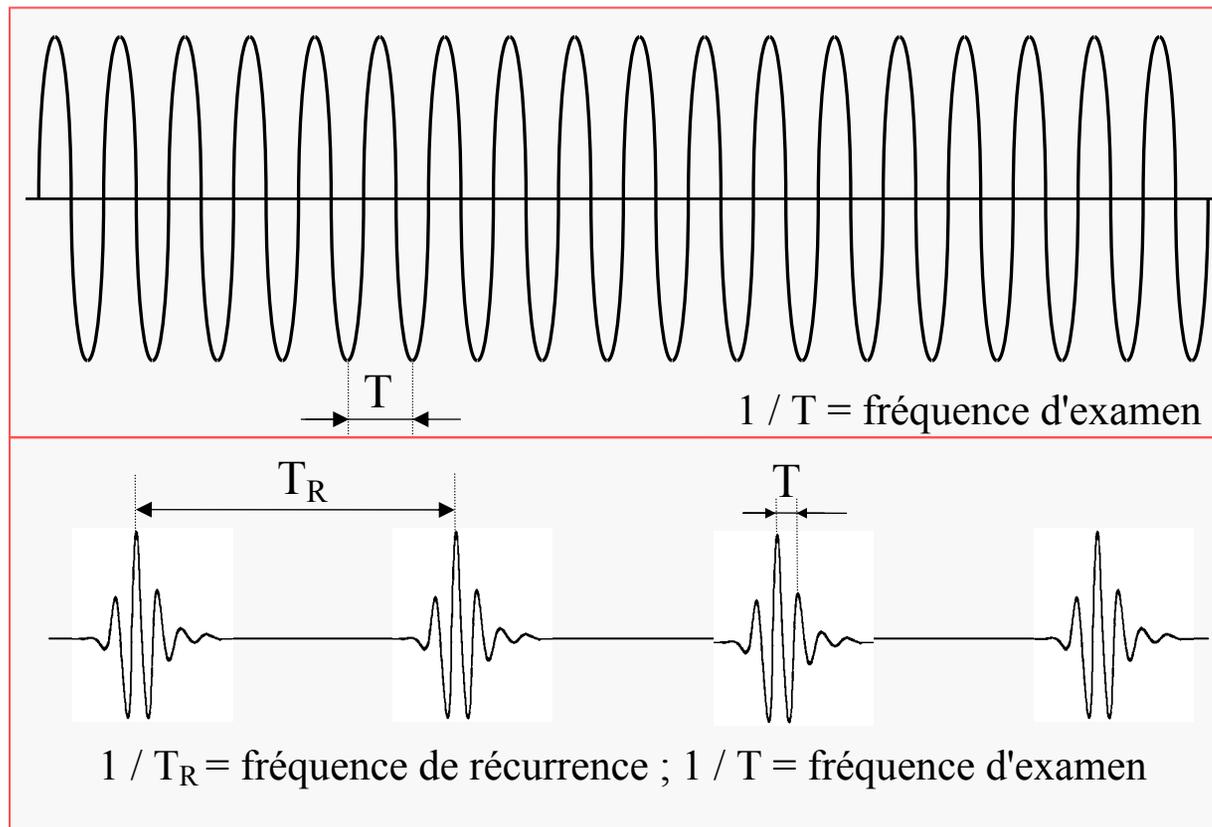


Ultrasons : sommaire

- Principes physiques
 - propagation des ondes acoustiques
 - réflexion, réfraction & diffraction
 - capteur & faisceau acoustiques, équipement
- Méthodes courantes
 - configurations d'examen
 - détection de défauts
 - dimensionnement de défauts
- Application aux matériaux hétérogènes
 - perturbations & remèdes
 - technique TRL
- Examens automatisés
 - principes de base
 - méthodes spécifiques : focalisations, technique TOFD

Ultrasons : rappel

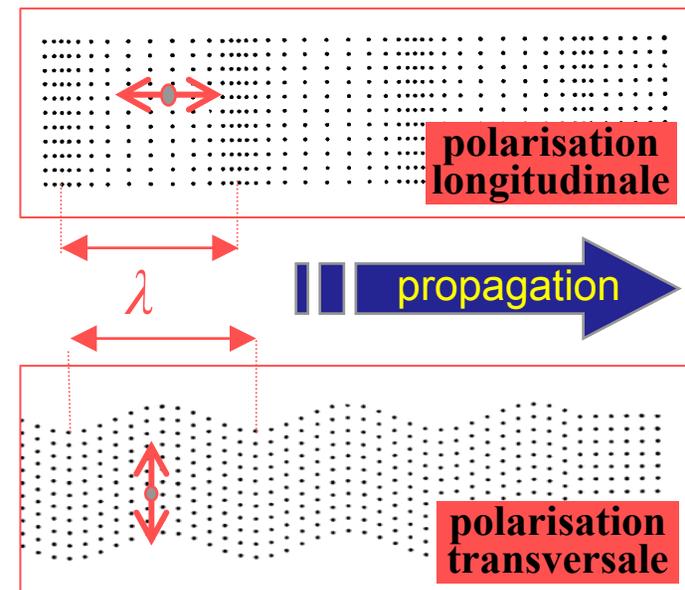
- Fourier : similitude entre ondes entretenue et impulsionnelle



Ultrasons : caractéristiques d'onde sinusoïdale

- Fréquence
- Direction de propagation
- Polarisation
 - longitudinale : onde de compression
 - transversale : onde de cisaillement
- Vitesse de propagation
 - $f(\text{milieu, polarisation})$ en milieu isotrope
 - $V_L > V_T$
- Longueur d'onde $\lambda = V / f$

ONDE PLANE



Pour toute direction, il existe maximum 3 ondes distinctes (vitesse, polarisation).
Dans un solide isotrope, il existe maximum une onde L et une onde T.
En milieu liquide, seule une onde L peut se propager.

Ultrasons : réflexion & réfraction (a)

■ Impédance acoustique : $Z = \rho V$ (ρ : densité)

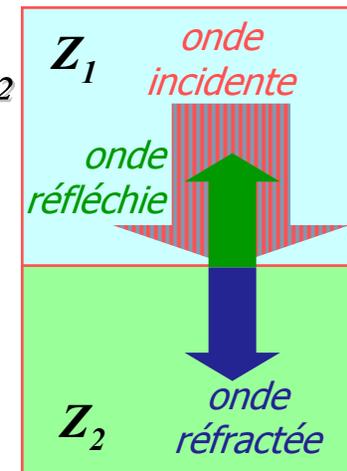
■ Incidence droite :

■ Energie réfléchiée (%) : $(Z_2 - Z_1)^2 / (Z_2 + Z_1)^2$

■ Energie réfractée (%) : $4 Z_1 Z_2 / (Z_2 + Z_1)^2$

Remarques :

- Si $|Z_2 - Z_1| \gg$: réflexion dominante
(\rightarrow détection de défauts de matière)
- Si $|Z_2 - Z_1| \ll$: réfraction dominante
(\rightarrow pas de détection de défauts en compression)



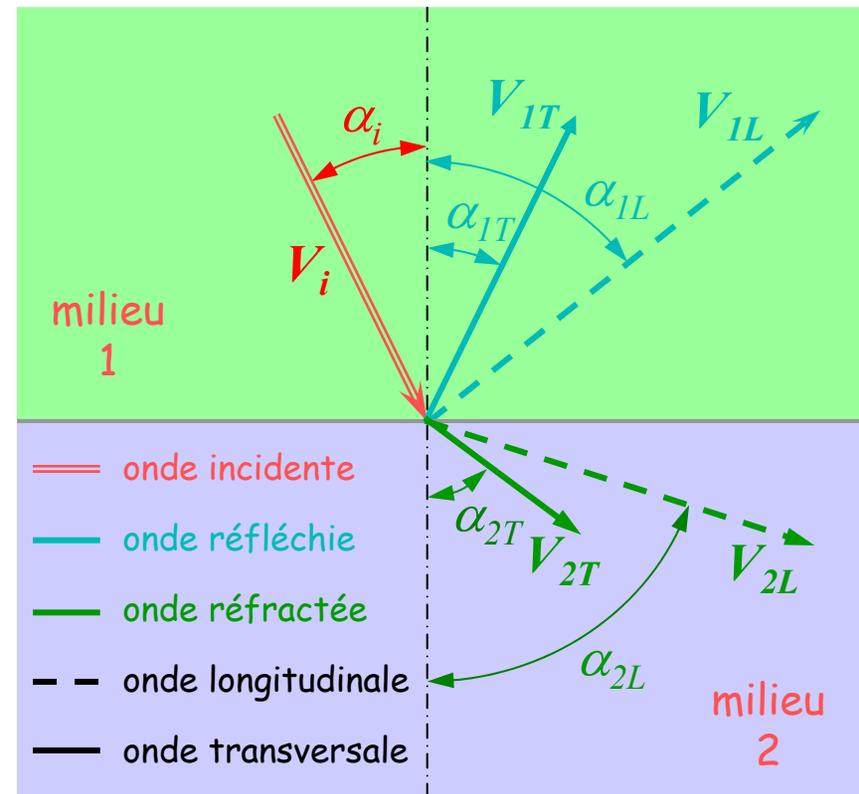
Ultrasons : réflexion & réfraction (b)

- Incidence oblique :
loi de Snell-Descartes

$$\frac{\sin \alpha_i}{V_i} = \frac{\sin \alpha_{1L}}{V_{1L}} = \frac{\sin \alpha_{1T}}{V_{1T}} = \frac{\sin \alpha_{2L}}{V_{2L}} = \frac{\sin \alpha_{2T}}{V_{2T}}$$

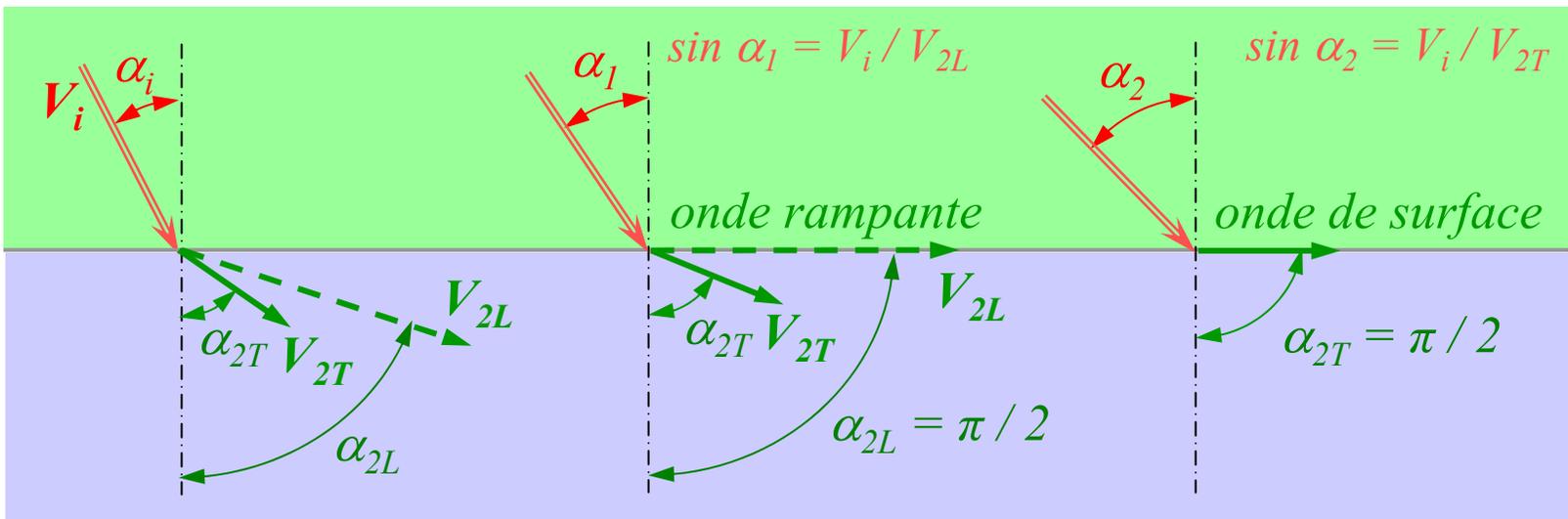
Remarques

- Onde incidente L (T) :
 $V_i = V_{1L} (V_{1T})$ et $\alpha_i = \alpha_{1L} (\alpha_{1T})$
- Certaines composantes réfléchies ou réfractées peuvent ne pas exister, ou véhiculer une énergie négligeable.
- La réflexion et la réfraction n'ont aucun impact sur la caractéristique fréquentielle.



Ultrasons : réflexion & réfraction (c)

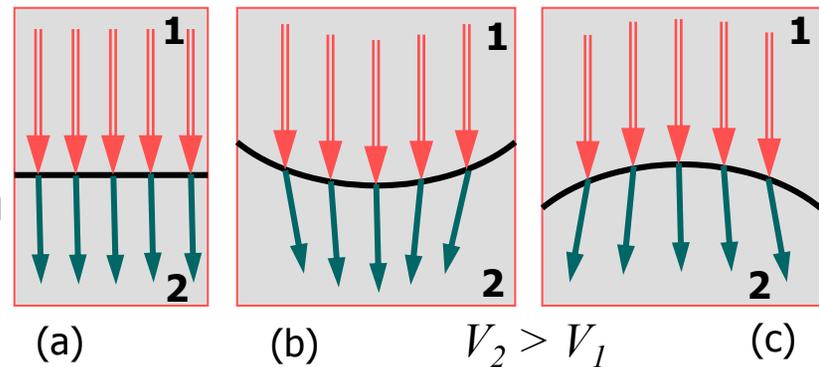
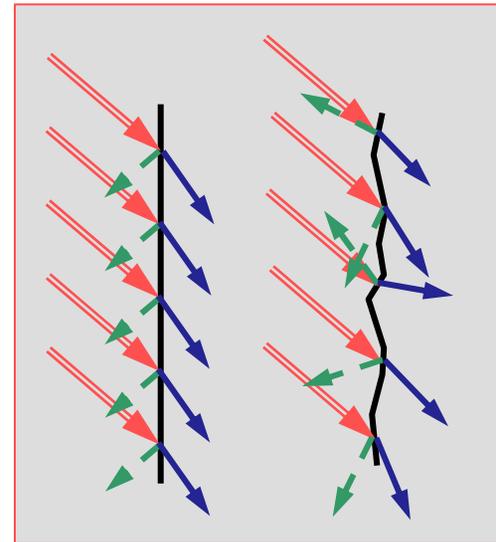
■ Incidence oblique (suite)



- α_{2L} et α_{2T} augmentent avec α_i .
- Quand $\alpha_i = \text{asin}(V_i / V_{2L}) = \alpha_1$ (premier angle critique), $\alpha_{2L} = \pi / 2$, l'onde L réfractée suit l'interface (onde rampante).
- Quand $\alpha_i = \text{asin}(V_i / V_{2T}) = \alpha_2$ (second angle critique), $\alpha_{2T} = \pi / 2$, l'onde T réfractée suit l'interface (onde de surface). Elle se propage à une vitesse V_S légèrement inférieure à V_{2T} .
- Si $\alpha_i > \alpha_2$, toute l'énergie incidente est réfléchie.

Ultrasons : réflexion & réfraction (d)

- Effet de l'état de surface de l'interface :
 - surface lisse : maintien des orientations des rayons réfléchis et réfractés
 - surface rugueuse : dispersion des rayons
- Effet de la géométrie de l'interface :
 - surface plane : maintien de l'orientation des rayons
 - surface concave : focalisation si $V_2 > V_1$ (et inversement)
 - surface convexe : défocalisation si $V_2 > V_1$ (et inversement)

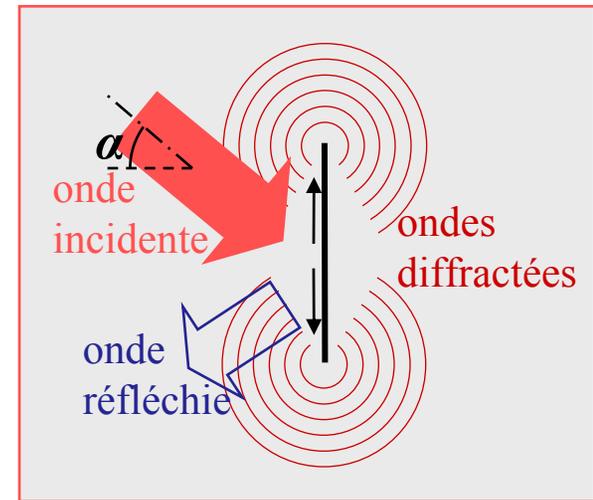


Ultrasons : valeurs numériques

Milieu	ρ [kg/m ³]	V_L [m/sec]	V_T [m/sec]	V_S [m/sec]
<i>air</i>	1	330	-	-
<i>eau</i>	1 000	1 500	-	-
<i>plexiglas</i>	1 180	2 700	1 100	1 000
<i>polyéthylène</i>	900	1 960	530	480
<i>aluminium</i>	2 700	6 250	3 100	2 800
<i>cuivre</i>	8 900	4 630	2 140	1 930
<i>acier</i>	7 850	5 960	3 240	2 900
<i>acier inox</i>	7 900	5 650	3 100	2 800
<i>PZT</i>	7 500	4 000		
<i>MBP</i>	6 200	3 300		

Ultrasons : diffraction

- L'impact de l'onde incidente (L ou T) produit des ondes à la surface de la discontinuité.
- Les ondes de surface se transforment en ondes diffractées aux extrémités de la discontinuité.

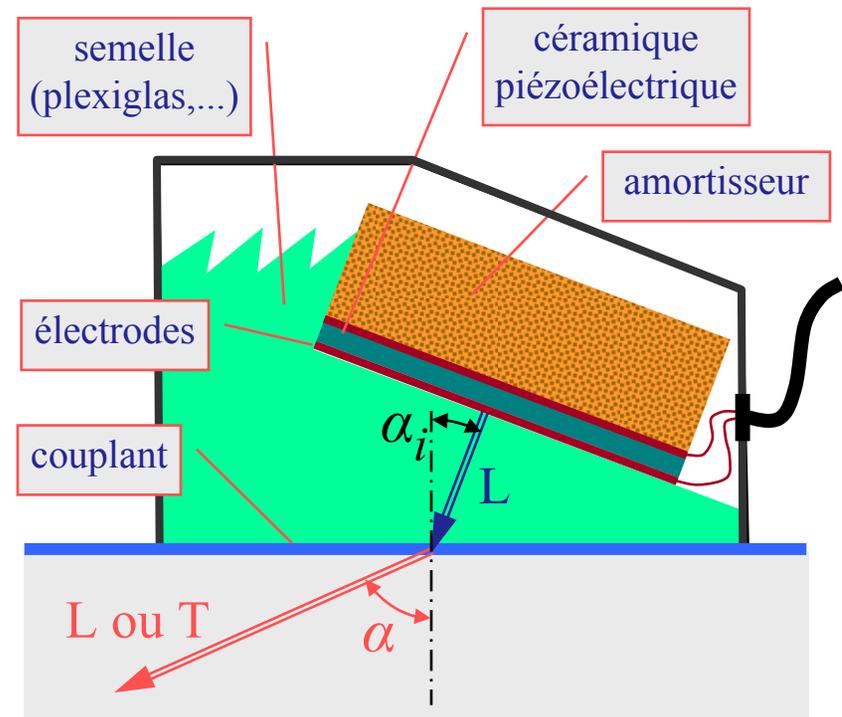


Remarques

- Conditions d'existence : - discontinuité plane à extrémités fines
- incidence oblique
- Les signaux diffractés sont beaucoup plus faibles que l'onde réfléchi.

Ultrasons : capteur (a)

- Les faces métallisées d'une pastille céramique piézoélectrique transforment une décharge électrique en vibration mécanique.
- L'onde se propage dans la semelle et pénètre dans le matériau à travers une couche liquide assurant le couplage acoustique.
- Transformation inverse de l'énergie en réception



Ultrasons : capteur (b)

- Elements constitutifs :
 - pastille piézoélectrique : céramique de synthèse (PZT : titanate-zirconate de plomb ; MBP : métaniobate de plomb ; ...)
 - électrodes (décharges de 100 à 400 V)
 - semelle fixe ou interchangeable, assurant la génération de l'onde (L ou T) sous l'angle voulu
 - amortisseur (mélange de résine et de poudre de tungstène) absorbant l'onde émise à la face arrière de la céramique, et limitant la durée de la vibration mécanique.

Remarque

- L'onde émise par la céramique est toujours longitudinale. Une onde transversale est créée dans le milieu examiné par réfraction à l'interface semelle-milieu (loi de Snell-Descartes).

Ultrasons : caractéristique fréquentielle

- Le spectre fréquentiel est déterminé par :

- la céramique
(matériau et épaisseur t)

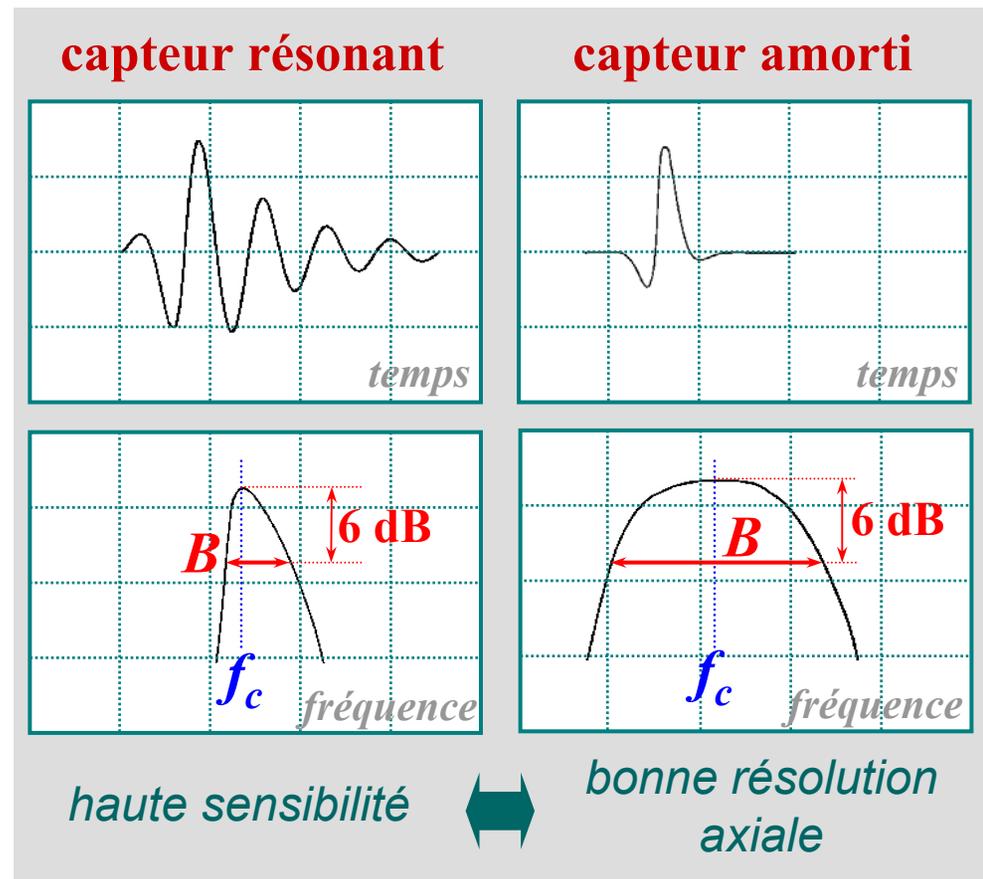
$$t = \lambda/2$$

- l'amortisseur
- l'adaptation électrique

- Il est caractérisé par :

- la fréquence centrale f_c
- la bande passante B [MHz] ou B/f_c [%]
à -6, -3 ou ... dB

$$dB = 20 \log_{10}(A_2 / A_1)$$

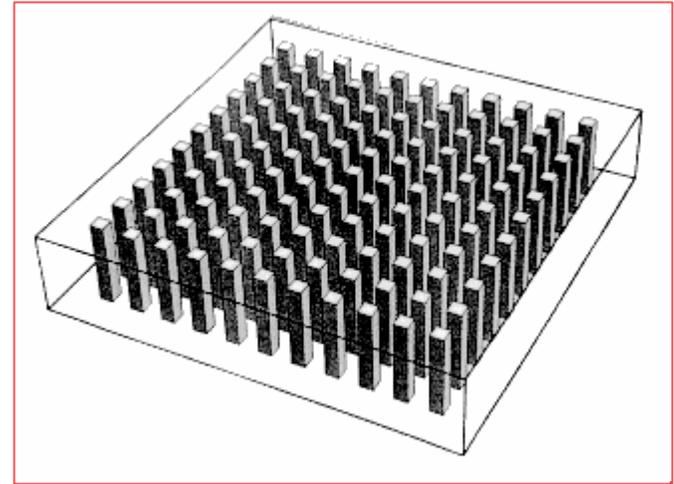


Ultrasons : céramiques composites

- Barreaux céramiques noyés dans une résine synthétique

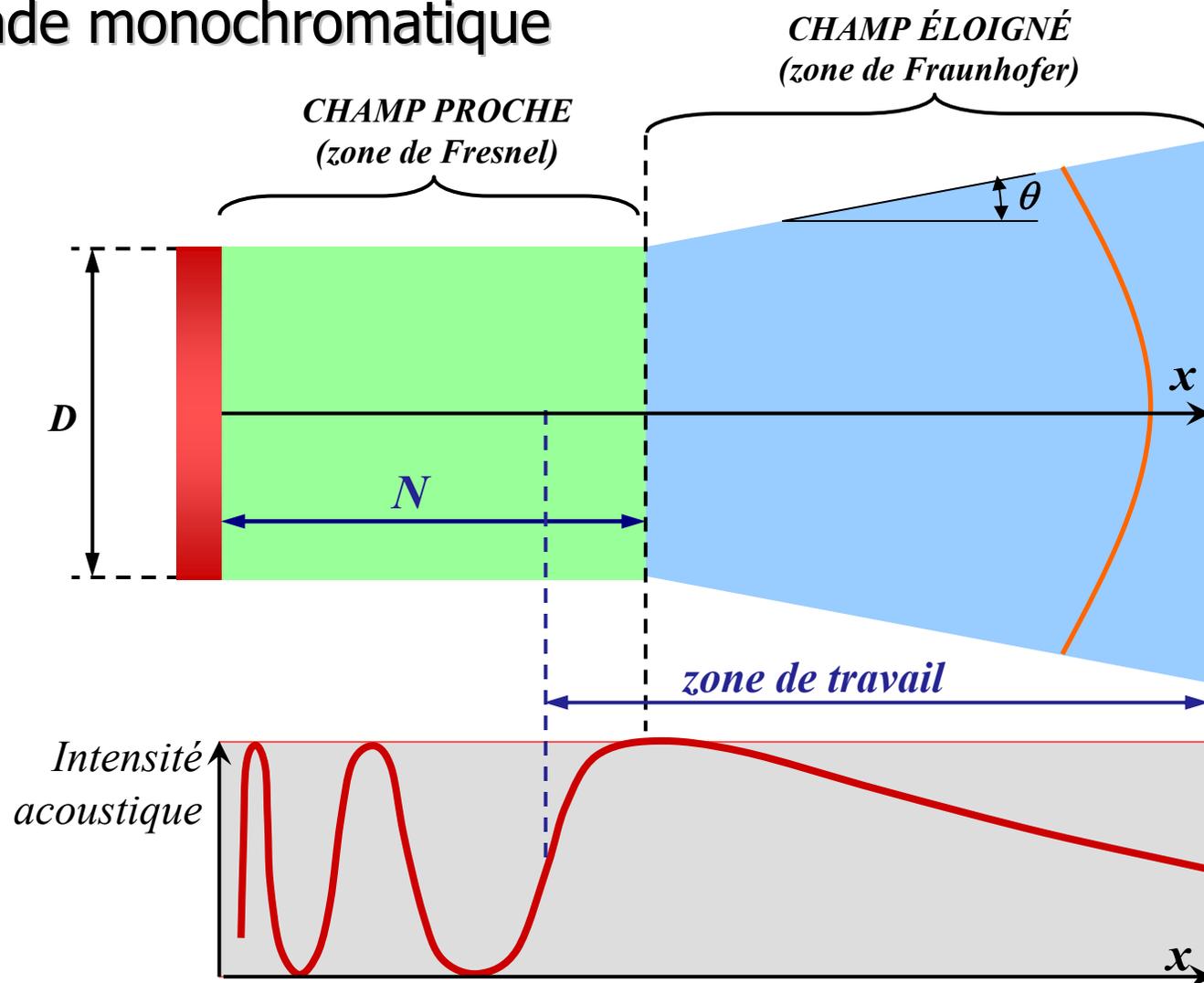
Avantages :

- faible impédance acoustique
⇒ bon couplage à la semelle
- flexibilité mécanique
⇒ focalisation aisée



Ultrasons : faisceau acoustique (a)

- Onde monochromatique



Ultrasons : faisceau acoustique (b)

- Sur l'axe (x) de symétrie de la céramique :
interférences d'intensité dans le champ proche (N), et décroissance quadratique inverse dans le champ éloigné
- Hors axe et loin de la céramique :
faisceau divergent (θ) et décroissance gaussienne de l'intensité en s'éloignant de l'axe

$$N = \frac{D^2}{4\lambda}$$

$$\sin \theta = K \frac{\lambda}{D}$$

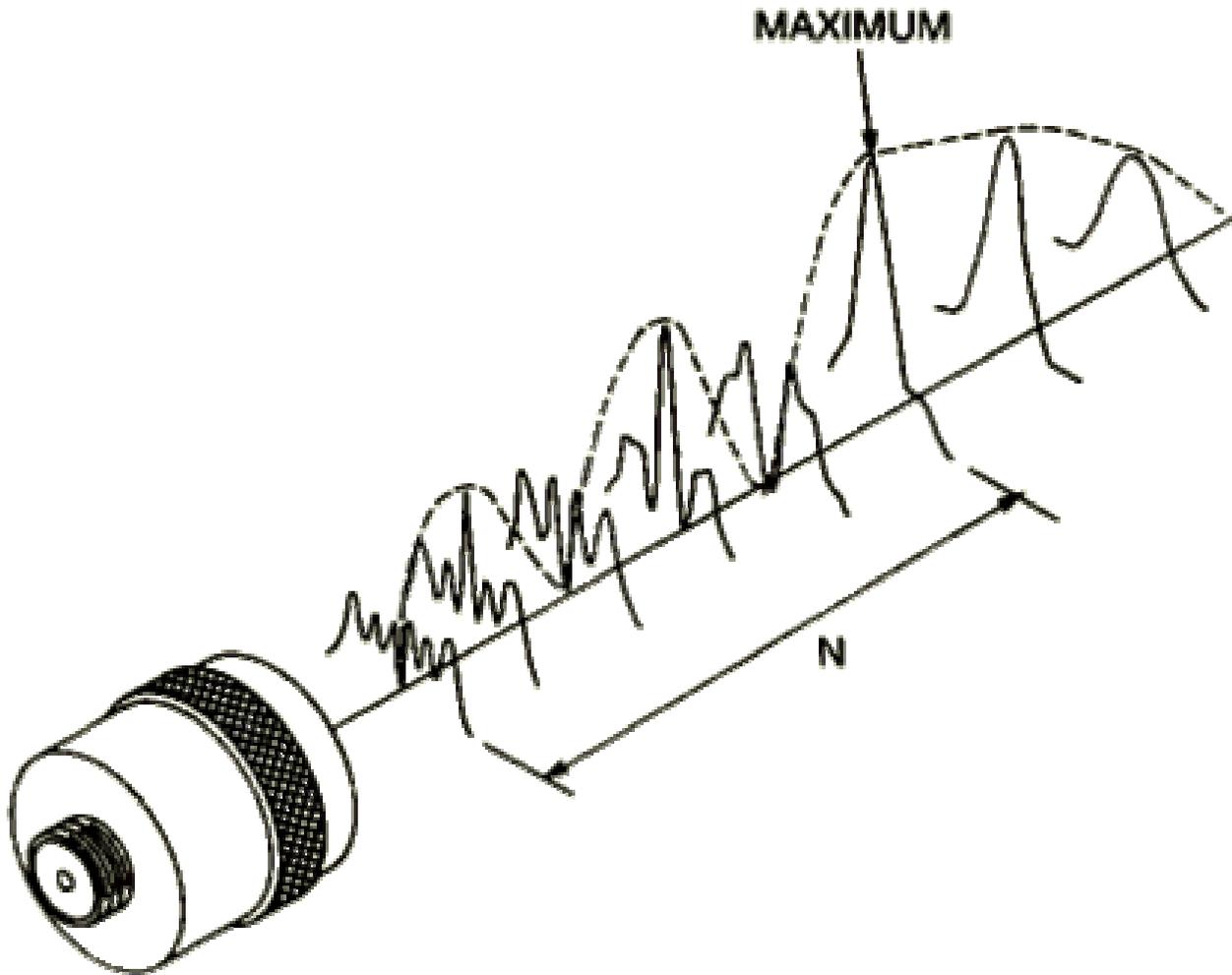
Remarque

Le champ proche peut se répartir sur différents milieux.

K = 0,51 pour une chute de 6 dB
0,87 pour une chute de 20 dB
1,22 pour une chute totale

Ultrasons : faisceau acoustique (c)

- Onde pulsées : interférences moins marquées

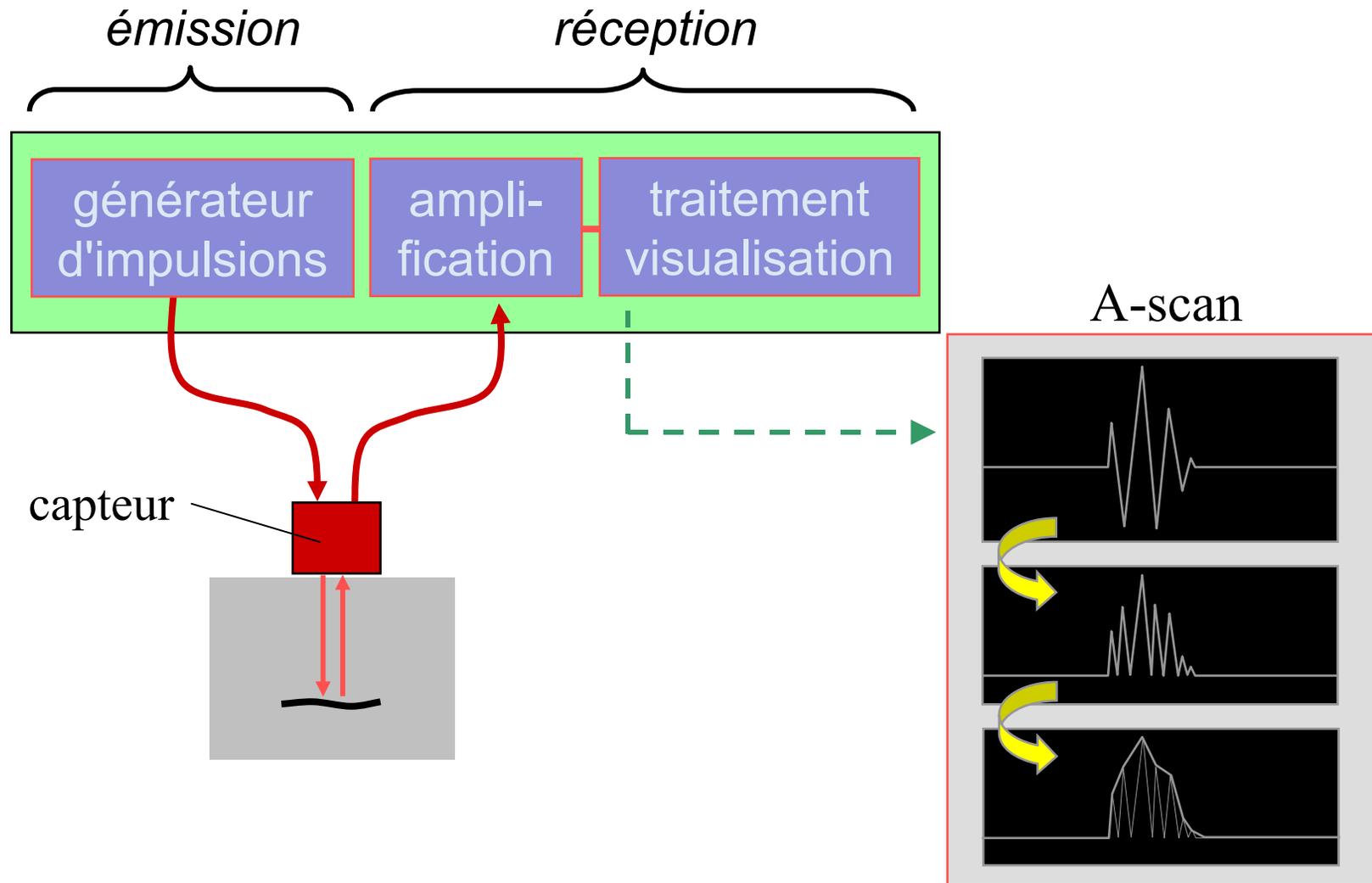


Ultrasons : atténuation de l'énergie

- 3 causes d'atténuation de l'énergie acoustique au cours de la propagation :
 - absorption : conversion de l'énergie cinétique de la vibration en chaleur
 - diffusion : réflexion et réfraction à toute microdiscontinuité de la matière (joints de grains, impuretés,...)
→ génération de bruit de fond
 - ouverture du faisceau (angle θ)

L'absorption et la diffusion augmentent avec la fréquence.

Ultrasons : équipement d'examen (a)



Ultrasons : équipement d'examen (b)



- Valeurs numériques usuelles :
 - fréquence : 2 à 5 MHz (aciers courants)
 - angles réfractés (valeurs dans l'acier) :
 - ondes L : 0°, 45°, 60°, 70°
 - ondes T : 45°, 60°, 70°
 - épaisseur testée : de 2 mm à 1 m (et plus)

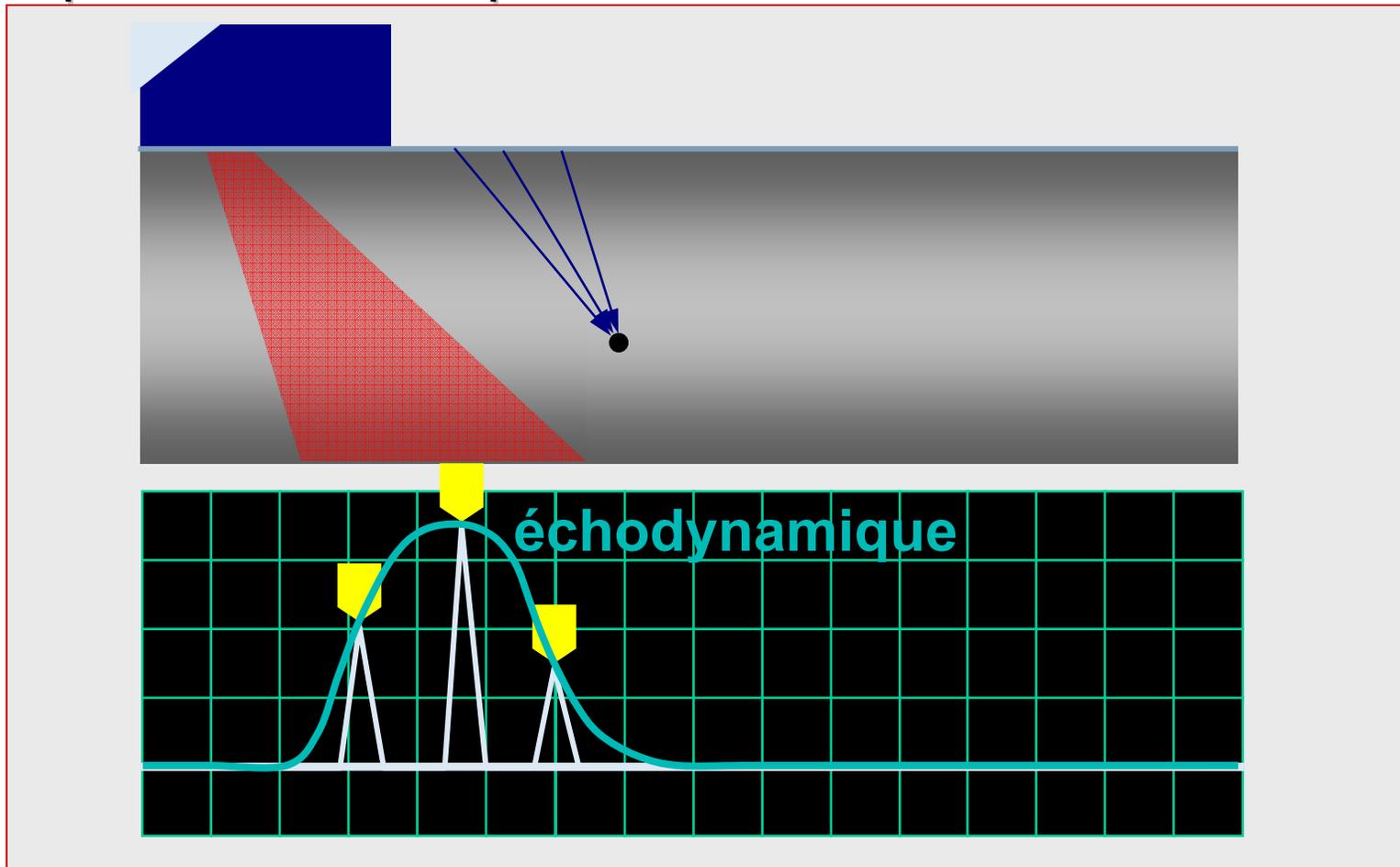


Ultrasons : sommaire

- Principes physiques
 - propagation des ondes acoustiques
 - réflexion, réfraction & diffraction
 - capteur & faisceau acoustiques
- Méthodes courantes
 - configurations d'examen
 - détection de défauts
 - dimensionnement de défauts
- Application aux matériaux hétérogènes
 - perturbations & remèdes
 - technique TRL
- Examens automatisés
 - principes de base
 - méthodes spécifiques : focalisations, technique TOFD

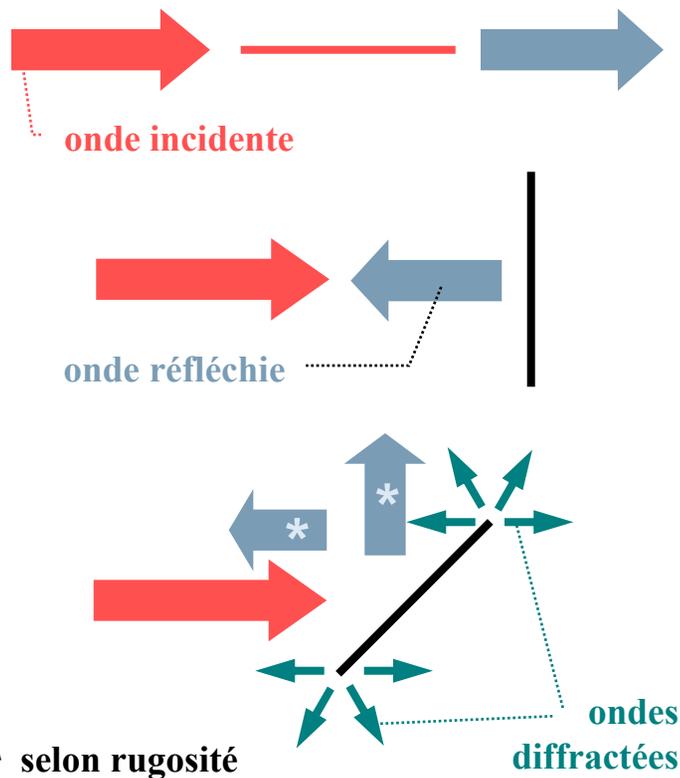
Ultrasons : échodynamique

- Courbe parcourue par le sommet d'un écho pendant le déplacement du capteur

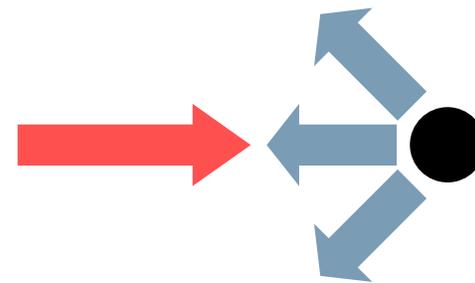


Ultrasons : réflectivité des défauts

DEFAUT PLAN



DEFAUT VOLUMIQUE



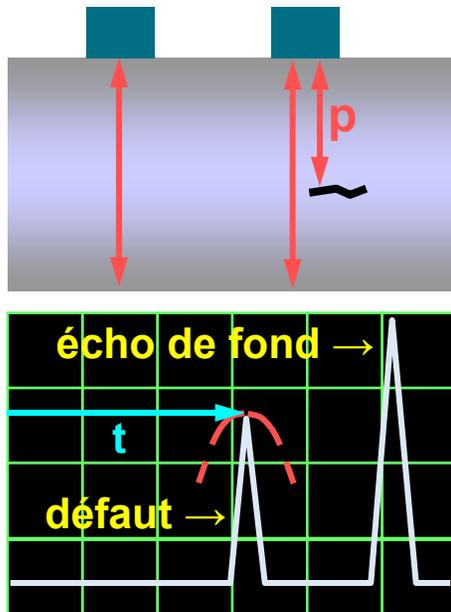
Remarque

Pour pouvoir détecter des défauts plans d'orientations diverses, il faut utiliser plusieurs capteurs d'angles différents.

Ultrasons : impulsion-réception (*pulse-echo*)

- Capteur droit (0°, ondes L)

↙ = un seul capteur



$$p = \frac{V_L t}{2}$$

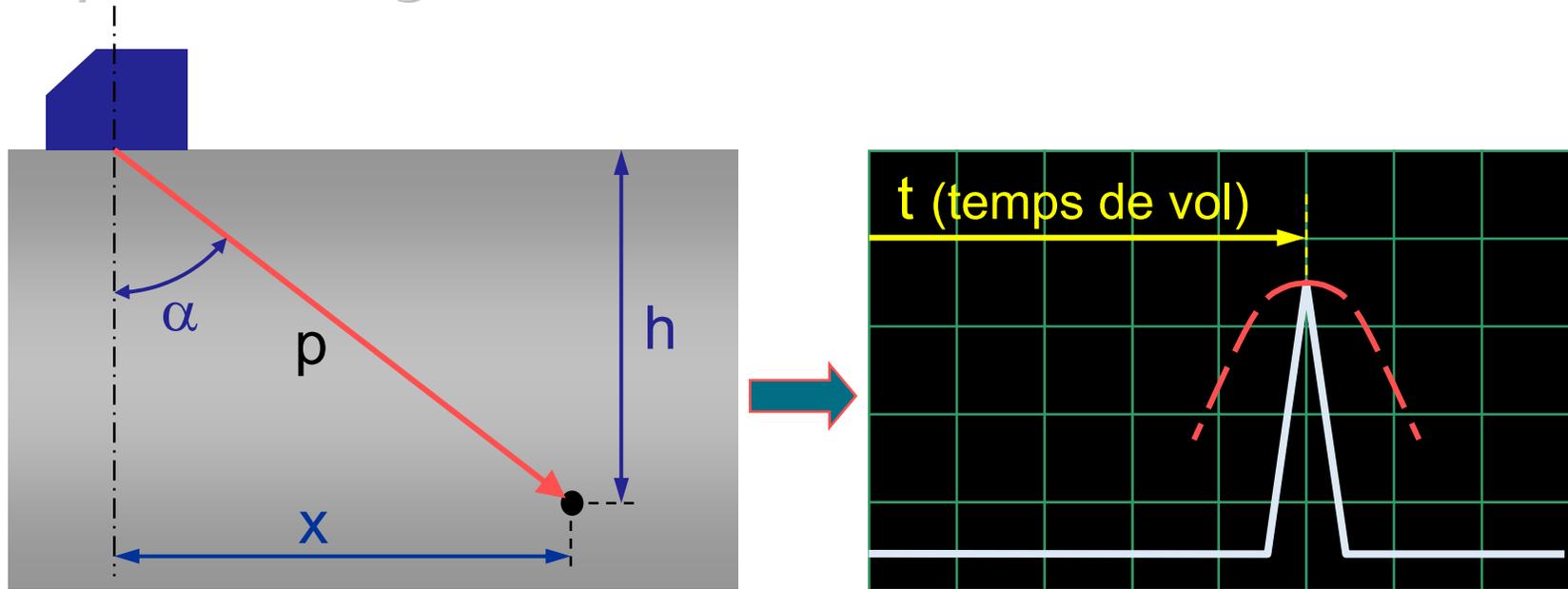
Objectifs potentiels :

- (mesure d'épaisseur)
- recherche de défauts laminaires (ex : décollement de revêtement)
- recherche de défauts volumiques (aussi en raison de leur effet potentiel de masquage)

→ dégrossissage préalable

Ultrasons : impulsion-réception (b)

■ Capteur d'angle



$$x = p \sin \alpha$$

$$h = p \cos \alpha$$

$$p = V t / 2$$

En pratique : écran étalonné en h → lecture immédiate

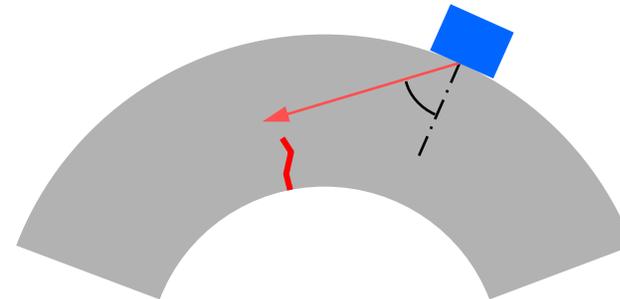
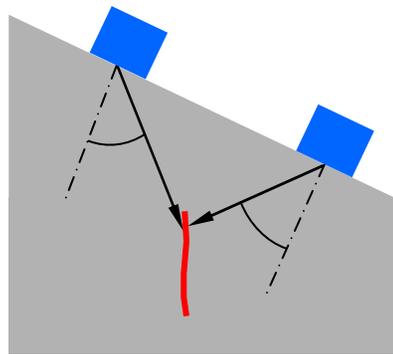
Ultrasons : impulsion-réception (c)

■ Capteur d'angle (suite)

- angles multiples
- par défaut : ondes T
- angles usuels : 45° , 60° , 70°

Objectifs :

- (défauts volumiques)
- défauts plans
(non laminaires)



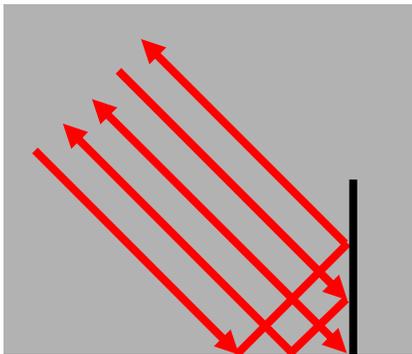
Remarque

Distinguer angle réfracté du capteur et angle d'incidence sur le défaut

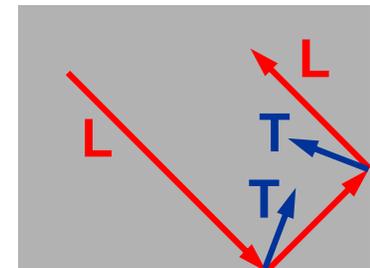
Ultrasons : impulsion-réception (d)

■ Cas particuliers

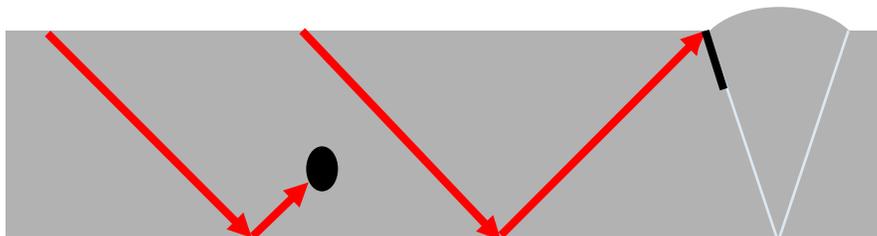
Echo de coin (défaut débouchant en paroi opposée)



- écho maximum à 45°
- forte amplitude en ondes T
- faible amplitude en ondes L



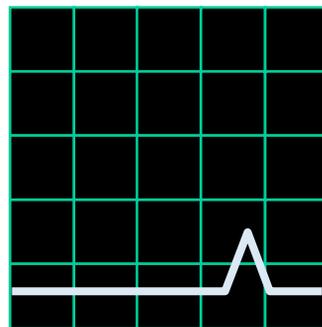
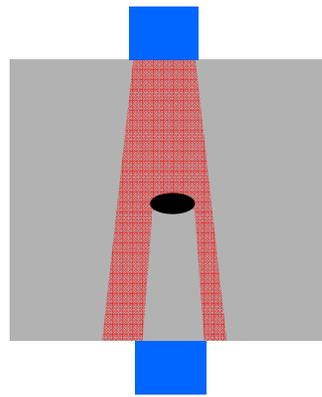
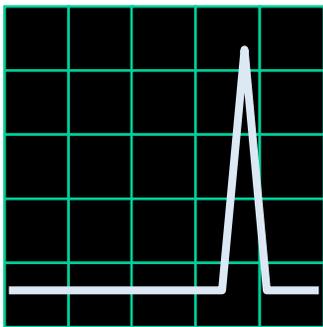
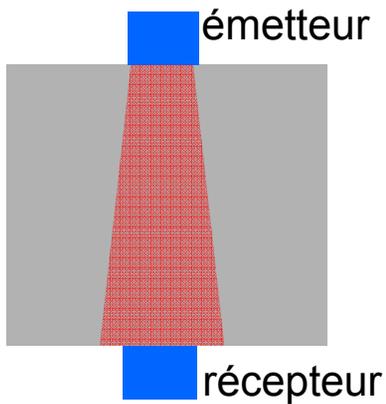
Bond (demi-bond, bond complet,...)



- seulement en ondes T
- réflexions multiples : ondes guidées

Ultrasons : techniques à capteurs distincts (a)

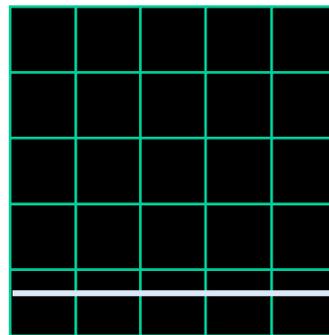
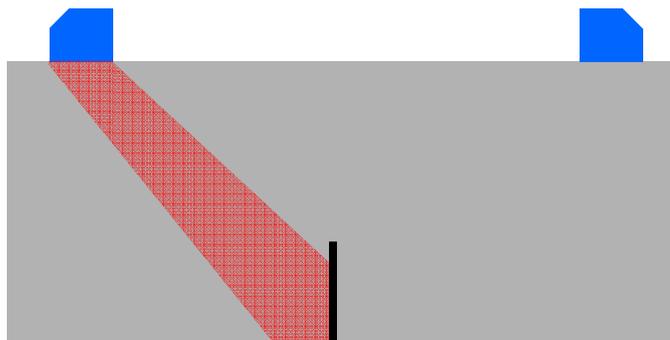
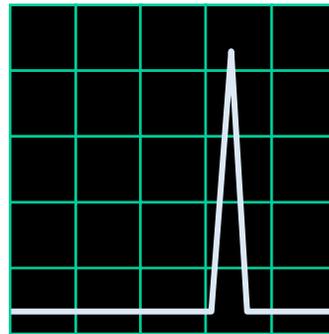
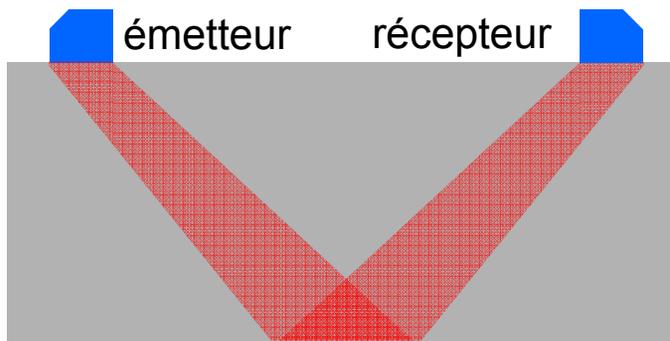
■ Transmission



- capteurs solidaires
- accès aux 2 faces
- détection par perte de signal
- insensibilité à l'orientation du défaut

Ultrasons : capteurs distincts (b)

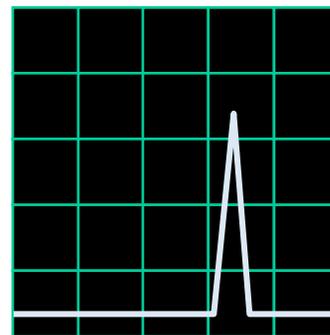
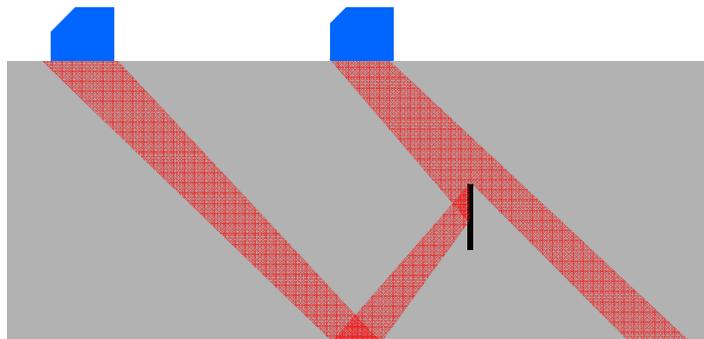
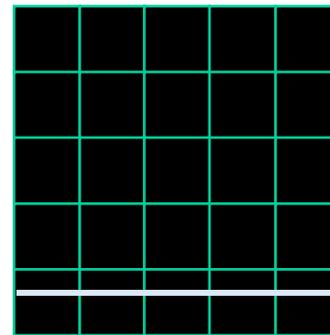
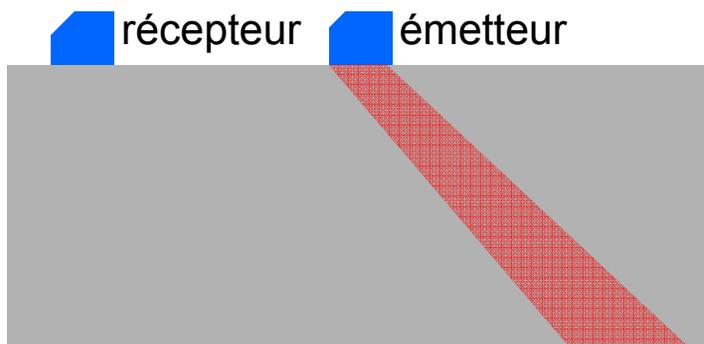
■ Pitch & Catch



- capteurs solidaires
- détection par perte de signal
- insensibilité à l'orientation du défaut
- sensibilité à la réflectivité de la paroi opposée

Ultrasons : capteurs distincts (c)

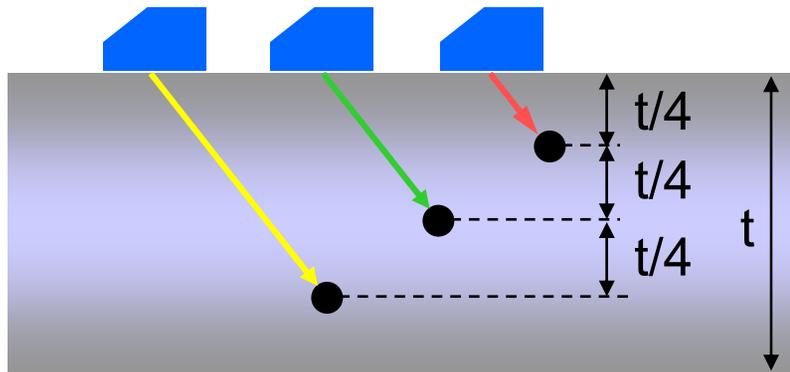
■ Tandem



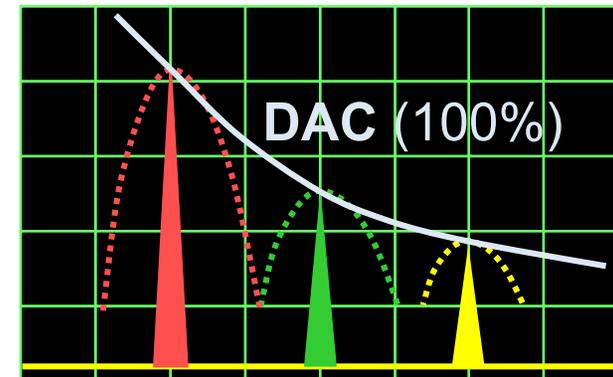
- capteurs solidaires
- détection par apparition de signal
- grande sensibilité à l'orientation du défaut
- sensibilité à la réflectivité de la paroi opposée

Ultrasons : détection

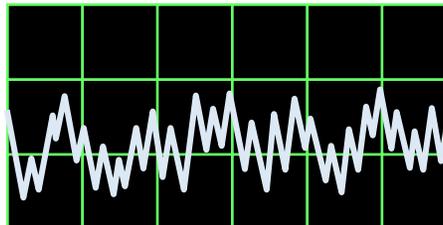
- Seuil de détection fixe (déterminé par étalonnage)
- % DAC (Distance Amplitude Correction)



Exemple : 25% DAC = 100% DAC - 12 dB

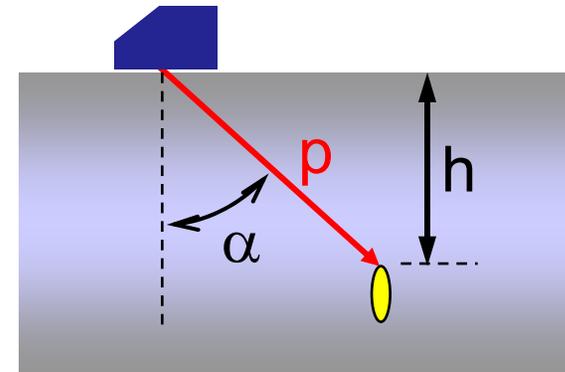
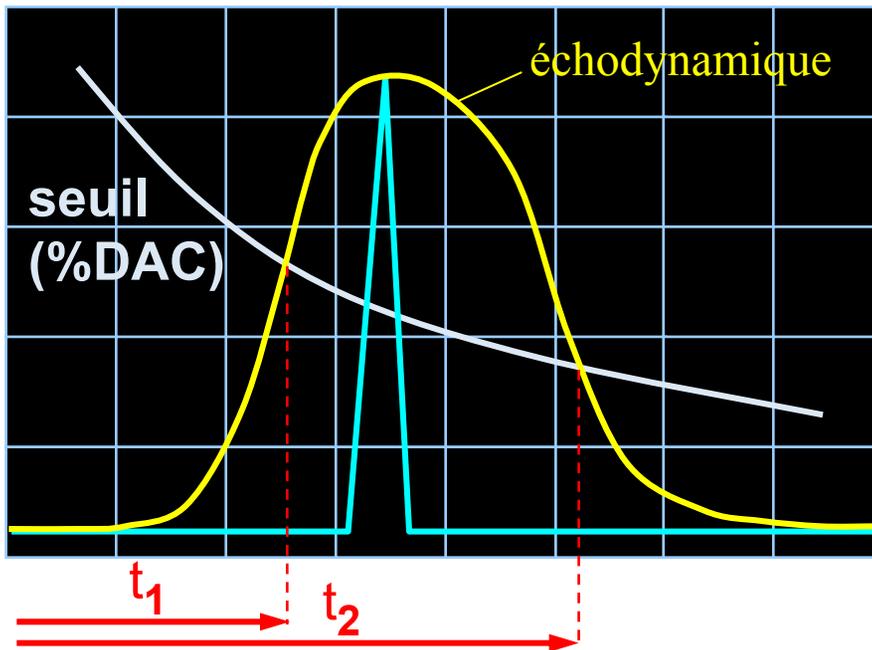


- Niveau du bruit



Ultrasons : dimensionnement (a)

- Dimensionnement par seuil (fixe ou %DAC)



$$p_1 = \frac{V t_1}{2}$$

$$p_2 = \frac{V t_2}{2}$$

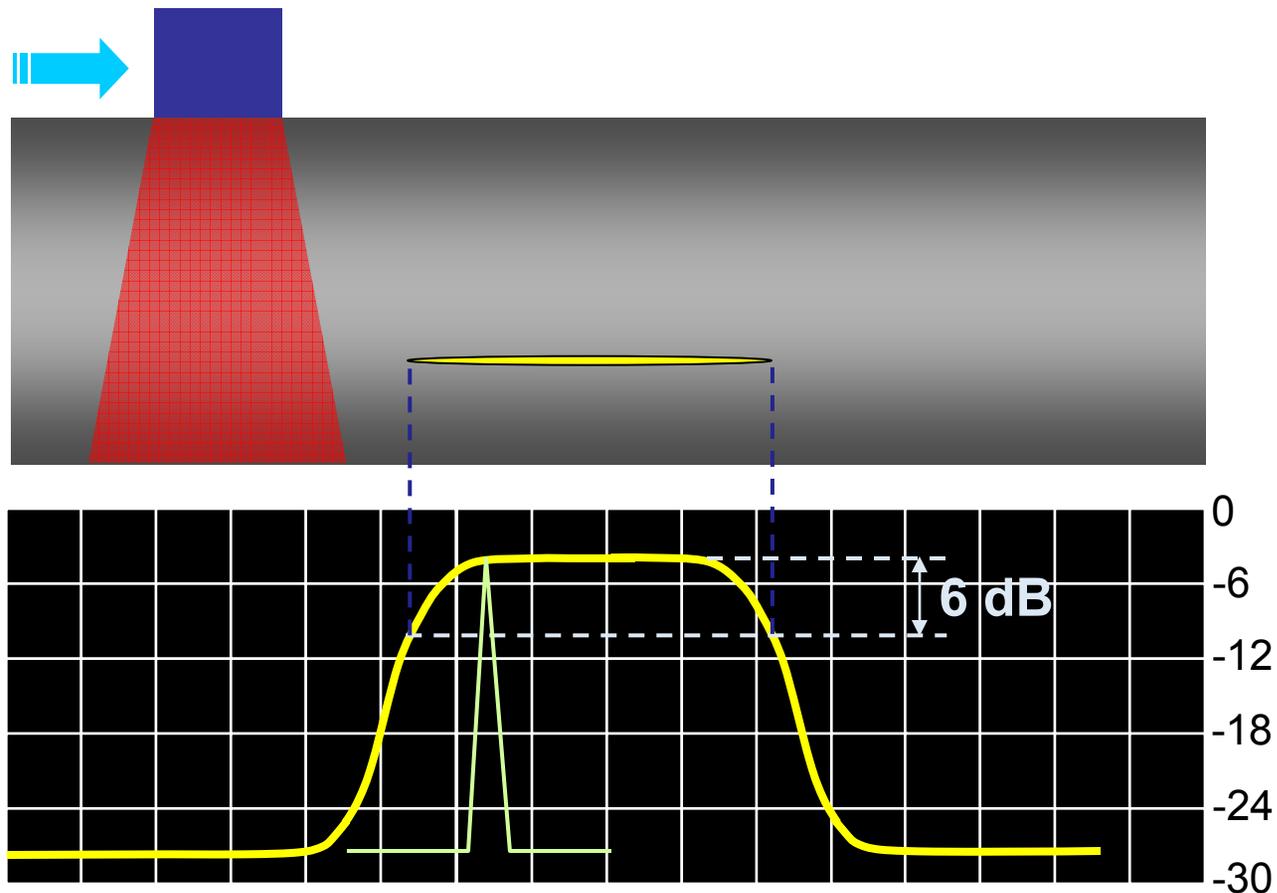


$$\Delta h = h_2 - h_1 = (p_2 - p_1) \cos \alpha = V(t_2 - t_1) \frac{\cos \alpha}{2}$$

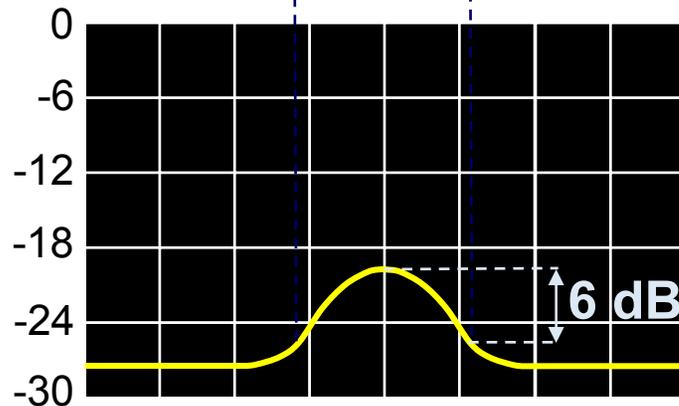
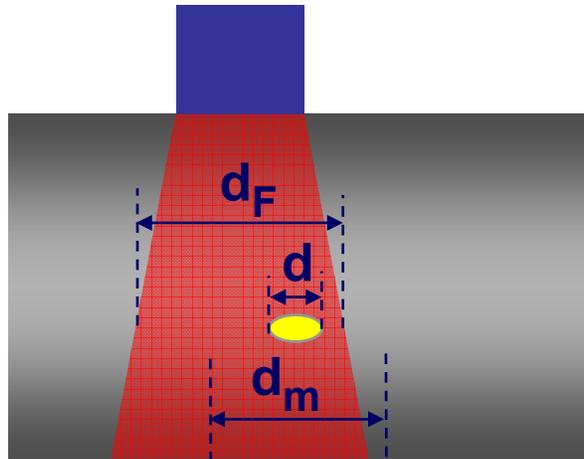
Ultrasons : dimensionnement (c)

■ Dimensionnement à 6 dB (capteur droit)

La distance séparant les intersections de l'échodynamique avec le niveau -6 dB est la dimension du défaut.

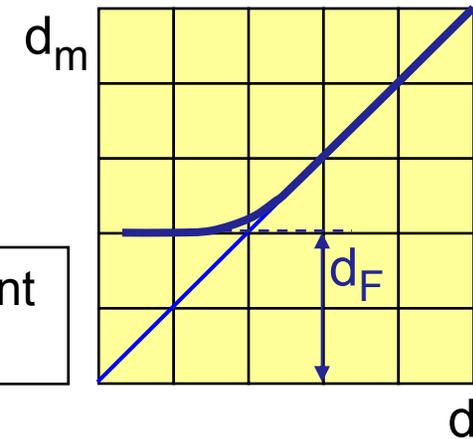


Ultrasons : dimensionnement (d)



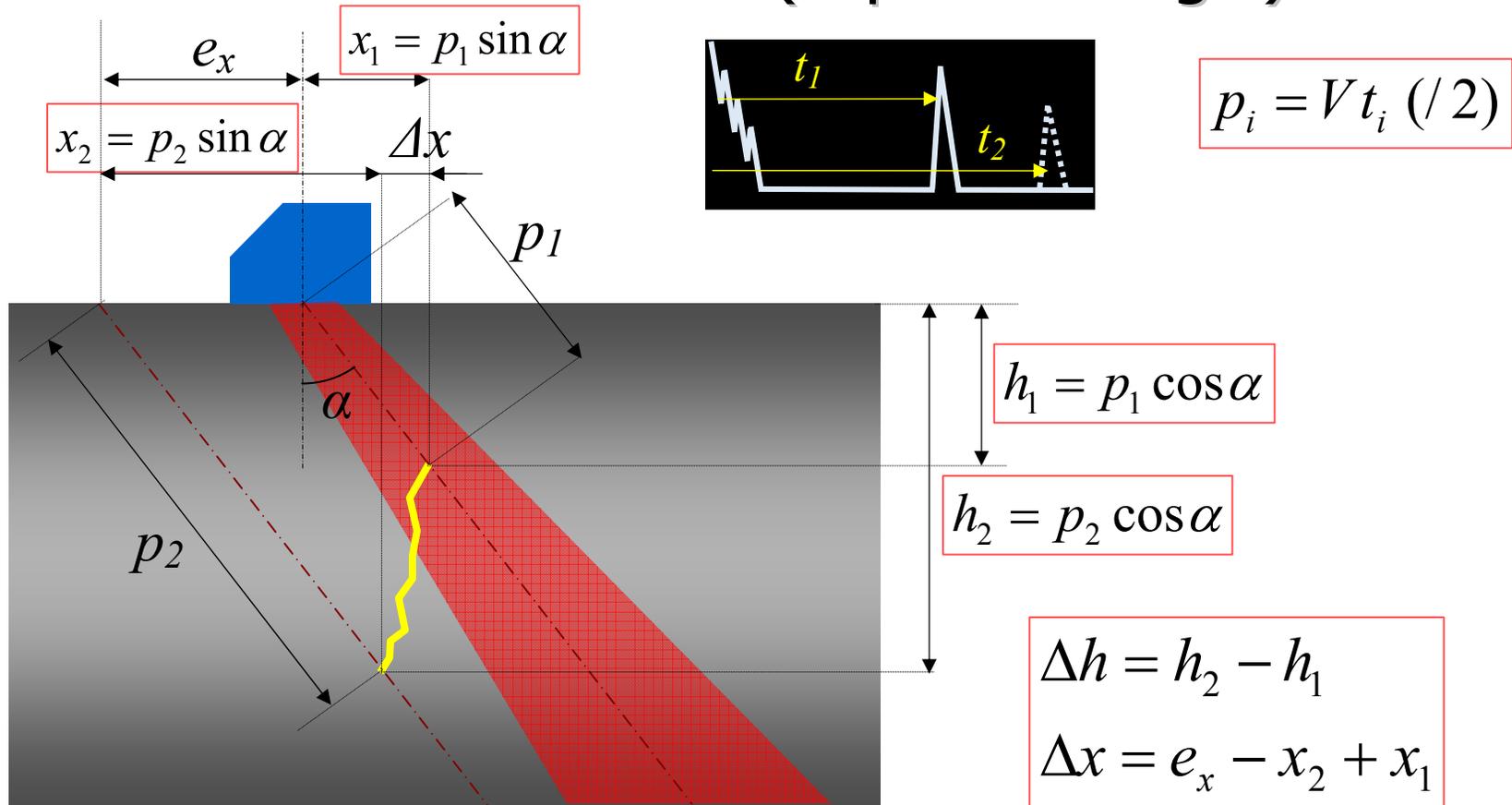
d : dimension du défaut
 d_F : dimension du faisceau
(à la profondeur du défaut)
 d_m : dimension mesurée à -6 dB
Si $d < d_F$: $d_m \approx d_F > d$

Surdimensionnement
des petits défauts



Ultrasons : dimensionnement (e)

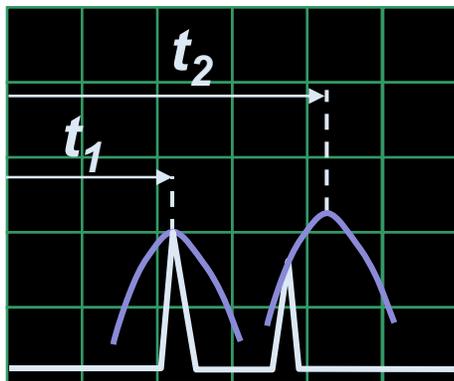
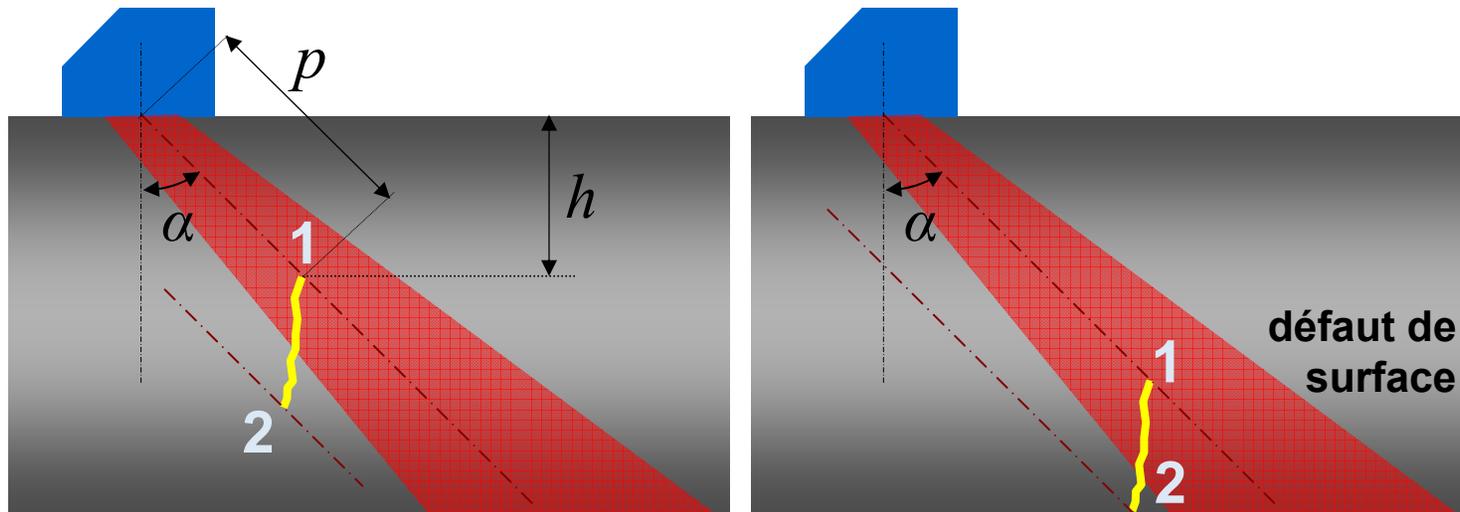
- Dimensionnement à 6 dB (capteur d'angle)



Si $\Delta x \approx 0$: $\Delta h = e_x / \tan \alpha$

Ultrasons : dimensionnement (f)

■ Dimensionnement par diffraction

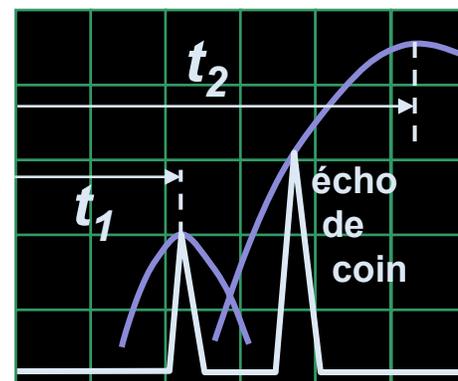


$$h_1 = p_1 \cos \alpha$$

$$h_2 = p_2 \cos \alpha$$

$$p_i = V t_i (/2)$$

$$\Delta h = h_2 - h_1$$



Ultrasons : performances

- Détection de défauts
 - très bonne performance sur défauts volumétriques & plans (particulièrement ceux débouchant en paroi opposée)
 - risque d'indications parasites
 - risque de masquage d'un défaut par un autre
- Localisation & caractérisation de défauts
 - très bonne performance (y compris en profondeur)
- Dimensionnement de défauts
 - bonne performance en longueur et en hauteur

Remarque :

risque de dégradation des performances si technique inadaptée

Ultrasons : avantages & inconvénients

■ Applicabilité

- tous matériaux (suffisamment compacts)
- méthode très flexible
- surface propre et non accidentée
- présence d'une zone morte

■ Mise en œuvre

- adjonction de liquide de couplage acoustique
- étalonnage préalable et périodique
- combinaison de plusieurs capteurs
- méthode complexe

■ Coût

- durée de balayage
- coût élevé (personnel formé & équipement)

■ Absence de trace (sauf en cas d'automatisation)