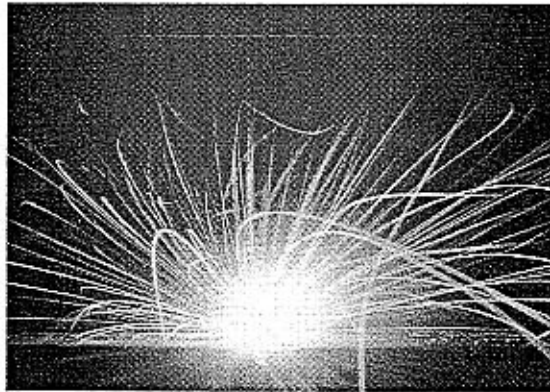


MA41 "Science des matériaux"
Département du Génie Mécanique et Conception (GMC)
Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM)
Examen final du 22 janvier 2003, salle P103

"Industrialisation du soudage par faisceau laser d'une roue dentée sur un arbre de transmission"



Quelques remarques préliminaires

- Tous les documents sont admis.
- Il convient de lire précautionneusement les questions et d'y répondre explicitement.
- Les réponses seront numérotées de manière homogène aux questions afin d'en permettre leur correction. Il n'est pas obligatoire de répondre aux questions dans l'ordre proposé.

Le contexte de l'étude

Ingénieur en charge du développement et de l'industrialisation de solutions techniques au sein de votre société, il vous est demandé d'industrialiser la technique du soudage par faisceau laser d'une roue dentée sur un arbre de transmission (Figure 1).

Cette technique présente de nombreux avantages, notamment :

- une zone affectée thermiquement de faible largeur en regard de celles résultant d'autres techniques de soudage ;
- une pénétration de soudage très importante ;
- une vitesse de soudage élevée permettant une productivité accrue ;
- de faibles déformations dues à l'apport très localisé de l'énergie.

La Figure 2 explicite schématiquement l'opération de soudage par faisceau laser : un rayonnement laser irradie la zone à traiter (à souder dans ce cas), l'interaction entre les photons et la matière conduit à son échauffement et à sa fusion. Au droit de la zone d'impact du faisceau laser, dans le métal en fusion, se développe un capillaire (ou keyhole), petite cavité remplie de vapeurs métalliques. Le déplacement du faisceau permet de déplacer ce capillaire et ainsi de réaliser le cordon de soudure.

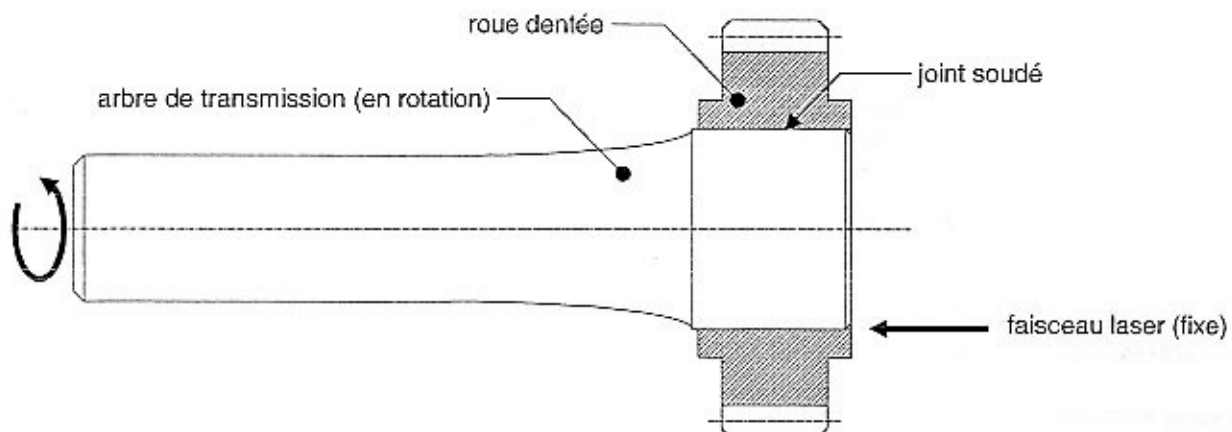


Figure 1. Représentation schématique de l'assemblage à réaliser.

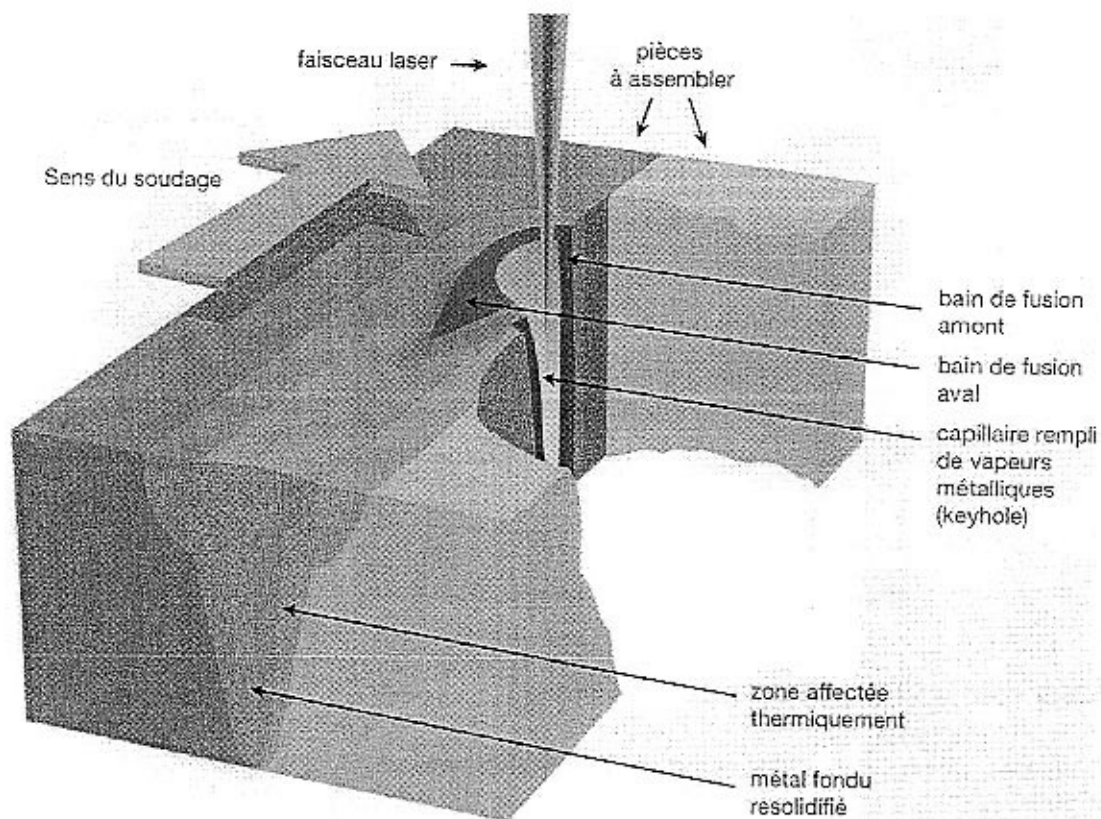


Figure 2. Principe d'une opération de soudage sous faisceau laser.

Les matériaux à assembler

Les deux matériaux à assembler sont de même nature, de l'acier 16 NC 6, dont le **Tableau 1** synthétise sa composition chimique et quelques caractéristiques additionnelles. La **Figure 3** présente le diagramme TRC de cet acier.

Tableau 1. Quelques caractéristiques de l'acier 16 NC 6.

Composition chimique moyenne en % massique					
C	Si	Mn	Cr	Ni	Autres : Pb
0,16	0,25	0,80	1,05	1,45	0,020
Propriétés mécaniques (à 25°C, pour un $\phi = 16$ mm)					
Re 835 daN.mm ⁻²	Rm 1080 à 1370 daN.mm ⁻²	A 9 % mini	Résilience sur éprouvette normalisée : 33 J	Coefficient de Poisson : 0,25	Module de Young : 220 GPa
Propriétés physiques					
Densité : 7,87	Température de fusion: 1500 °C	Conductivité thermique : 80,4 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	Chaleur spécifique à pression constante : 444 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	Coefficient d'expansion linéaire : 12,1x10- 6 K ⁻¹	Résistivité électrique : 10,1 $\mu\Omega$.cm
Coefficient d'extinction : 4,5196					

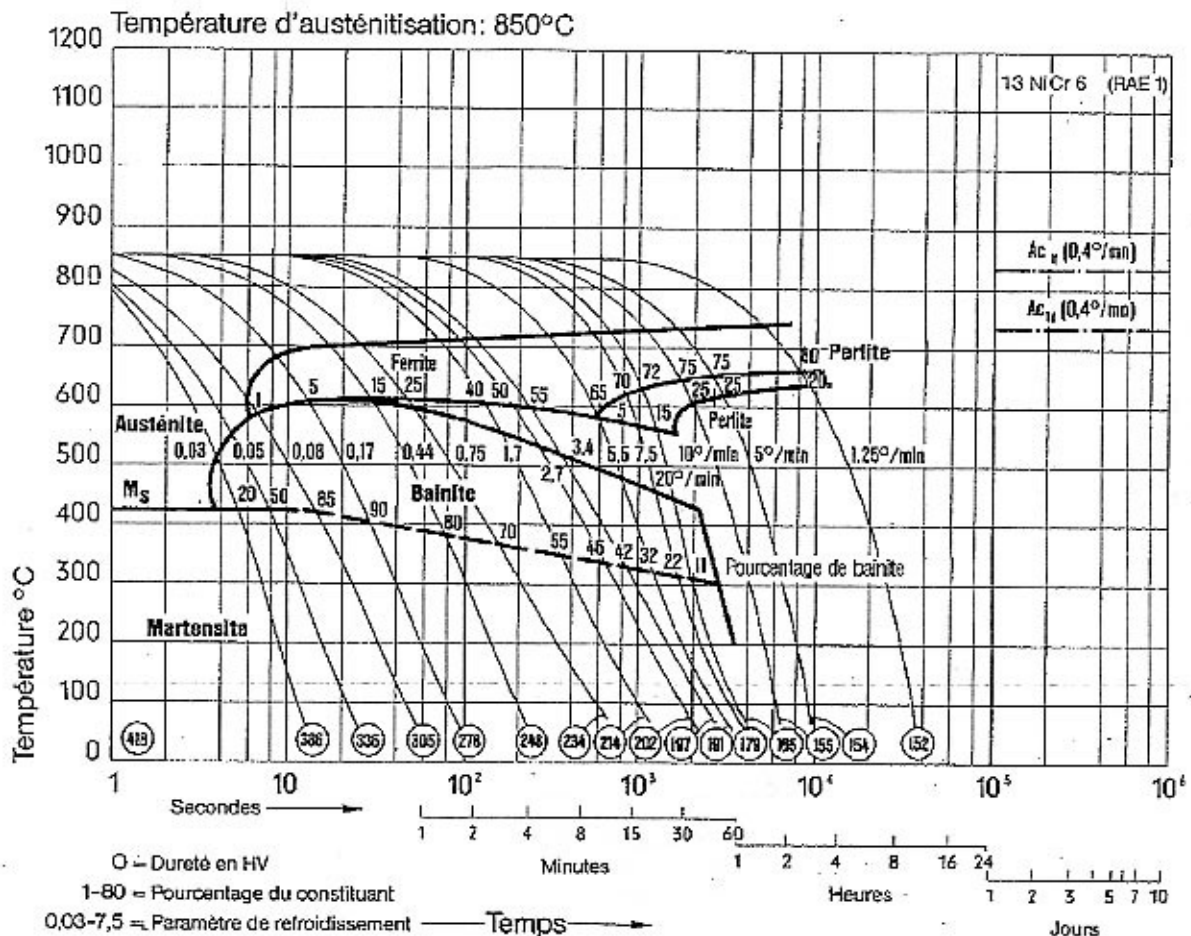


Figure 3. Diagramme TRC de l'acier 16 NC6.

Plusieurs points seront abordés dans cette étude : le procédé utilisé, la qualité de l'opération de soudage, la prédiction de certaines propriétés et la mise en place d'une technique de contrôle non destructif. Les questions suivantes développent ces différents points et vous guident pour formuler des éléments de réponse.

Le procédé (4 points)

Vous devez dans un premier temps spécifier le type de faisceau laser à utiliser pour effectuer cette opération. Il existe en effet trois familles distinctes de laser de forte puissance pouvant effectuer cette opération de soudage, mais émettant à différentes longueurs d'onde dans l'infrarouge :

- laser continu à gaz carbonique (CO₂) : $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$;
- laser continu solide (Nd:YAG) : $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$
- laser continu à diodes : $\lambda = 0,858 \mu\text{m}$

La géométrie de la tâche du laser, à la surface à souder, est circulaire (diamètre : 0,1 mm). La vitesse relative entre le faisceau et les pièces à assembler est de 1 m.min⁻¹.

- **Q1. (0,5 point)** Déterminez la réflectance de l'acier 16 NC 6 en sachant que l'opération de soudage s'effectue dans de l'air à pression atmosphérique et à température ambiante. Quelle(s) solution(s) pourrai(en)t être adopté(e)s afin d'augmenter l'absorption du rayonnement laser par le matériau ?
- **Q2. (0,5 point)** A quelle profondeur le rayonnement va-t-il être absorbé pour les différents laser considérés ? On rappelle que la profondeur d'absorption s'énonce : $\delta_{th} = \lambda / 4\pi n_2$.
- **Q3. (0,75 point)** Quelle sera la profondeur de pénétration thermique (profondeur dans laquelle le mécanisme de "thermalisation" survient) ? On rappelle que cette profondeur s'énonce : $D_{th} = 2(\chi \cdot t)^{1/2}$, où t représente la durée d'interaction de la matière avec le rayonnement laser.
- **Q4. (1,25 point)** La profondeur à souder est de 20 mm. Les lasers disponibles pour effectuer cette opération présentent des puissances maximales différentes (voir ci-après). Quel laser retenir pour conduire l'opération ? Pour ce faire, on simplifiera le problème en considérant la configuration monodimensionnelle et les phénomènes thermiques stationnaires. On rappelle de plus que l'équation de la chaleur s'écrit alors dans ce cas : $Q = -\lambda \Delta T/dx$, avec Q [W.m⁻²].

- laser continu à gaz carbonique (CO₂) : P = 5 kW
- laser continu solide (Nd:YAG) : P = 3 kW
- laser continu à diodes : P = 3 kW

La qualité de l'opération de soudage (10 points)

On souhaite à présent discuter de la qualité de l'opération de soudage et notamment prédire les caractéristiques métallurgiques de la zone soudée. La **Figure 4** explicite schématiquement la géométrie du cordon réalisé. La solidification de la matière fondue s'effectue par conduction (par "pompage thermique" des calories dans la masse froide de l'ensemble à assembler). Durant l'opération de soudage, l'évolution de la température suivant la ligne A est explicitée sur la **Figure 5**. La loi de refroidissement est quant à elle présentée sur la **Figure 6**.

- **Q5. (4 points)** En faisant l'hypothèse dans un premier temps d'un refroidissement lent et en supposant que les éléments d'alliage ne modifient que peu le diagramme Fe-C (**Figure 7**), calculer les fractions de ferrite et de perlite à température ambiante. Calculer de même les fractions de ferrite et de cémentite.
- **Q6. (6 points)** Analyser les structures et les propriétés de la ZAC du cordon (suivant la ligne A) en fonction des données mises à votre disposition (diagramme TRC notamment).

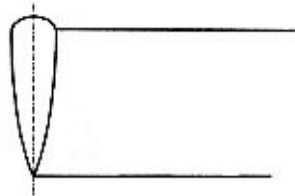


Figure 4. Géométrie schématique du cordon de soudure.

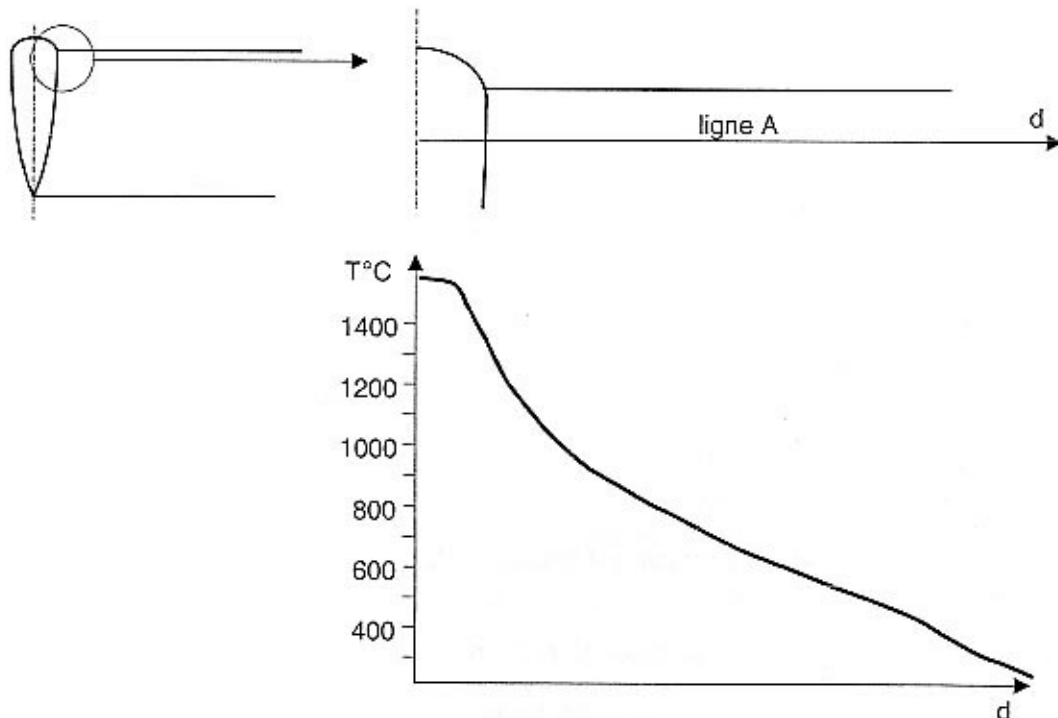


Figure 5. Evolution de la température durant l'opération de soudage.

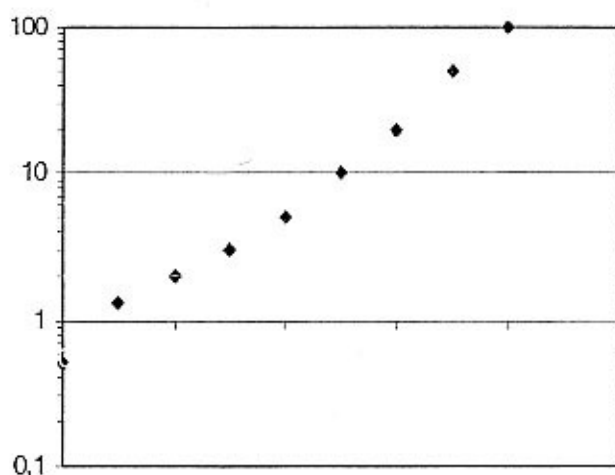


Figure 6. Ordonnée : durée de refroidissement entre 800 et 500 °C [s], abscisse : distance d .

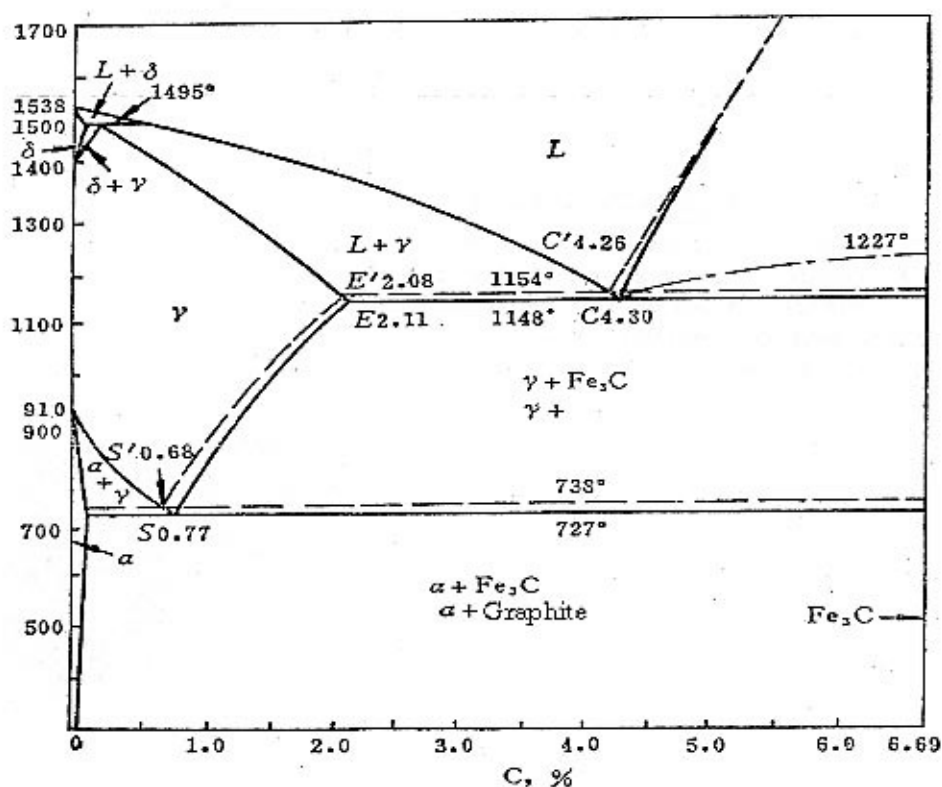


Figure 7. Diagramme Fe-C.

La prédiction de certaines propriétés du joint soudé (3 points)

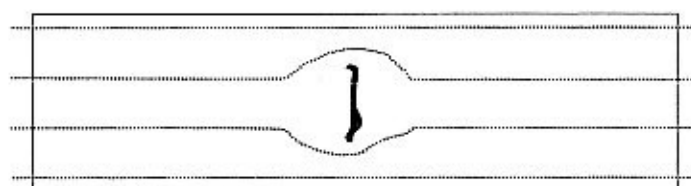
L'opération de soudage effectuée, il convient à présent de quantifier les caractéristiques du joint soudé.

- **Q7. (1,5 point)** Quelle(s) sollicitations mécaniques s'appliquent sur le joint soudé ? Les différentes configurations de fonctionnement du système seront étudiées (démarrage, fonctionnement suivant des vitesses variables dans le temps, etc.)
- **Q8. (1,5 point)** Quel(s) essais mécaniques préconisez-vous pour s'assurer de ces caractéristiques ? Le ou les essai(s) seront présentés et décrits, au besoin au moyen d'un et de plusieurs schéma(s).

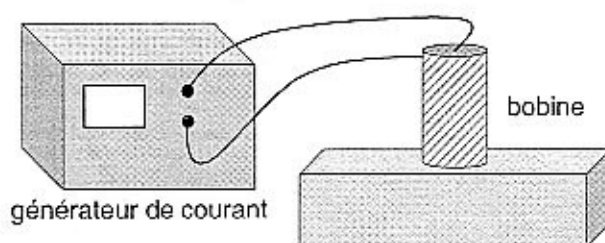
Le contrôle non destructif du joint soudé (3 points)

Afin de contrôler la qualité du joint soudé, deux méthodes de contrôle non destructif sont mises en œuvre :

- le contrôle "magnétique" (par courant de Foucault), applicable seulement à la détection de défauts débouchant en surface ou proche de la surface (**Figure 8**) ;
- le contrôle ultrasonore, basé sur la propagation et la réverbération des ondes sur les discontinuités pouvant apparaître au sein du joint (**Figure 9**).



déviation des lignes magnétiques par un défaut



générateur de courant

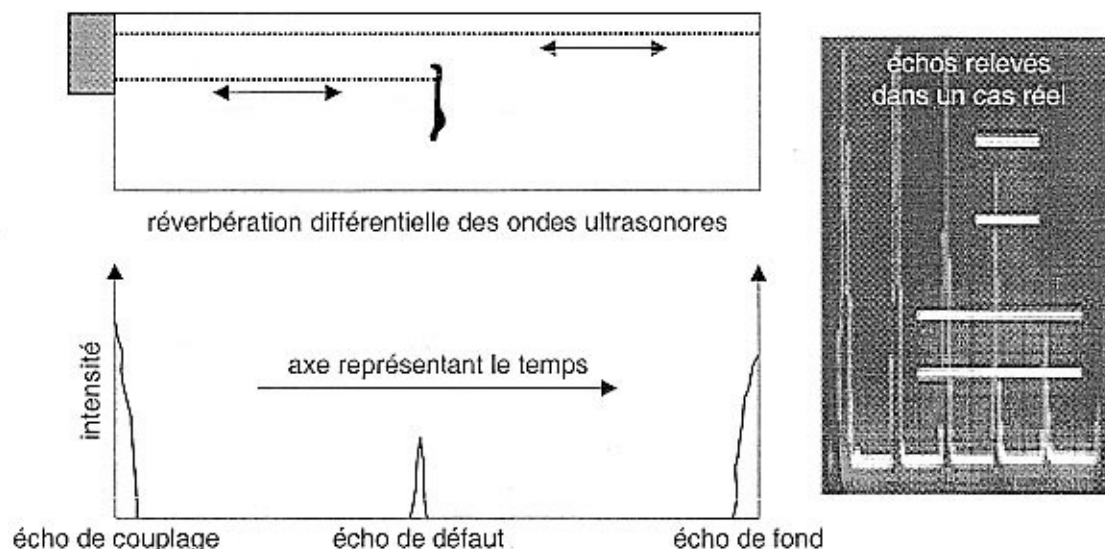
bobine

pièce à contrôler

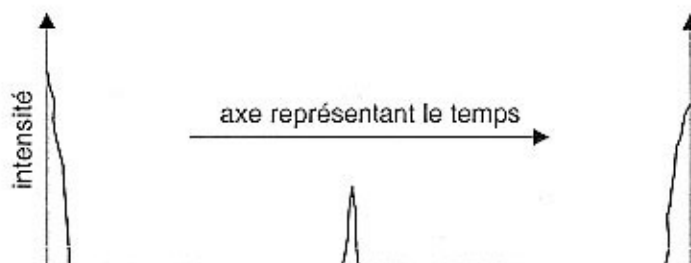
dispositif schématique de mesure

Figure 8. Principe schématique du contrôle "magnétique".

- **Q9 (1,5 point)** Quelles caractéristiques le matériau doit-il présenter pour permettre son contrôle par courant de Foucault ? Décrivez, à partir des indications fournies, le couplage géométrique entre la bobine et le joint à analyser (par un schéma de situation). Décrivez quelle(s) modification(s) des défauts dans le joint soudé induiront sur la boucle d'hystérésis du matériau.



réverbération différentielle des ondes ultrasonores



écho de couplage

écho de défaut

écho de fond

Figure 9. Principe schématique du contrôle par ultrasons.

La vitesse des ondes longitudinales ultrasonores dans le matériau sont données par :

$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-\gamma)}{\rho(1+\gamma)(1-2\gamma)}}$$

où γ représente le coefficient de Poisson, E le module de Young et ρ la densité du matériau.

- **Q10. (1,5 point)** Indiquer quelle(s) difficulté(s) il est possible de rencontrer en mettant en œuvre cette technique de mesure sur la pièce étudiée (difficultés d'ordre géométrique, métallurgique, etc.)
- **Q11 (1 point "bonus")** Suggérer une autre solution de contrôle non destructif du joint soudé basé sur les différences de propriétés du matériau au voisinage du cordon soudé.