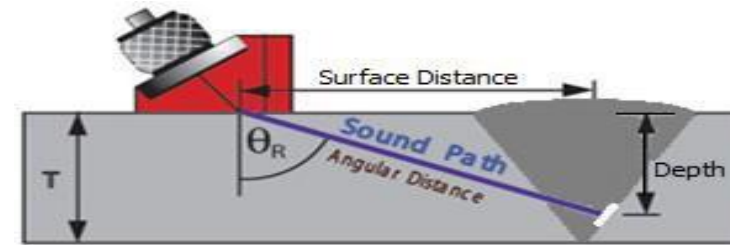
- Inspection de faisceau d'angle

Quand l'onde sonore se propage et qu'elle est réfléchi avant d'atteindre le fond, la distance angulaire

$$a = \frac{V_T t}{2}$$

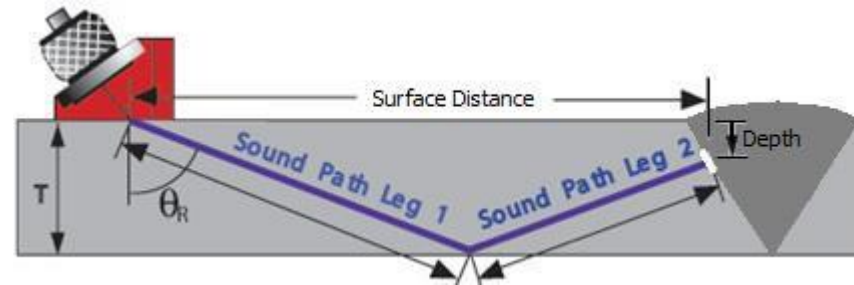
Connaissant l'angle d'incidence, donc l'angle de réfraction, on trouve la profondeur de la discontinuité:

$$h = a \cdot \cos(\theta_R)$$



Si l'onde est réfléchi en revenant du fond de la pièce, la profondeur s'écrit:

$$h = 2T - (a \cdot \cos \theta_R)$$



V- Expériences sur des roches

Pour évaluer la performance du contrôle ultrasonore on décide l'appliquer sur plusieurs échantillons de roches parallélépipédiques, en vue d'étudier leurs altérations.

1- Présentation des échantillons

On dispose de 4 échantillons de roches sur lesquelles se feront nos expériences

Echantillons	Carrières	Régions	type	Dimensions(cm)
Roche 1	CIOK	Nord-Ouest	Dolomite, calcaire	5.1, 5 , 10.2
Roche 2	CJO	Nord-Est	calcaire	4.9 , 4.7, 9.6
Roche 3	SCE	Centre-Est	calcaire	5, 4.55, 9,55
Roche 4	SOTACIB	Centre-ouest	calcaire	5, 5.5, 10

2- Présentation de l'essai

Matériels: transducteurs ultrasonores à contact(émetteur et récepteur) , un oscilloscope électrique, un ordinateur portable

-Connectique

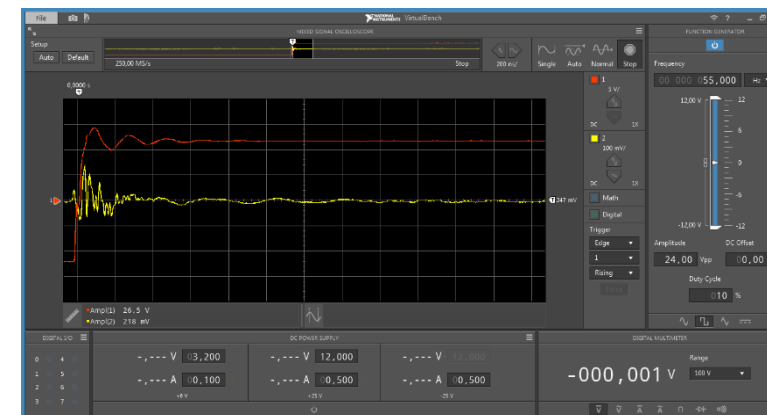
-onde émise: tension créneau, fréquence $f=$ et d'amplitude 12 V

3- Protocole expérimental

On réalise un chauffage monotone de ces 4 échantillons dans un four:

D'abord, à 20° C, on émet des ondes ultrasonores sur chacun de ces échantillons, suivant 3 directions: 2 directions transversales et 1 direction longitudinale. Un récepteur placé de l'autre côté de la roche (donc principe par transmission), reçoit le signal et l'oscilloscope permet de visualiser les données sur l'ordinateur portable.

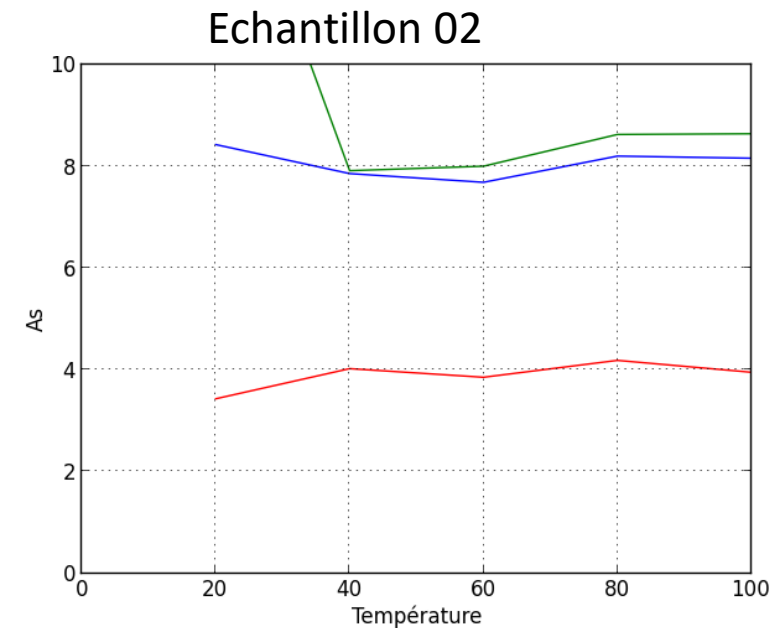
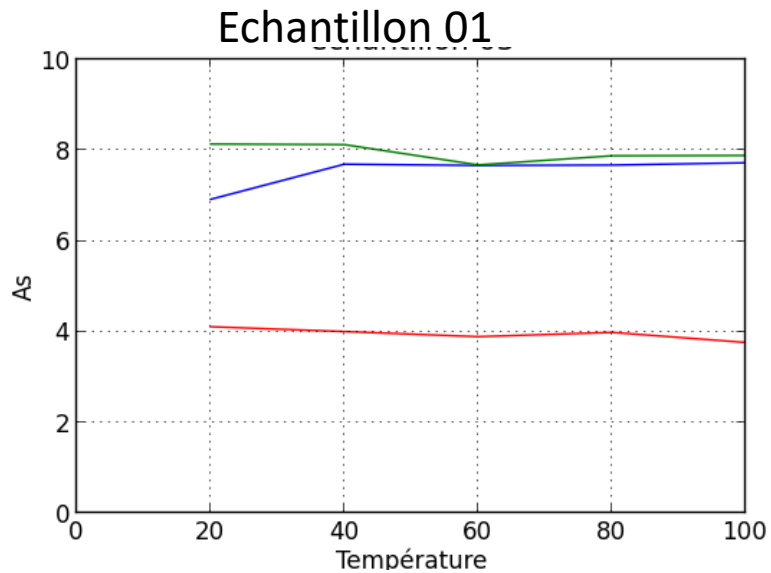
Puis on porte ces roche à une température de 40°C, puis on refait les mêmes mesures. On réitère le procédé pour 60, 80 et enfin 100°C.

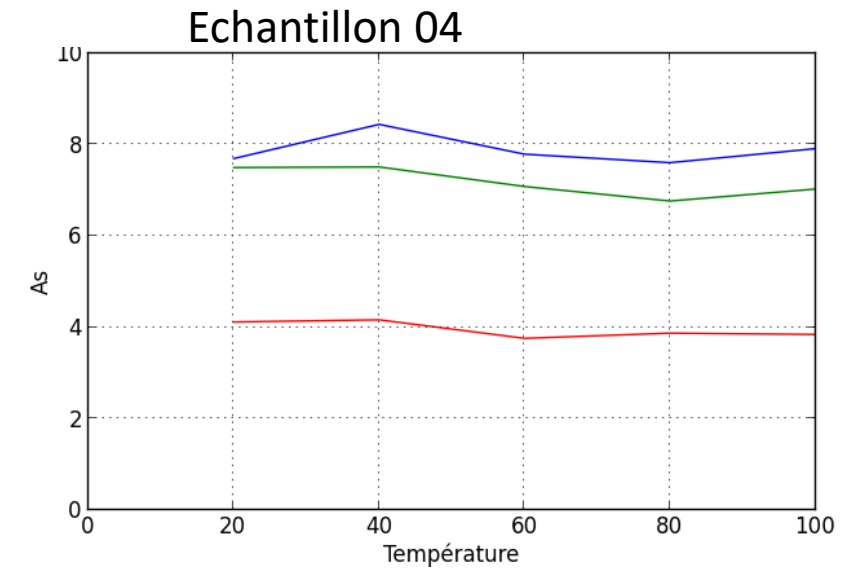
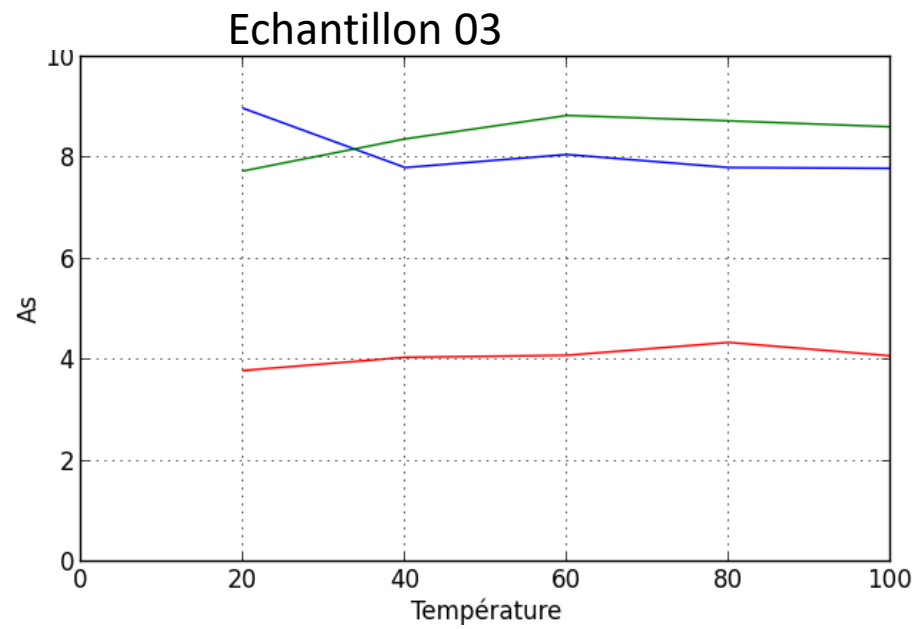


4- Résultats

On calcule l'atténuation spatiale pour chaque échantillon, pour chaque température grâce aux valeurs récoltées de l'ordinateur portable.

Pour chaque échantillon, on construit un graphe montrant l'évolution de l'atténuation de l'onde en son sein, selon chaque direction.(3 courbes par échantillon)





4- Interprétation

CONCLUSION