

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

FR 9003546

CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES DE SACLAY

CEA-CONF --10084

Service de Documentation

F91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

M2

EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LA PROPAGATION A 20 DEG C DES  
FISSURES EN FATIGUE DANS UN JOINT HETEROGENE ACIER INOXYDABLE  
AUSTENITIQUE - ACIER FERRITIQUE

ZAHOUANE A.I.- GAUTHIER J.P.- PETREQUIN P.  
CEA Centre d'Études Nucleaires de Saclay, 91 - Gif-sur-Yvette (FR).  
Dept. de Technologie

Communication présentée à : Annual Meeting of the International Institute of Welding

Vienne (AT)  
4-8 Jul 1988

**EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES  
SUR LA PROPAGATION A 20°C DES FISSURES  
EN FATIGUE DANS UN JOINT HETEROGENE  
ACIER INOXYDABLE AUSTENITIQUE - ACIER FERRITIQUE**

**A.I. ZAHOUANE\* - J.P. GAUTHIER\* - P. PETREQUIN\***

**Résumé**

Les joints soudés hétérogènes entre aciers inoxydables austénitiques et aciers ferritiques sont des liaisons complexes qui sont souvent délicates à fabriquer et qui sont sollicitées en service de manière particulière du fait de la juxtaposition de matériaux de caractéristiques mécaniques et physiques différentes.

Les sollicitations auxquelles sont soumis certains composants des réacteurs nucléaires conduisent à évaluer la résistance à la fatigue de ces joints.

Dans cette étude on s'est intéressé plus particulièrement à l'effet des contraintes résiduelles sur la propagation des fissures en fatigue dans un joint soudé hétérogène.

A cet effet, nous avons réalisé des mesures de contraintes résiduelles sur le joint.

---

\* CEN SACLAY DMECN/DT/SRMA

Ces mesures ont été réalisées par la méthode du trou, qui fait appel au perçage d'un trou au centre d'une rosette de jauges de contrainte collées à la surface du matériau. Compte tenu du champ de contraintes non uniforme, dû en particulier à la différence entre les coefficients de dilatation des matériaux employés pour la réalisation du joint, on a utilisé une fonction dite de transmissibilité pour calculer le profil des contraintes résiduelles dans l'épaisseur d'une ébauche et d'une éprouvette type C.T. prélevées dans le joint.

L'ensemble des mesures réalisées sur le joint soudé hétérogène permet d'expliquer en partie les phénomènes rencontrés lors de la propagation des fissures par fatigue dans ce type de joint, notamment le ralentissement dans la propagation de ces fissures observé dans certains cas.

En effet, nous avons mis en évidence l'existence de fortes contraintes résiduelles de compression dans le métal de base ferritique au voisinage de l'interface acier ferritique/beurrage. Ce sont ces contraintes qui sont responsables du ralentissement observé dans la propagation des fissures de fatigue dans cette zone.

Cependant, les orientations de propagation des fissures considérées dans cette étude ne recouvrent pas tous les cas de propagations pratiques. Il convient en particulier d'étudier la propagation dans le liseré martensitique présent dans ce type de joint, compte tenu de son importance du point de vue des analyses de sûreté.

## **I - INTRODUCTION**

Généralement, c'est à cours d'opérations métallurgiques telles que la mise en forme, les traitements thermiques, les traitements de surface, le soudage, que les contraintes résiduelles ou internes, prennent naissance.

Les contraintes résiduelles de tension sont en général néfastes pour la tenue des matériaux, surtout lorsqu'elles sont associées à l'effet du milieu environnant, ou bien lorsque le matériau est soumis à des sollicitations cycliques.

Par contre les contraintes résiduelles de compression sont considérées généralement comme bénéfique pour la tenue du matériau.

On est même souvent amené à les créer pour améliorer la tenue des pièces.

Les contraintes résiduelles sont présentes en particulier dans les joints soudés hétérogènes reliant deux aciers de type différent. De tels

joints soudés sont assez fréquemment utilisés dans l'industrie nucléaire [1].

Il s'agit ici d'une liaison soudée entre un acier ferritique faiblement allié et un acier inoxydable austénitique.

Ces joints soudés présentent une structure complexe par suite de phénomènes de dilution et de diffusion et plusieurs problèmes liés à l'emploi de ces joints soudés peuvent résulter de la présence de différentes phases et constituants (liseré martensitique, zone décarburée, etc...) [2].

En raison de la différence entre les coefficients de dilatation thermique des constituants du joint, il est à craindre lors de la fabrication, qu'une température relativement modérée provoque un dépassement de la limite d'élasticité du matériau le plus faible et de ce fait induise des contraintes résiduelles de niveau élevé.

Ces joints soudés étant soumis à des sollicitations de fatigue en service, on voit l'importance que prend l'évaluation des contraintes résiduelles présentes dans ces joints, afin de déterminer quels en sont les effets, en particulier sur la propagation des fissures.

Plusieurs études ont été réalisées sur la fatigue des joints soudés hétérogènes en particulier sur les joints soudés hétérogènes, acier ferritique - acier inoxydable austénitique [3], [4], [5], [6], [7], [8]. La plupart de ces études mentionnent l'effet des contraintes résiduelles en fatigue mais très peu d'entre elles présentent des mesures de ces contraintes résiduelles.

Dans cette étude, on a réalisé des mesures de contraintes résiduelles présentes dans le joint soudé hétérogène considéré afin de pouvoir faire une analyse plus précise des résultats de propagation des fissures obtenus antérieurement [8].

## II - MESURES DES CONTRAINTES RESIDUELLES DANS LE JOINT SOUDE HETEROGENE

### II.1 - Méthode de mesures

Pour mesurer les contraintes résiduelles dans un matériau, plusieurs méthodes existent [9], [10], mais chacune de ces techniques a ses avantages et ses limites. Cependant, à la différence des autres méthodes, celle par perçage d'un trou au centre d'une rosette de jauges de contrainte, permet d'obtenir le profil des contraintes résiduelles dans l'épaisseur. Dans le cas d'un champ de contraintes uniforme, le calcul des contraintes se fait à partir des déformations asymptotiques captées par les différentes jauges de la rosette (voir fig. 1) [11].

Dans le cas d'un champ de contraintes non uniforme, un calcul identique au précédent conduit à des résultats non significatifs. C'est pourquoi nous utilisons une fonction dite de transmissibilité [12].

La fonction de transmissibilité  $K(X)$  est définie dans le cas d'un champ de contraintes uniforme :

$$K(X) = \frac{\varepsilon(X)}{\varepsilon(1,2)} \quad \text{avec} \quad X = \frac{P}{D} = \frac{\text{Profondeur de perçage}}{\text{Diamètre du trou}}$$

$\varepsilon(X)$  désigne la déformation mesurée en surface lorsque le trou atteint la profondeur  $P = XD$ .

$\varepsilon(1,2)$  désigne la valeur asymptotique de la déformation lorsque  $P = 1,2 D$ .

Par dérivation de la fonction  $K(X)$ , on obtient :

$$\Delta\varepsilon(X, \Delta X) = \frac{dK(X)}{d(X)} \Delta X \cdot \varepsilon(1,2)$$

Dans le cas d'un champ de contraintes résiduelles non uniforme, pour une courbe déformation-profondeur, on peut déterminer la tangente pour toute valeur de  $X$  :  $\Delta\varepsilon(X, \Delta X)/\Delta X$ . Connaissant  $dK(X)/dX$  pour la même valeur de  $X$ , on détermine  $\varepsilon'(X)$  :

$$\varepsilon'(X) = \Delta\varepsilon(X, \Delta X) \cdot \frac{dX}{dK(X)} \cdot \frac{1}{\Delta X}$$

A partir des trois valeurs  $\varepsilon'(X)$  relatives aux trois jauges de la rosette (données par la formule précédente), la fonction  $K(X)$  du matériau ayant été préalablement déterminée, on calcule les valeurs de  $\sigma_L(X)$ ,  $\sigma_T(X)$ ,  $\theta(X)$ , comme s'il s'agissait d'un champ de contraintes uniforme (calculs donnés en [11]).

Cela consiste à faire l'hypothèse que les  $\Delta\varepsilon(X, \Delta X)$  ainsi mesurés sont les mêmes que ceux que l'on obtiendrait si la contrainte était constante dans toute l'épaisseur du matériau et égale à  $\sigma(X)$ .

Pour appliquer cette méthode, plusieurs hypothèses sont formulées concernant la fonction  $K(X)$ , en particulier :

- $K(X)$  est considérée comme indépendante de l'orientation des jauges par rapport à l'orientation des contraintes résiduelles,
- $K(X)$  est indépendante de l'intensité des contraintes résiduelles.

Des essais ont été réalisés pour s'assurer de la validité et de la reproductibilité de cette méthode de mesure de contraintes résiduelles. Pour simuler un champ de contraintes uniforme, nous avons appliqué à des éprouvettes en acier une déformation par traction dans le domaine élastique du matériau. Pour simuler un champ de contraintes non uniforme, nous avons appliqué à des barreaux une déformation par flexion. On a pu vérifier que l'utilisation de la fonction de transmissibilité permet d'obtenir des résultats satisfaisants.

Toutefois, des essais complémentaires de validation sont nécessaires, visant à simuler des gradients de contraintes résiduelles plus importants, mis en évidence dans les joints hétérogènes considérés. En effet, malgré la petite taille des rosettes utilisées, l'existence d'un gradient de contraintes résiduelles élevé peut conduire à une incertitude non négligeable sur la valeur de la plus petite contrainte résiduelle principale déduite des mesures

## **II.2 - Mesure des contraintes résiduelles dans le joint soudé hétérogène**

### **II.2.1 - Réalisation du joint**

Le joint soudé hétérogène d'épaisseur 70 mm est réalisé entre une tôle en acier A533B et une tôle en acier inoxydable 316 L. Le beurrage est réalisé manuellement à l'électrode enrobée de nuance 20 Cr, 10 Ni (308 L) en deux séquences :

- la première avec préchauffage à une température minimale de 125 °C,
- la deuxième sans préchauffage.

Un traitement de détensionnement après la première séquence a été effectué, consistant en une montée de la température à une vitesse maximale de 55°C par heure, suivi d'un maintien de 3 heures à 600°C, puis un refroidissement à une vitesse maximale de 55°C par heure jusqu'à 315°C et enfin un refroidissement à l'air calme. Le soudage a été réalisé sur une latte d'acier inoxydable par le procédé automatique sous flux solide avec un fil de nuance 20 Cr, 10 Ni (de type 308 L).

Un traitement de détensionnement final à 610°C avec un maintien de 75 heures a été effectué.

Les tableaux I, II, III et IV fournissent les compositions chimiques des différents constituants du joint ainsi que leurs caractéristiques de traction et de résilience à 20°C.

#### **II.2.2 - Echantillons utilisés**

Les mesures des contraintes résiduelles sont effectuées sur une ébauche 125 mm/137 mm, de 20 mm d'épaisseur et sur une éprouvette de type C.T. 120 mm/125 mm, de 20 mm d'épaisseur. Les mesures ont été effectuées sur l'éprouvette de type C.T. en vue d'étudier la redistribution des contraintes résiduelles au cours de la propagation des fissures. Les mesures sur l'ébauche ont pour fonction d'examiner quelle est l'influence de l'usinage de l'entaille sur la redistribution des contraintes résiduelles dans l'éprouvette.

Le prélèvement de ces échantillons dans le joint est montré sur les figures 2 et 3.

#### **II.2.3 - Réalisation des mesures**

La pièce à percer est fixée dans une cuve pouvant se déplacer suivant deux axes horizontaux. La cuve est remplie de pétrole dont le rôle est d'assurer une bonne homogénéisation de la température. L'électrode est fixée sur une tête d'usinage asservie et rotative, permettant un déplacement vertical dans l'épaisseur du matériau. Une pompe permet la circulation du pétrole à travers l'électrode tubulaire (fig. 4). La technique de collage des jauges, de préparation de surface ainsi que le procédé pratique de perçage du trou sont explicites dans la référence [13].

### II.2.3.1. Mesures effectuées sur l'ébauche

Les trous ont été réalisés aux points indiqués sur la figure 5.

. Mesures réalisées aux points E, F, G, H, I, J, K, L : détermination du profil des contraintes résiduelles, près de la surface, à travers les constituants du joint.

Les trous ont été percés avec une électrode en cuivre de diamètre 1,42 mm, les rosettes utilisées sont du type EA - 06-062 RE - 120 ( $R = 2,6$  mm,  $l = 2$  mm, cf. fig. 1). A partir de ces mesures, nous avons représenté, pour une profondeur donnée, les profils des contraintes longitudinales et transversales en se déplaçant de l'acier ferritique vers l'acier austénitique (fig. 6). (La contrainte longitudinale est la contrainte principale sensiblement parallèle au dépôt et la contrainte transversale celle sensiblement perpendiculaire au dépôt).

Ces mesures mettent en évidence l'existence d'une contrainte résiduelle longitudinale de compression d'intensité élevée, à environ 7 mm du métal déposé.

. Mesures réalisées aux points A, Q, B, P

Elles ont été réalisées afin de faire une comparaison entre les profils des contraintes déterminés à une distance identique de la soudure, mais dans deux endroits différents dans l'acier ferritique, A et Q étant à 4 mm de la soudure et B et P étant à 7 mm (voir fig. 7a et 7b).

Ces mesures montrent une certaine dispersion des résultats. Ceci est dû probablement à la manière pratique avec laquelle est réalisée la soudure (caractère discontinu) ainsi qu'au régime thermique non parfaitement identique le long du cordon. L'accord entre les mesures en A et Q (à 4 mm de la soudure) est assez bon. L'accord n'est pas très bon pour les mesures en B et P (à 7 mm de la soudure). Il est à noter que c'est à cette distance qu'on observe en moyenne (sur l'ébauche) la variation la plus rapide de la contrainte résiduelle longitudinale.

. Mesures réalisées aux points N, M et O

Ces mesures ont été effectuées pour décrire le profil de contraintes en profondeur. Le diamètre du trou est de  $D = 9,94$  mm, des rosettes permettant le perçage des trous de telle dimension n'existent pas, c'est pourquoi



nous avons collé des jauges classiques à 0, 90 et 225 degrés suivant la disposition de la rosette ( $R = 10$  mm,  $l = 2$  mm, cf. fig. 1). Les figures 8a, 8b et 8c montrent les profils des contraintes obtenus.

Les valeurs obtenues sont en bon accord avec les résultats précédents ; la variation des contraintes avec la profondeur est toutefois assez complexe et son analyse nécessite des mesures supplémentaires.

#### II.2.3.2. Mesures effectuées sur l'éprouvette du type C.T.

La position des trous percés est indiquée sur la figure 9.

. Mesures réalisées aux points A, B, C, D, E, F : détermination du profil à travers tous les constituants.

A partir de ces différentes mesures, nous avons représenté, pour une profondeur donnée, les profils des contraintes longitudinales et transversales en se déplaçant dans les différents constituants du joint (voir fig. 10).

Le profil est comparable à celui obtenu sur l'ébauche avec un décalage vers le métal déposé.

. Mesures réalisées aux points I, J, K

Dans le but de déterminer l'influence de l'entaille sur la mesure, nous avons percé un trou à 4 mm de l'entaille (point I). Les mesures faites aux points J et K permettent la comparaison avec la mesure précédente puisque les trois mesures sont effectuées à 12 mm de la soudure (fig. 11).

On observe que les profils sont très voisins, ce qui indique que des mesures assez près de l'entaille donnent des valeurs convenables des contraintes résiduelles. Ceci pourrait avoir un intérêt pour étudier notamment la redistribution des contraintes résiduelles au cours de la propagation.

### **III - ETUDE DE LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE DANS LE JOINT SOUDE HETEROGENE**

Les résultats détaillés relatifs à ces essais sont présentés dans la référence [8].

Nous présentons ici les résultats principaux.

#### **III.1 - Conditions expérimentales**

Les éprouvettes utilisées pour cette étude sont du type C.T. 50-20 ( $W = 100$  mm, épaisseur  $B = 20$  mm) (fig. 12). Leur orientation a été choisie pour étudier la propagation à travers tous les constituants du joint (fig. 13). Les essais sont effectués à température ambiante, sur des machines électrohydrauliques, en contrôle de charge, à la fréquence de 20 Hz avec un rapport  $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$  voisin de 0,1. Les longueurs de fissures sont déterminées par deux méthodes : la méthode de la compliance et une méthode optique utilisant deux lunettes visant chacune un côté de l'éprouvette.

#### **III.2 - Résultats des mesures de vitesses de propagation des fissures dans le joint hétérogène**

##### **III.2.1 - Problèmes d'amorçage**

On a constaté un phénomène de retard dans l'amorçage des fissures particulièrement pour les éprouvettes dont l'entaille est située dans l'acier ferritique perpendiculairement au métal déposé (propagation vers le métal déposé).

Simultanément, on a mis en évidence une fermeture importante des fissures, en examinant de façon qualitative une discontinuité dans l'enregistrement de la variation de l'ouverture en fonction de la charge. Les valeurs de la longueur de fissure fournies par la méthode de la compliance sont alors erronées si l'on ne tient pas compte de cette fermeture.

Les mesures de longueur de fissures ont été faites alors par le procédé optique (moyenne sur les deux faces).

Ce problème d'amorçage est illustré sur la figure 14. Cette figure montre qu'il est nécessaire d'amorcer et de propager la fissure à des niveaux de  $\Delta K$  élevés pendant le temps où celle-ci se propage dans l'acier ferritique. Ensuite, il est possible de diminuer le chargement de l'éprouvette pour faire l'essai proprement dit et on constate alors une fermeture bien moins élevée de la fissure, la propagation se fait dans le métal déposé.

### **III.2 - Résultats des mesures de propagation des fissures**

Les résultats obtenus pour les différents cas de propagation étudiés sont présentés sur la figure 15.

Cette figure montre que l'on obtient des vitesses de propagation plus faibles (surtout aux valeurs faibles de  $\Delta K$ ) pour les éprouvettes prélevées dans le joint hétérogène, que pour les éprouvettes prélevées dans des matériaux proches des matériaux constituant le joint (métaux de base, métal déposé). Ceci est surtout vrai pour le cas de propagation de l'acier ferritique vers l'acier de base inoxydable austénitique, à travers le métal déposé.

## **IV - ANALYSE DES RESULTATS**

### **IV.1 - Analyse des mesures des contraintes résiduelles dans le joint soudé hétérogène**

Pour décrire le profil de contraintes résiduelles à travers les différents constituants du joint, il a fallu réaliser des trous voisins les uns des autres, tout en se déplaçant suivant une direction perpendiculaire au sens du dépôt. C'est pourquoi des petites rosettes ont été utilisées, la distance minimale entre deux trous successifs étant de 7 mm. Dans ce cas, le diamètre du trou que l'on peut percer ne dépasse pas 1,42 mm et par conséquent la profondeur d'investigation ne dépasse pas 1,3 mm [11].

Cependant (paragraphe II.2), des essais ont été effectués avec des perçages de trous de diamètre plus élevé, permettant de se rapprocher de la mi-épaisseur des échantillons. Il y a un bon accord entre les résultats obtenus avec ces diamètres de perçage différents, cependant des essais complémentaires sont nécessaires pour préciser l'évolution des contraintes résiduelles en fonction de l'épaisseur.

On observe que dans la plupart des cas, l'angle  $\theta$ , qui existe entre la contrainte transversale et l'axe des X, varie en moyenne entre 0 et 20 degrés (voir tableau V).

Les raisons pour lesquelles l'angle conserve en général le même signe, est sans doute à mettre en relation avec le sens de déplacement de l'électrode lors de la réalisation du dépôt.

Concernant l'ensemble des résultats obtenus sur l'ébauche et sur l'éprouvette de type C.T., nous constatons que près de l'interface acier ferritique-beurrage, du côté ferritique, la contrainte longitudinale est de compression et de niveau élevés (fig. 6 et 10). Des mesures réalisées dans l'acier ferritique en des endroits différents, mais à la même distance de l'interface ferritique-beurrage, montrent pour les distances de 4 mm ou 7 mm un assez bon accord entre deux mesures malgré une certaine dispersion des valeurs (fig. 7). Lorsque cette distance est de 12 mm, l'accord semble être meilleur (fig. 11), cette dernière figure montre aussi qu'il semble qu'il n'y a pas d'influence de la position de la jauge par rapport à l'entaille pour la distance minimum considérée puisque on obtient à peu près les mêmes profils dans les trois positions.

Les mesures effectuées dans le métal de base inoxydable montrent que le niveau des contraintes résiduelles dans cette partie du joint est modéré.

#### **IV.2 - Analyse des résultats de mesures de vitesse de propagation**

Les résultats de propagation des fissures par fatigue dans le joint soudé hétérogène de cette étude et plusieurs autres résultats obtenus sur des joints soudés [14,15,16,17,18,19] montrent que l'observation de ralentissements dans la propagation des fissures peut être associée à la présence de contraintes résiduelles de compression. Un exemple de ce ralentissement

dans la propagation des fissures de fatigue dans le joint hétérogène utilisé pour la présente étude a été présenté dans le paragraphe III.

On remarque que le plus fort ralentissement a été obtenu sur une éprouvette C.T. dont le plan de propagation est perpendiculaire à la direction du dépôt et dont l'entaille est située dans le métal ferritique à environ 7 mm du métal déposé. Or, nos résultats montrent que c'est dans cette région que l'on mesure les contraintes résiduelles de compression les plus élevées, la contrainte principale de compression la plus élevée étant la contrainte longitudinale, sensiblement parallèle à la direction du dépôt. C'est donc celle-ci qui est active (mode I) pour l'orientation de l'éprouvette de type C.T. considérée. Nos résultats permettent donc d'expliquer le phénomène observé.

On observe également un retard dans la propagation des fissures dans le métal déposé, mais plus faible que dans l'acier ferritique. Cette fois, il s'agit d'une éprouvette C.T. dont le plan de propagation est dans le métal déposé et parallèle à la direction du dépôt. Or, nos résultats indiquent que dans le métal déposé la contrainte résiduelle dite transversale est sensiblement de compression alors que la contrainte longitudinale est soit de compression mais de valeur absolue plus faible soit de tension. Dans ce cas, c'est la contrainte résiduelle transversale qui est active (mode I) ce qui permet là aussi d'expliquer le phénomène observé.

## V - CONCLUSION

Au cours de cette étude consacrée, d'une part, à la mesure des contraintes résiduelles par la méthode du trou, et d'autre part, à l'influence de ces contraintes sur la propagation des fissures par fatigue dans les joints soudés hétérogènes, nous avons pu obtenir les résultats suivants :

1. Il y a présence de fortes contraintes résiduelles de compression, dans l'acier ferritique près de l'interface acier ferritique-beurrage.

2. Ces contraintes sont situées à environ 90 degré par rapport à un axe perpendiculaire au sens du dépôt, d'où l'importance de leur influence

dans la propagation de fissures situées dans des plans perpendiculaires au dépôt (effet de retard et de ralentissement).

3. Dans le métal déposé, les contraintes résiduelles transversales sont responsables du ralentissement plus modéré de la propagation des fissures de fatigue situées dans des plans parallèles au sens du dépôt.

Cette étude appelle des développements futurs dans les domaines suivants :

. Elaboration d'un modèle quantitatif pour la propagation des fissures à 20°C et à chaud, prenant en compte l'existence des contraintes résiduelles et la fermeture des fissures déterminées expérimentalement. Il est à noter que peu de résultats existent dans ce domaine [14].

. Réalisation d'essais de mesures de vitesse de fissuration à 20°C et à chaud sur des éprouvettes de dimensions plus importantes se rapprochant des dimensions réelles. Ceci nécessite l'adaptation de la méthode utilisée ou la mise en oeuvre d'autres méthodes permettant la détermination des contraintes résiduelles dans l'épaisseur de ces éprouvettes et dans celle du joint lui-même.

Il est à noter que les orientations de propagation des fissures, choisies dans cette étude, ne recouvrent pas tous les cas de propagation pratiques. En particulier, la propagation dans le liseré martensitique présent dans ce type de joint revêt un intérêt du point de vue des analyses de sûreté, bien qu'une étude antérieure [7] ait montré qu'en l'absence de défauts, celle-ci ne constituait pas un point de faiblesse du point de vue de l'amorçage des fissures de fatigue dans le domaine oligocyclique. Cependant, ces résultats avaient été obtenus sur des éprouvettes prélevées dans le joint et non sur le joint entier.

#### REMERCIEMENTS

Ce travail a été suivi et financé par l'Institut de protection et de sûreté nucléaire du CEA (DAS/STAS/SAM).

Nous remercions en particulier M. NEDELEC pour ses suggestions.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] A.A. TAVASSOLI et A. LECLOU  
Migration du carbone et évolution structurale de liaisons hétérogènes soudées entre acier "ferritique" 2.25 Cr et 9,5 Cr-Mo-Nb-V.  
Journal of Nuclear Materials 96 (1981) 329-340.
- [2] R. CASTRO et J.L. DE CADENET  
Métallurgie du soudage des aciers inoxydables et résistant à chaud.  
DUNOD - Paris 1968.
- [3] C.R. BRINKMAN, J.P. STRIZAK and J.F. KING  
Elevated temperature fatigue characterization of transition joint weld metal and heat affected zone in support of breeder steam generator development.  
"Fatigue testing of weldments". ASTM STP 648, p. 218, 1978.
- [4] C. AMZALLAG, J.L. BERNARD, E. BOLLINGER  
Amorçage et propagation de fissures de fatigue dans des joints d'assemblages hétérogènes en acier inoxydable et faiblement allié.  
II W Document XIII, 887-78.
- [5] C. AMZALLAG, J.L. BERNARD, P. RABBE, G. SLAMA  
Fatigue behaviour of welded joints between dissimilar metals (austenitic stainless steels and low alloy steels).  
IC F5, 1981, vol. 5, p. 2071.
- [6] C. MAILLARD-SALIN  
Comportement en fatigue de soudures hétérogènes  
RE 1120 IRSID
- [7] J.P. GAUTHIER, P. PETREQUIN  
Etude de l'amorçage des fissures en fatigue oligocyclique dans des joints soudés hétérogènes.  
Journées de Printemps de la Société Française de Métallurgie  
PARIS, 4 et 5 juin 1985.

- [8] J.P. GAUTHIER, P. PETREQUIN  
Etude de l'amorçage et de la propagation des fissures dans des joints soudés hétérogènes  
IIW - Document XIII - 1170 - 85  
Document présenté à l'assemblée annuelle de l'Institut International de la Soudure - STRASBOURG - 2 ou 6 septembre 1985.
- [9] C.O. RUUD  
Nondestructive and semidestructive methods for residual stress measurement  
ASTM STP 776.
- [10] L. MORDFIN  
Standards for residual stress measurement.  
ASTM STP 776.
- [11] Standard method for determining residual stresses by the hole-drilling strain gage method.  
ASTME - 837 - 81, 1981
- [12] R.A. KESLSEY  
Measuring non-uniform residual stresses by the hole drilling method.  
Proc. SESA, 14 (1), p. 181-194.
- [13] J. AVRIL  
Encyclopedic Vichay d'analyse des contraintes, 1974.
- [14] K. SHIBATATA, K. KAWAMURA  
Recherches sur la propagation des fissures de fatigue dans les soudures de l'acier SUS 304 (traduit du japonais).  
JAERI - M 92 - 049 - Mai 1982.
- [15] J. BRAID, J.F. KNOTT  
Fatigue crack propagation in the vicinity of weld deposits in high strength structural steel, ICF5, 1981.
- [16] R.J. BUCCI  
Effect of residual stress on fatigue crack growth rate measurement.  
Fracture mechanics ASTM 743, 1981.



- [17] B.M. KAPADIA  
Influence of residual stresses on fatigue crack propagation in  
electroslag welds. Fatigue testing of weldments, ASTM STP 648.
- [18] S.J. MADDOX  
Influence of tensile residual stresses on the fatigue behavior of  
welded joints in steel. ASTM STP-776.
- [19] L. ALBERTIN and E.E. EFFLER  
Effect of residual stress from welding on the fatigue strength of  
notched 347 Austenitic Stainless Steel, ASTM STP 648

C	S'	P	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	N	B	Cu
0,020	0,017	0,026	0,42	1,84	13,43	16,46	2,17	-	-	-

% Pds

ACIER Z2 CND 17.13 (316 L) TÔLE ép: 70 mm  
 Coulée E 1449 - Taux de ferrite : < 1%  
 Taille de grain AFNOR : 2 -

TABLEAU I

C	S	P	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Co	V
0,180	0,008	0,007	0,20	1,54	0,63	<0,05	0,47	0,03	<0,02	<0,05

% Pds

ACIER A 533 B cl.1 - TÔLE ép: 120 mm

TABLEAU II

Matériau	C	Mn	Si	S'	P	Ni	Cr	Mo	Cu	N	O	B
Beurrage	0,0277	1,24	1,00	0,005	-	9,5	18,7	0,05	<0,03	0,076	0,081	<0,001
Soudure	0,0273	1,46	0,45	0,009	-	9,9	19,4	0,5	0,035	0,048	0,052	<0,001

% Pds

MÉTAL DÉPOSÉ : 308 L

Taux de ferrite { Beurrage : 3%  
 Soudure : 4%

TABLEAU III

ANALYSES CHIMIQUES DES MATÉRIAUX CONSTITUTIFS DU  
 JOINT HÉTÉROGÈNE.

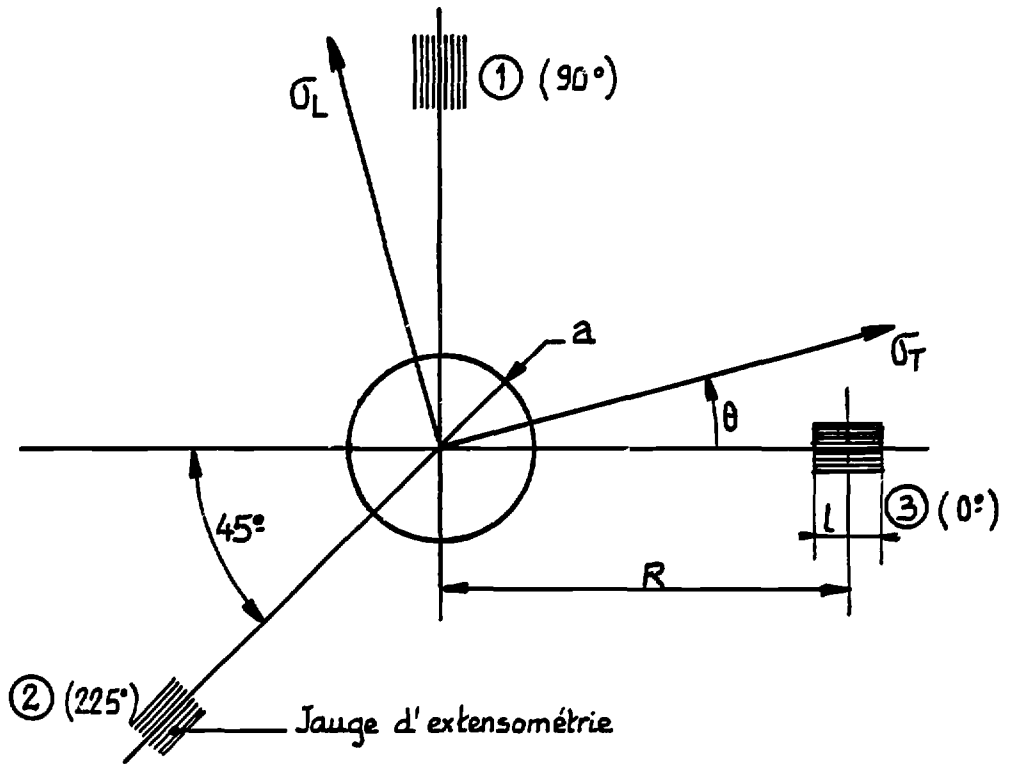
Matériau	Sens de prélèvement par rapport au joint		Lg utile (mm)	Re 0,002 (MPa)	Re 0,01 (MPa)	Rm (MPa)	A réparti (%)	A total (%)	Z (%)	KCV (daJ/cm <sup>2</sup> )
	relatif à la tôle									
Acier Z2CND17.13 (316L)	Long	Travers	30	269	298	530	56	66	76	21,7 - 21,0
				260	288	530	56	66	75	16,9 - 21,0
Acier A533BcL1	Long	Travers	30	467	463	601	13	24	65	16,1
				465	467	609	15	27	67	
Beurrage (308 L manuel)	Long	-	30	383	411	616	40	45	62	
				383	405	605	36	44	65	
Soudure (308 L automatique)	Long	-	30	362	404	594	25	30	59	
				340	375	564	25	34	62	
Acier Z2CND17.13 (316L)	Travers	Long	30	216	251	519	58	64	76	
				223	254	528	56	67	78	
Acier A533BcL1	Travers	Long	30	472	472	612	13	27	71	22,4
				466	467	607	13	28	71	
Beurrage (308 L manuel)	Travers	-	15	388	421	592	27	45	54	7,2 - 8,0
				377	411	581	28	50	63	8,9 - 9,4
Soudure (308 L automatique)	Travers	-	15	368	400	568	32	33	56	12,0 - 12,5
				369	403	552	32	34	55	12,5 - 14,1 14,0

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES À 20°C D'ÉPROUVETTES PRÉLEVÉES  
DANS UN JOINT HÉTÉROGÈNE.

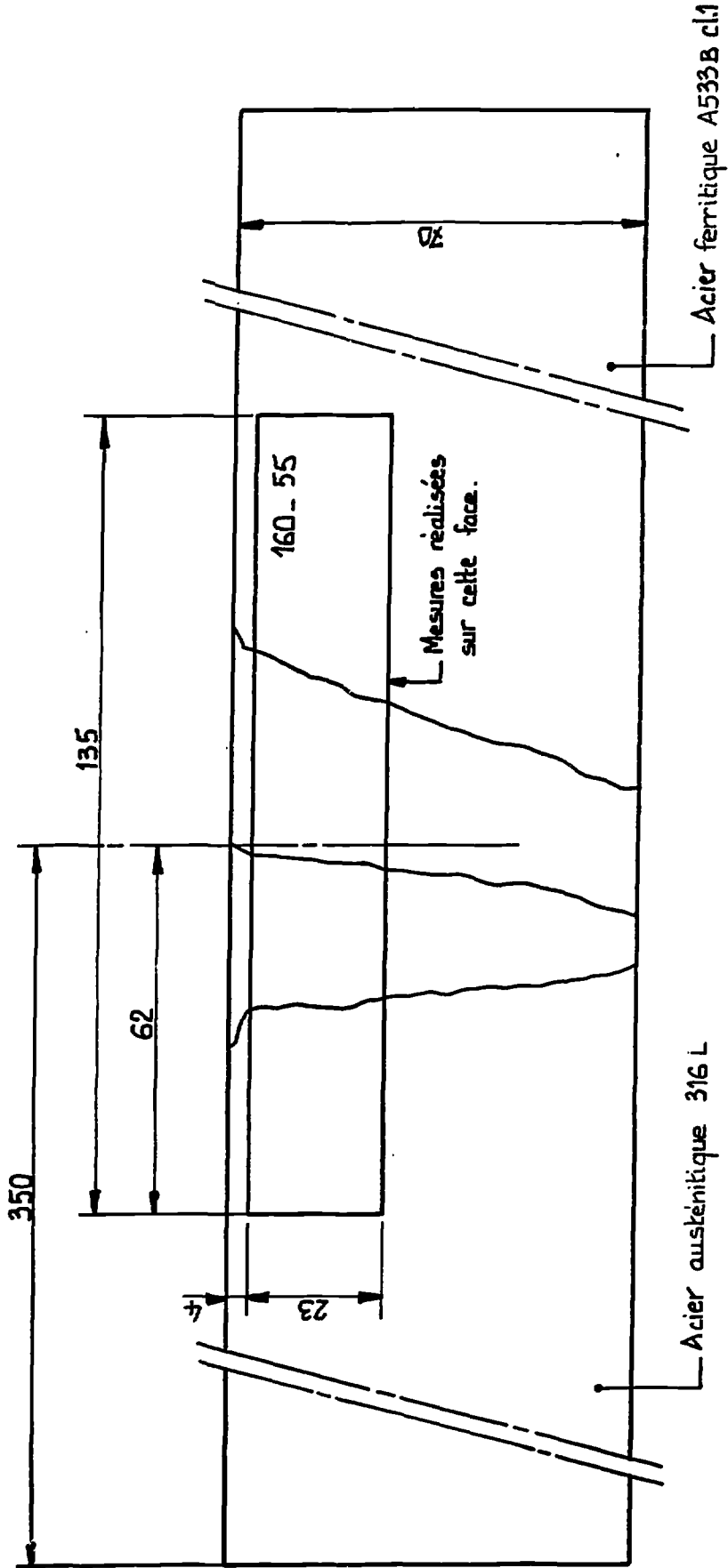
$\Delta X = 0,1$	Profondeur (mm)	$\Delta \epsilon_l (X, \Delta X)$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\frac{dK(X)}{dX}$	$\epsilon_l (X)$	$\sigma_L (X)$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	$\sigma_T (X)$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	$\theta (X)$ degré
0 - 0,1	0,142	$\epsilon(0^\circ)$ 6 $\epsilon(90^\circ)$ 44 $\epsilon(225^\circ) = 36$	2,326	26 189 254	- 308	- 164	15,03
0,1 - 0,2	0,284	- 10 16 10	1,736	- 58 92 58	- 103	27	14,15
0,2 - 0,3	0,426	- 12 20 12	1,340	- 90 149 90	- 167	36	13,28
0,3 - 0,4	0,568	- 10 20 7	1,061	- 94 189 67	- 212	5	3,79
0,4 - 0,5	0,710	- 10 20 12	0,855	117 234 140	- 275	19	12,51
0,5 - 0,6	0,852	- 9 19 12	0,696	- 129 272 172	- 329	13	13,28
0,6 - 0,7	0,994	- 12 20 6	0,570	- 211 350 105	- 369	61	3,56

RÉSULTATS DE CALCULS DES CONTRAINTES À PARTIR DES MESURES DES DÉFORMATIONS -  
MESURES RÉALISÉES SUR L'ÉBAUCHE AU POINT B ( $\bar{x}$ mm)

Lo

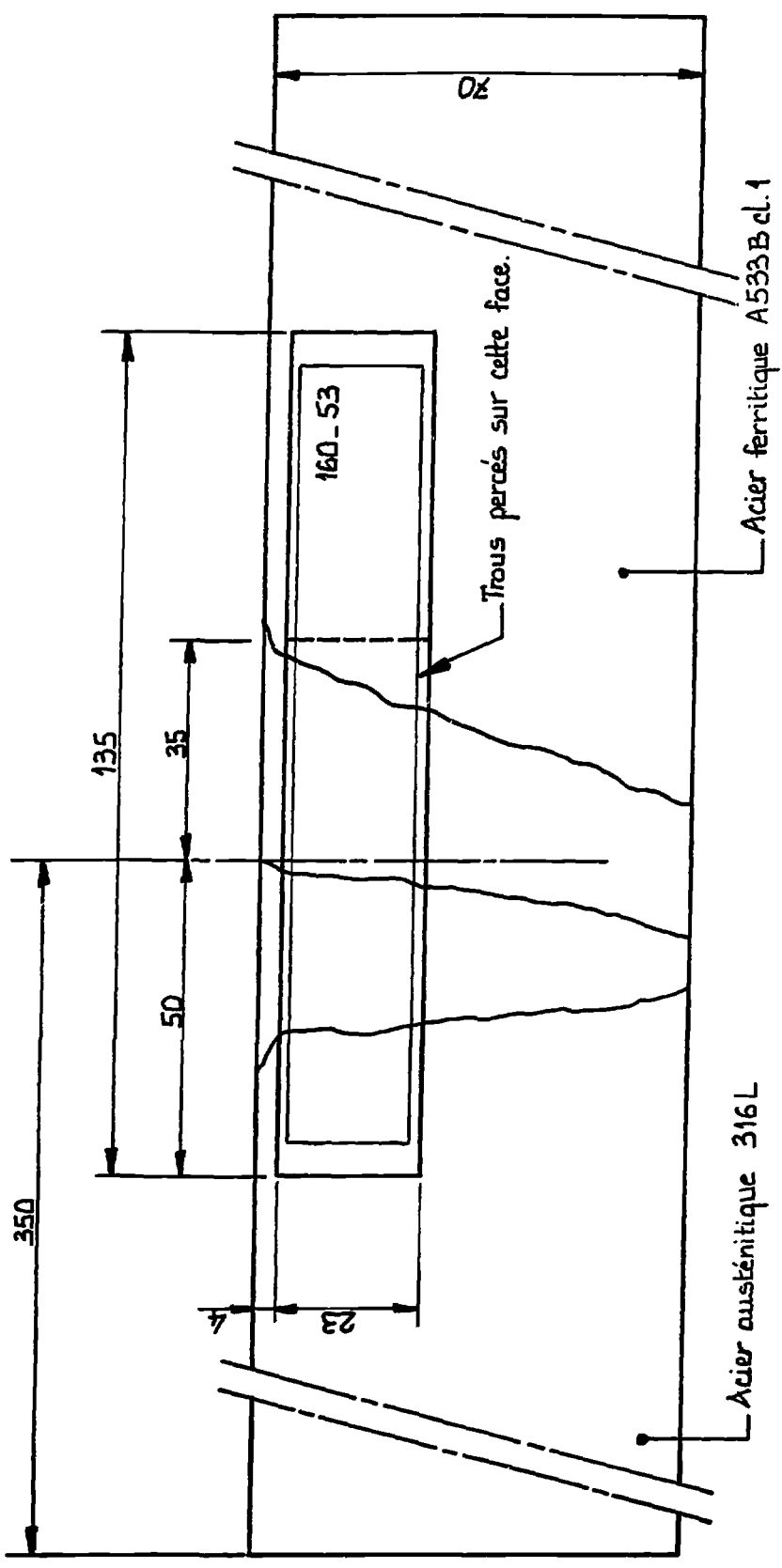


SCHEMA MONTRANT LA DISPOSITION DES JAUGES DE LA ROSETTE.



POSITION DE L'ÉBAUCHE DANS LE JOINT SOUDÉ -

FIG. 2.



Echelle 1

POSITION DE L'ÉPROUVETTE CT DANS LE JOINT SOUDÉ

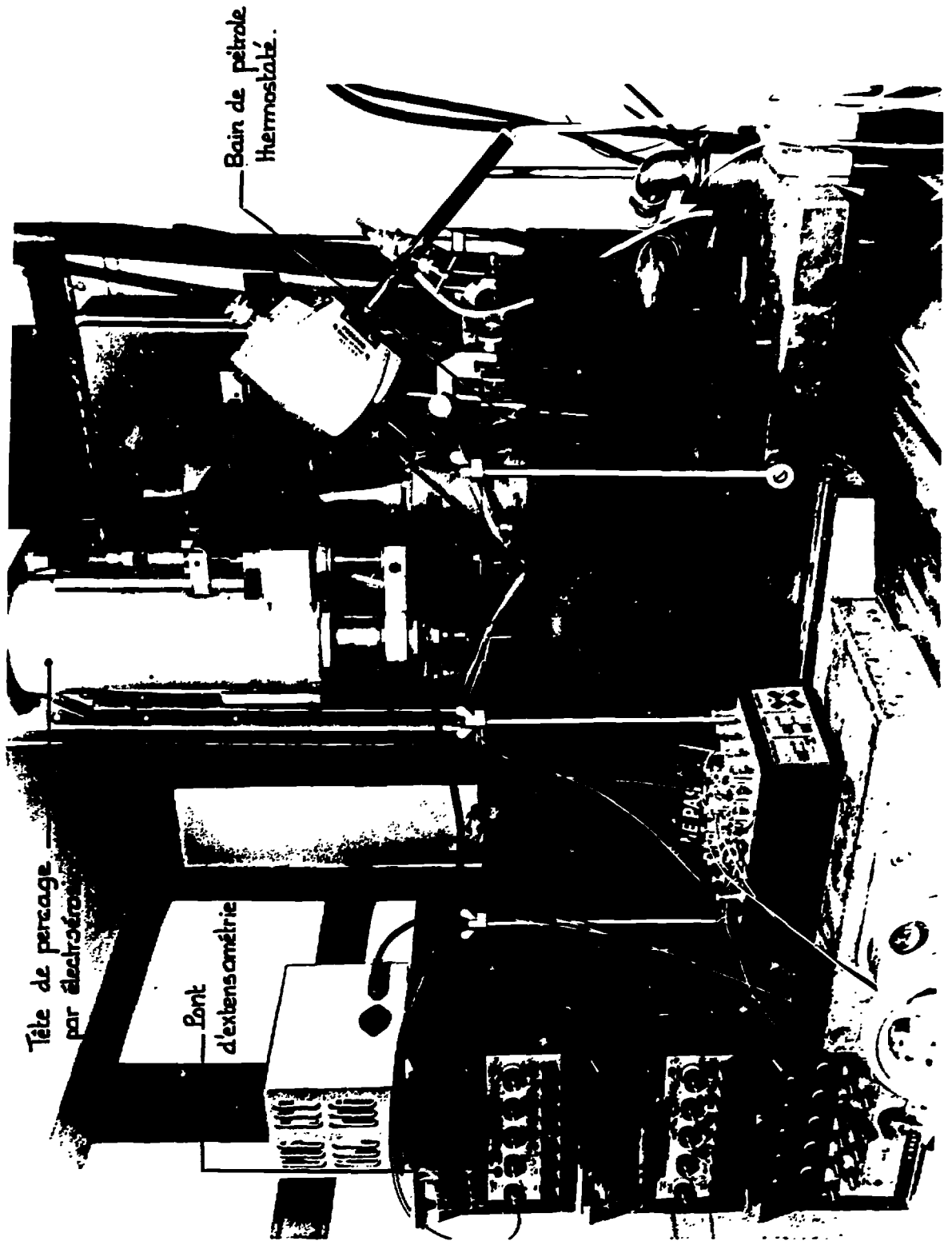
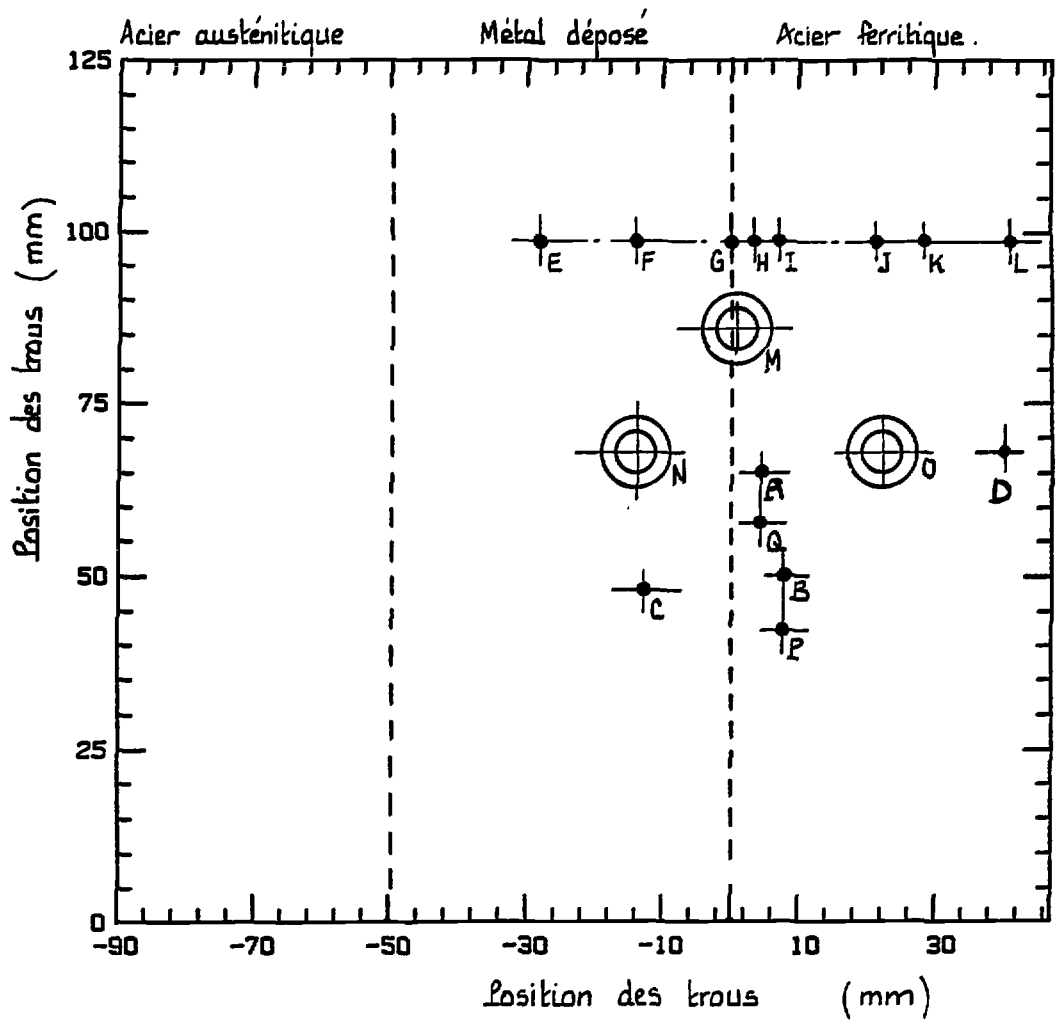
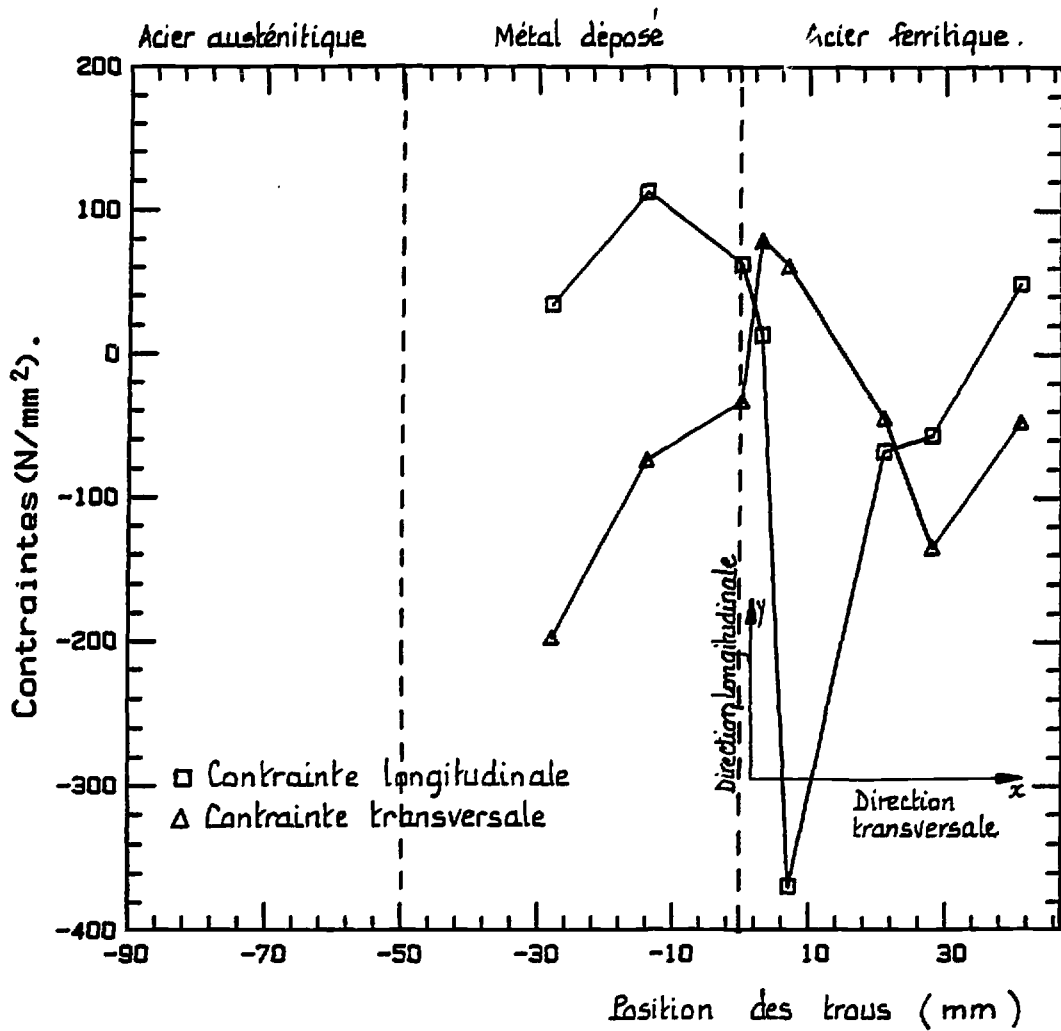


FIG. 4 . ENSEMBLE DE MESURES DE CONTRAINTES RÉSIDUELLES .

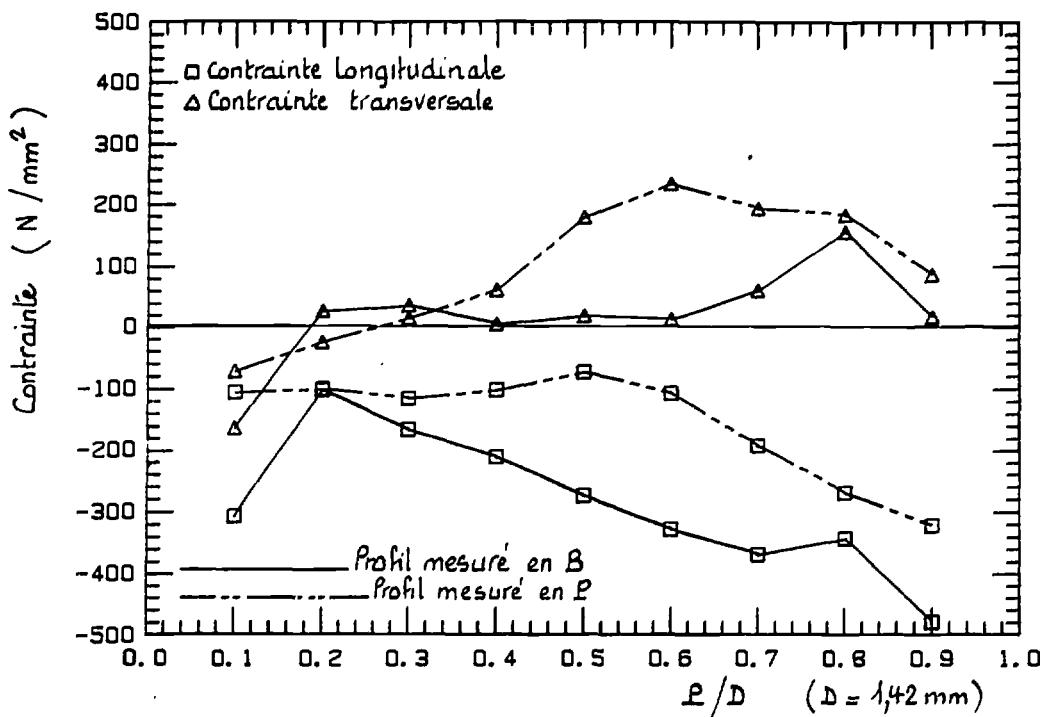




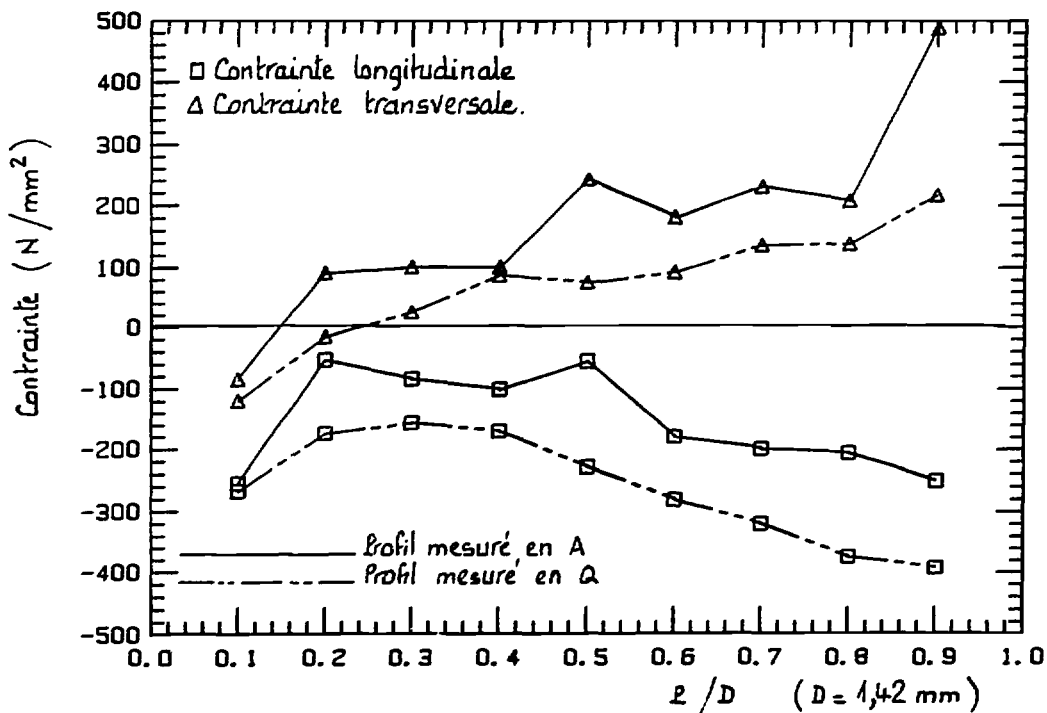
POSITION DES TROUS À LA SURFACE DE L'ÉBAUCHE.



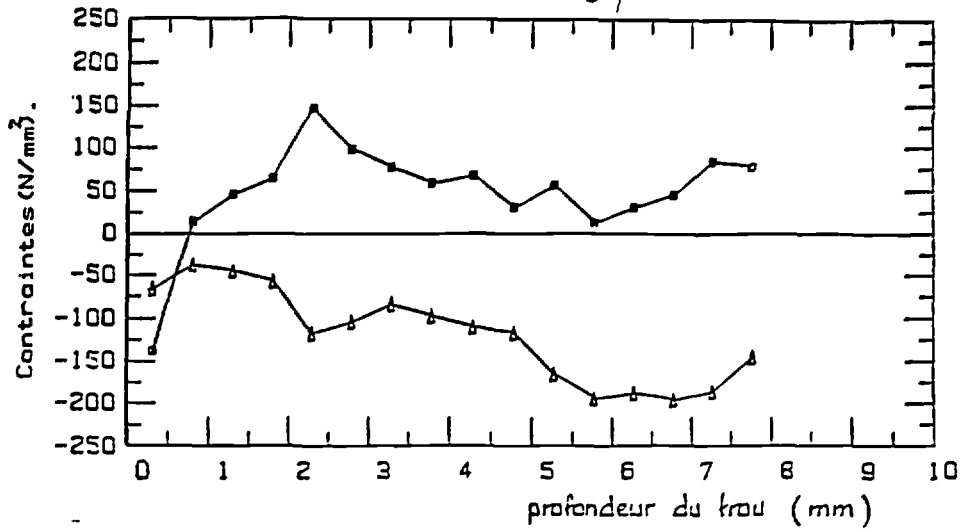
PROFILS DE CONTRAINTES MESURÉES SUR L'ÉBAUCHE À  
UNE PROFONDEUR  $p = 0,994$  mm ( $D = 1,42$  mm)



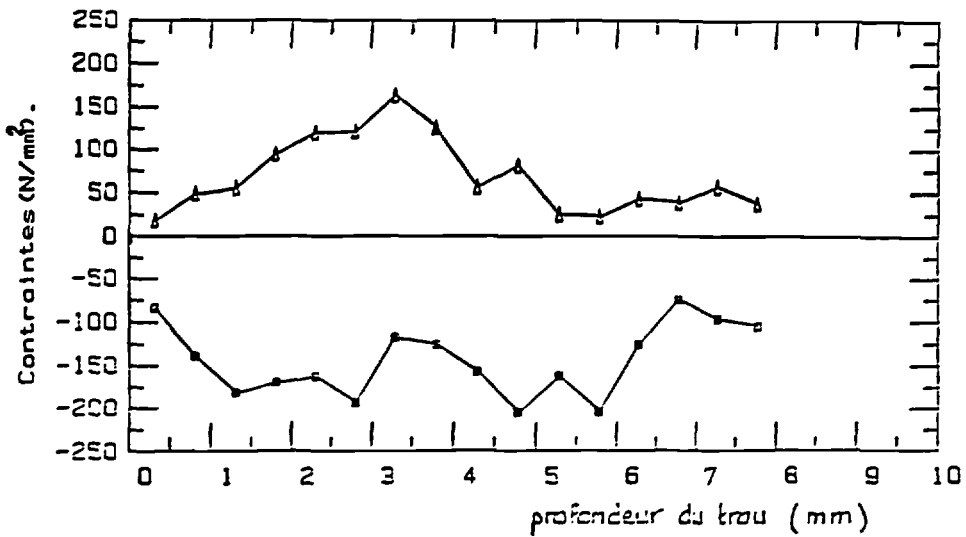
(a) COMPARAISON ENTRE LES PROFILS DE CONTRAINTES MESURÉES SUR L'ÉBAUCHE DANS DEUX ENDROITS DIFFÉRENTS À 7mm DU MÉTAL DÉPOSÉ.



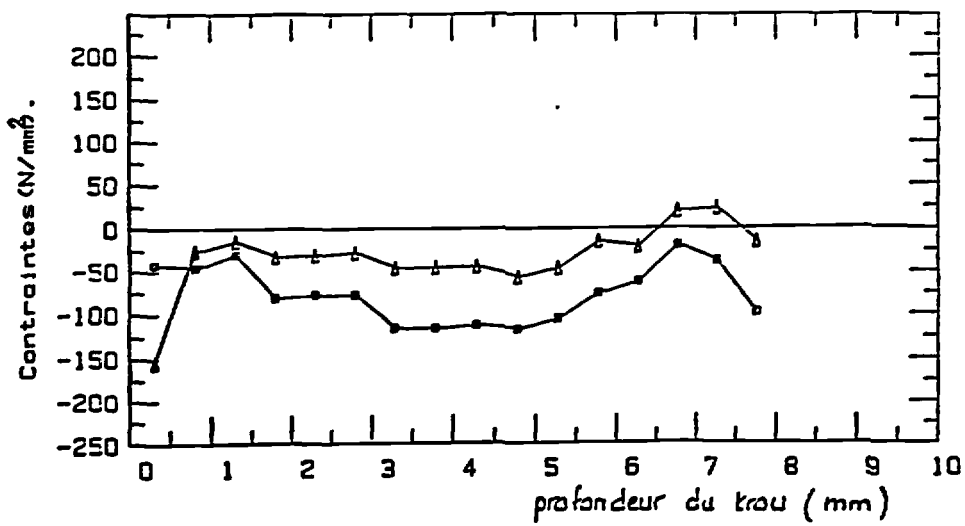
(b) COMPARAISON ENTRE LES PROFILS DE CONTRAINTES MESURÉES SUR L'ÉBAUCHE DANS DEUX ENDROITS DIFFÉRENTS À 4mm DU MÉTAL DÉPOSÉ.



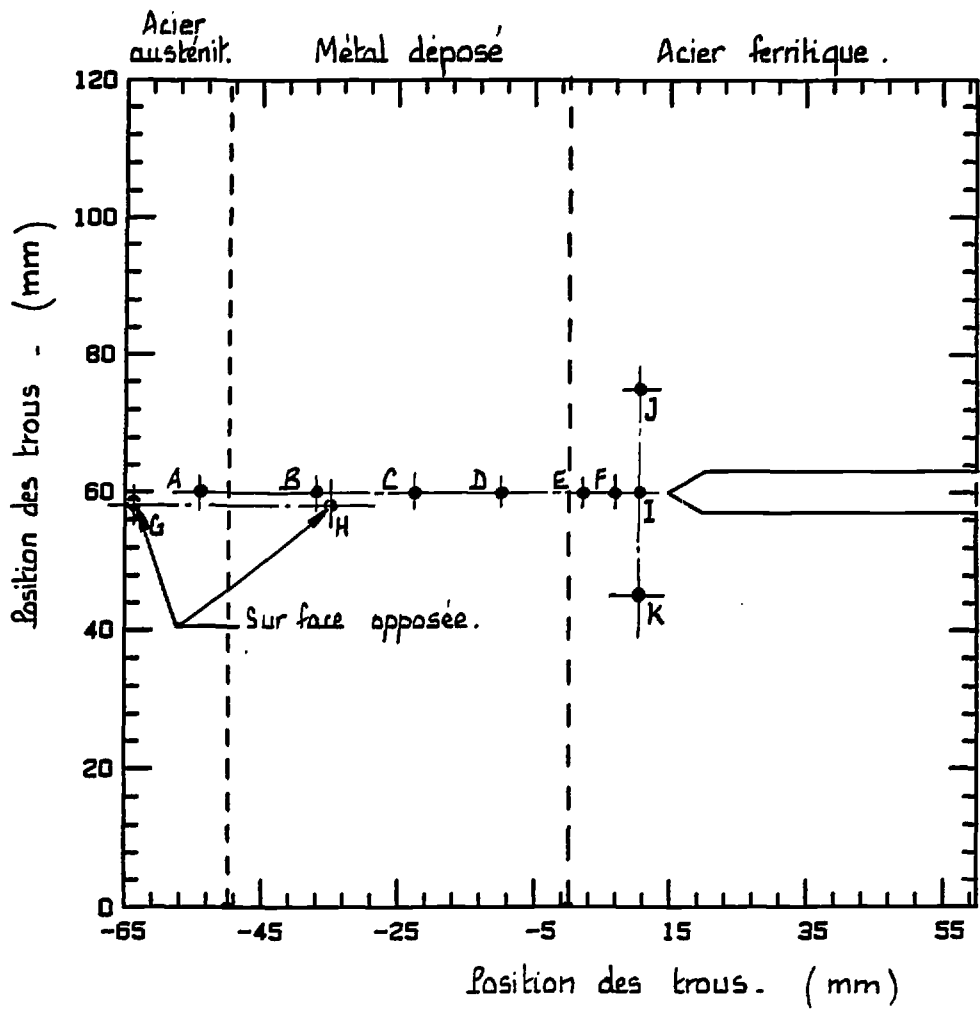
(a) SOUDEURE - PROFILS DE CONTRAINTES MESURÉES AU POINT N (D=9,94 mm)



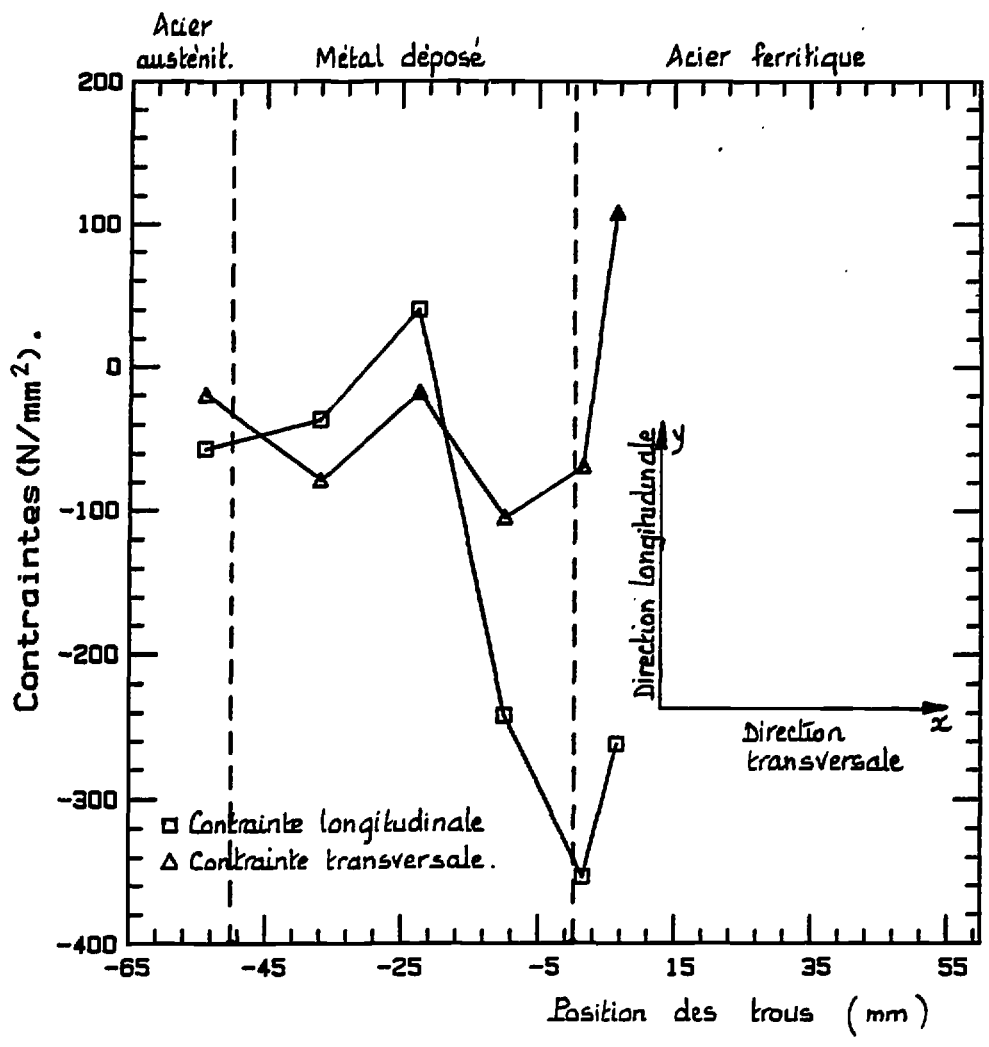
(b) INTERFACE - PROFILS DE CONTRAINTES MESURÉES AU POINT M. (D=9,94 mm)



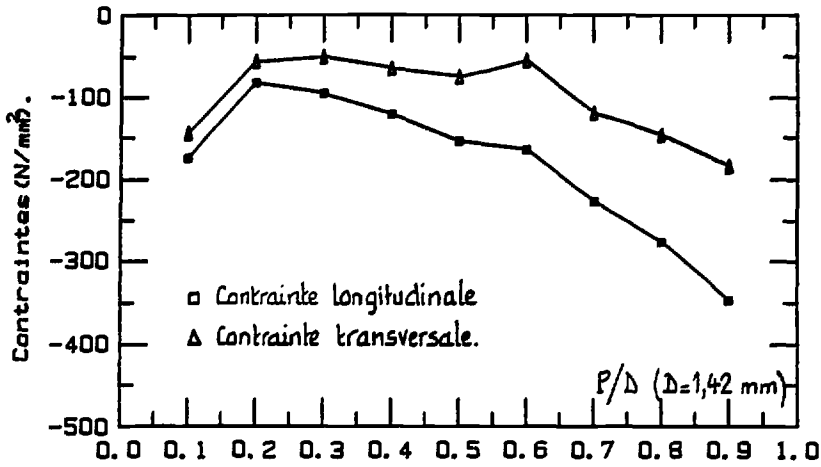
(c) AC FERRITIQUE - PROFILS DE CONTRAINTES MESURÉES AU POINT O (D=9,94 mm)



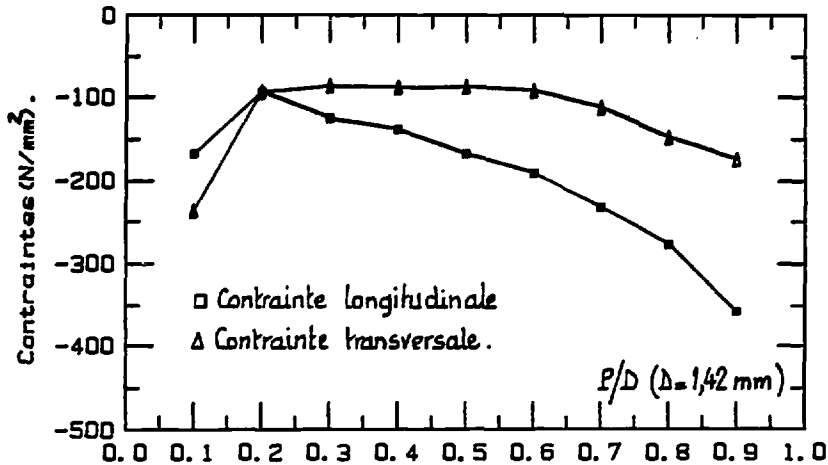
POSITION DES TROUS À LA SURFACE DE L'ÉPROUVETTE ET POUR MESURES DE CONTRAINTES RÉSIDUELLES.



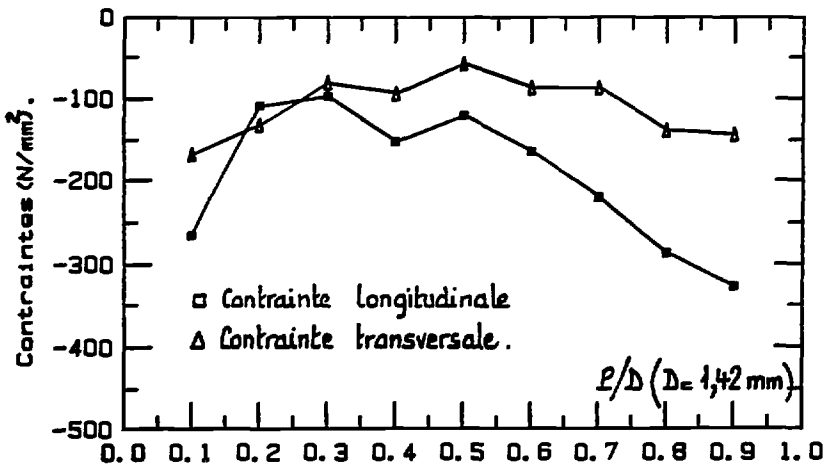
PROFILS DE CONTRAINTES MESURÉES SUR L'EPROUVETTE CT  
À UNE PROFONDEUR  $p = 0,994 \text{ mm}$  ( $D = 1,42 \text{ mm}$ )



PROFILS DE CONTRAINTES MESURÉES SUR L'ÉPROUVETTE CT AU P<sup>I</sup> I (à 4mm de l'entaille)



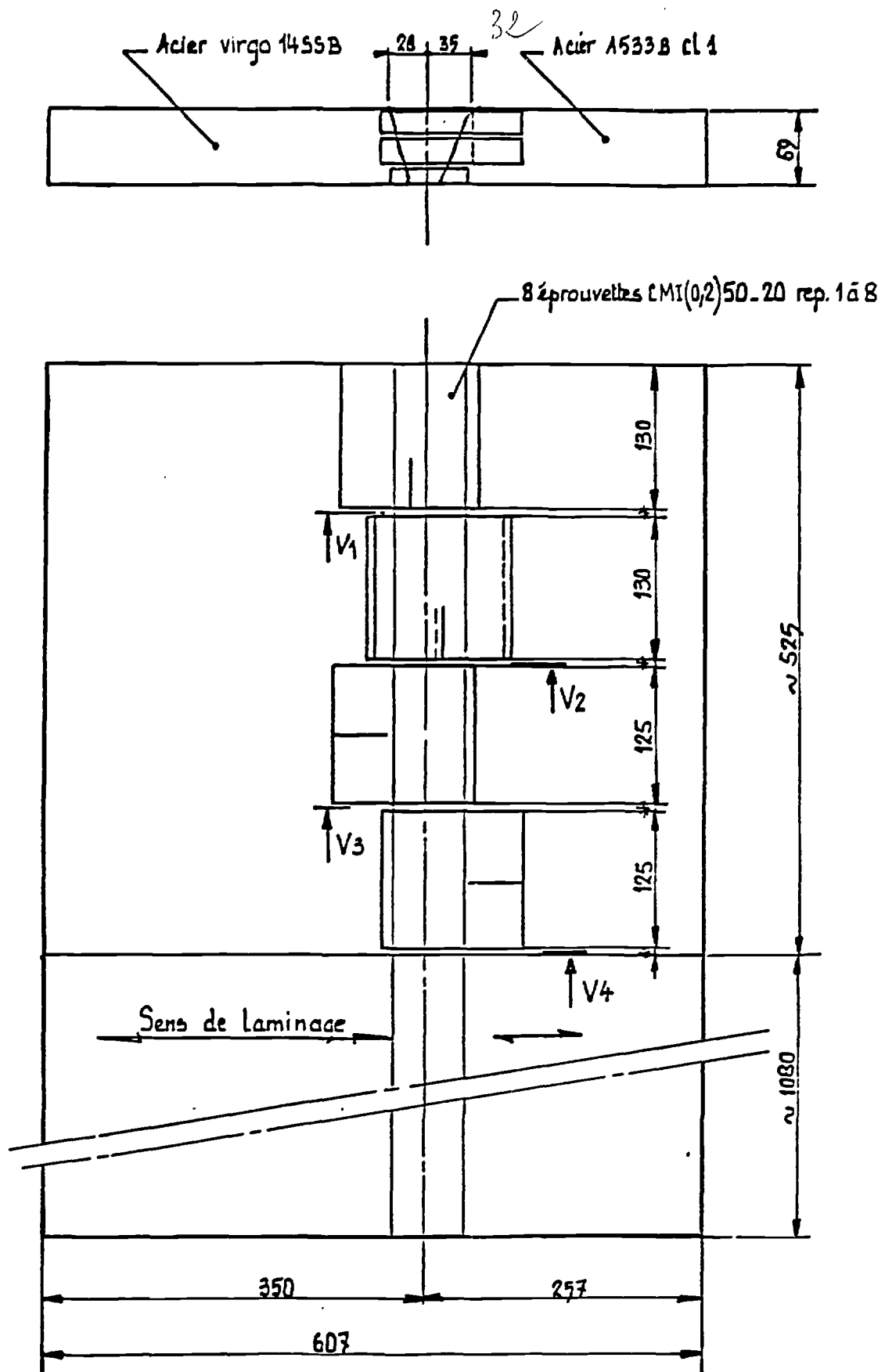
PROFILS DE CONTRAINTES MESURÉES SUR L'ÉPROUVETTE CT AU P<sup>I</sup> J



PROFILS DE CONTRAINTES MESURÉES SUR L'ÉPROUVETTE CT AU P<sup>I</sup> K

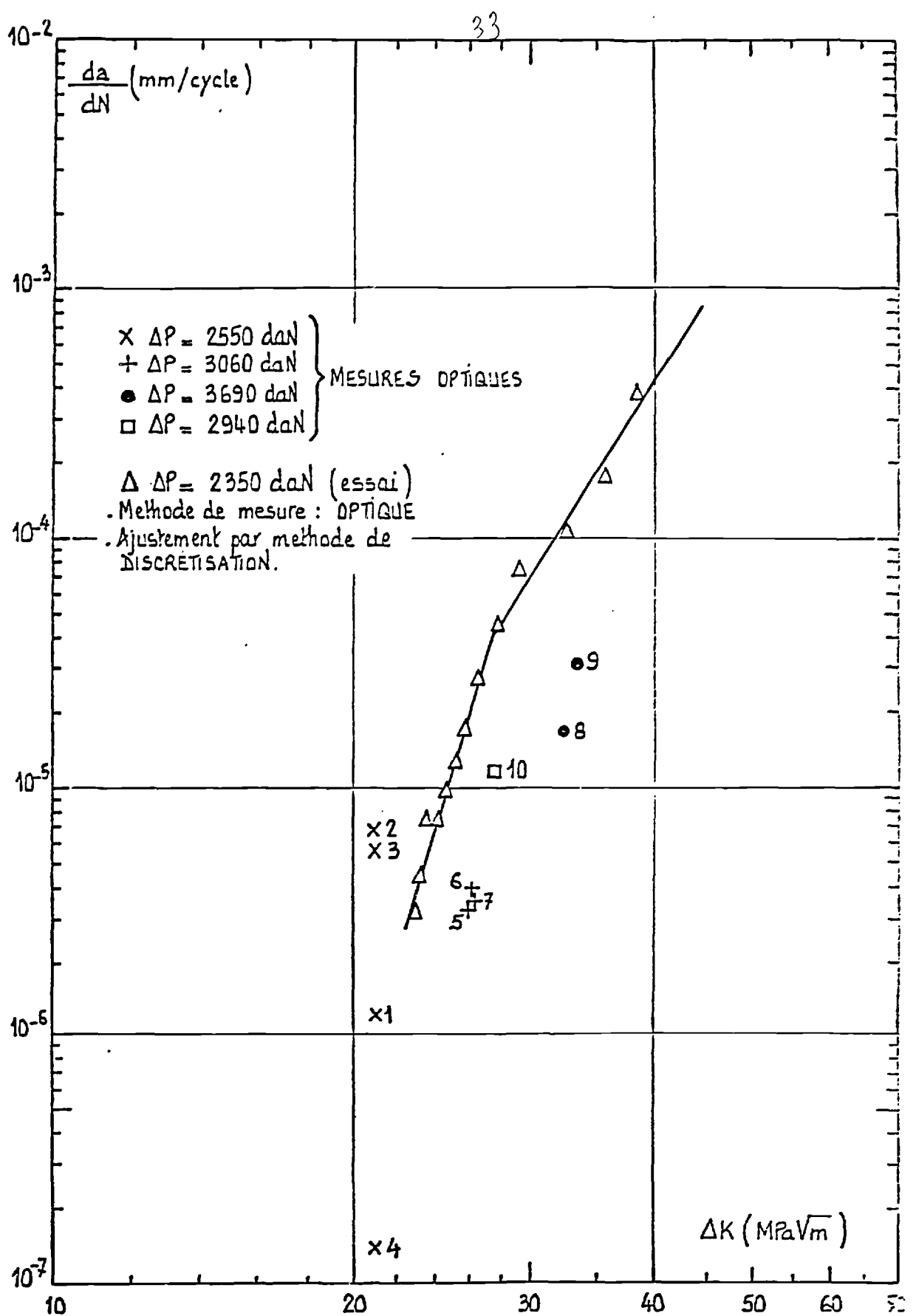




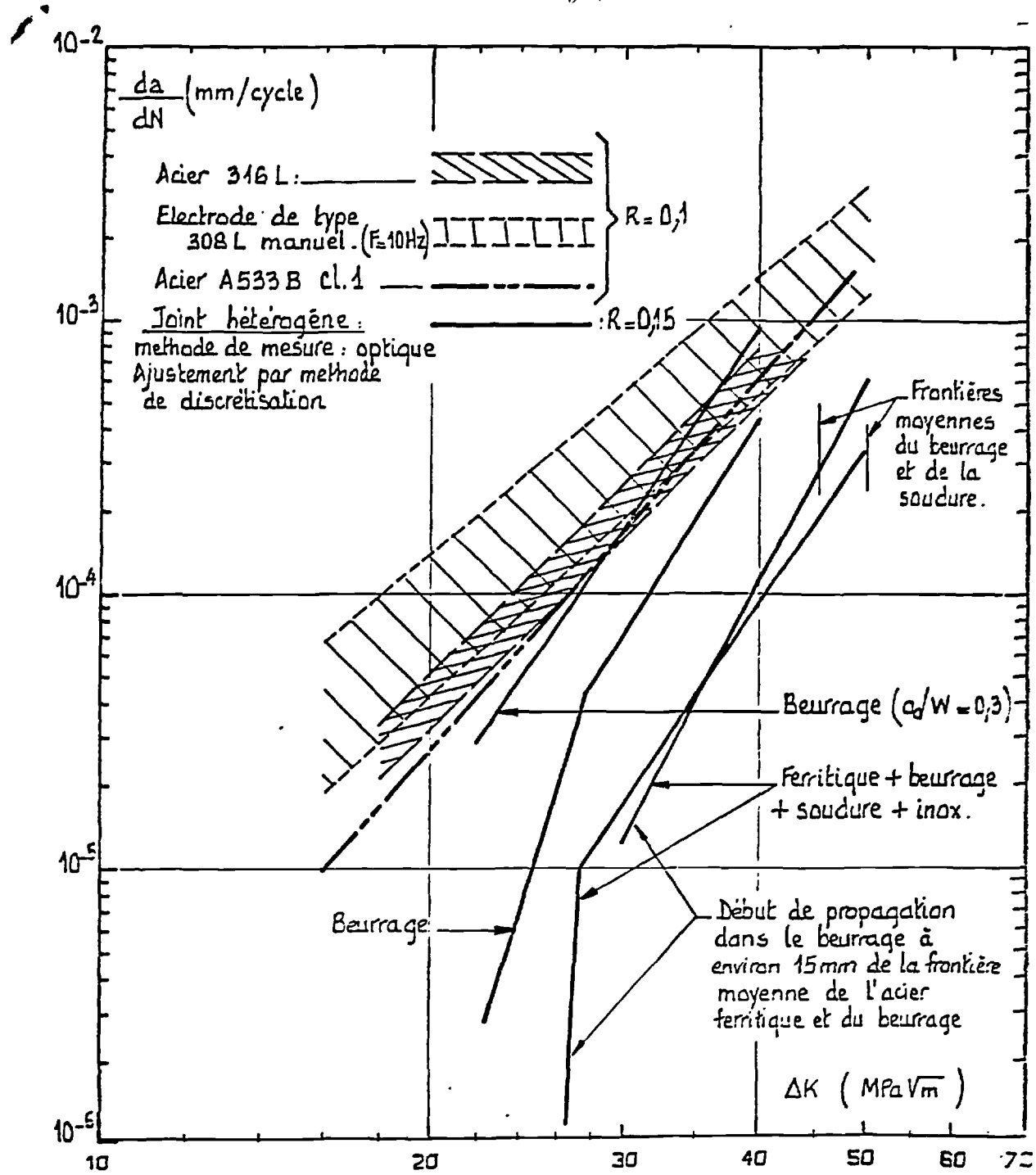


PRÉLÈVEMENT D'ÉPROUVETTES CMI(0,2) DANS UN JOINT HÉTÉROGÈNE.

- MÉTAUX DE BASE : ACIERS A533B cl 1 ET 316L
- JOINT : BEURRAGE À L'ÉLECTRODE ENROBÉE EN 2 SÉQUENCES SUIVI D'UN SOUDAGE SUR LATTE INOX EN AUTOMATIQUE SOUS FLUX.



MESURES DE VITESSES DE FISSURATION DANS UN JOINT HÉTÉROGÈNE.  
 $a_0 / W_{\text{initial}} = 0,2$  -  $T = 20^\circ\text{C}$  -  $R = 0,15$  -  $F = 20 \text{ Hz}$  -  
 MATÉRIAU : BEURRAGE SENS TL - REPÈRE 135.3 1 - PRÉFISSURATION.



MESURES DE VITESSES DE FISSURATION -  $T=20^\circ\text{C}$  -  $R=0,1$  et  $0,15$   
 $F=20\text{ Hz}$  -  
 COMPARAISON DE DIVERS MATÉRIEAUX.