



Soudage MIG Frettes LHC Caractérisations mécaniques à 4.2 K

S. Marque, S. Sgobba / EST-SM

Keywords: LHC, Frette, Propriétés mécaniques, Essais cryogéniques, MIG

Résumé

Dans le cadre de la sélection du matériau pour la frette des aimants dipôles du LHC, la note technique MT/SM/95-01 explicitait les résultats de l'étude de soudabilité MIG de trois nuances d'acier. La présente note résume et discute les résultats d'essais mécaniques complémentaires de résilience et de traction effectués à 4.2 K sur les joints soudés. Le comportement mécanique de ces mêmes joints est étudié avant et après cyclage thermique entre la température ambiante et 4.2 K. Les résultats sont interprétés en considérant l'évolution microstructurale induite par le cyclage thermique. Pour deux des trois métaux de base considérés, ce dernier provoque une fissuration étendue dans le métal d'apport.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de la sélection du matériau pour la frette des aimants dipôles du LHC, la note technique MT/SM/95-01 [1] explicitait les résultats de l'étude de soudabilité MIG de trois nuances d'acier.

Les aciers envisagés sont des austénitiques à forte teneur en azote et manganèse : AISI 304LN et 316LN, produit respectivement par Fabrique de Fer (B) et Creusot-Loire (F), sont des aciers classiques pour les applications cryogéniques; un acier proche du type 216 - nommé X20 MD par le fournisseur Aubert et Duval (F) - a été aussi considéré¹. Les nuances non stabilisées à l'azote ne sont pas retenues car elles sont généralement moins stables à la transformation martensitique [2], éventuellement fragilisante.

L'assemblage des deux demi-coquilles de la frette sera assuré par deux soudures longitudinales MIG (6 passes avec chanfrein de 50° et gap de 1.5 mm) avec un métal d'apport type 304LN (Lincoln) et une protection gazeuse composée d'Ar, N₂ et CO₂. La vitesse de soudage est identique pour les trois nuances : 125 cm/min. Malgré l'optimisation, pour chaque nuance, des paramètres de soudage, de la ferrite- δ subsistait en zone de transition pour le 304LN et le X20 MD. L'effet fragilisant de la précipitation de ferrite- δ (à partir de teneurs de quelques pourcents) est bien connu [3]. De plus, la déstabilisation de l'acier provoquée par le soudage pourrait induire, spécialement sous contrainte, une transformation martensitique à basse température.

La précipitation de ces phases fragilisantes a été étudiée dans la note précitée et son effet sur les propriétés mécaniques a été évalué. La présente note contient les résultats d'essais mécaniques complémentaires réalisés à 4.2 K visant :

- 1) à caractériser les propriétés mécaniques à traction (essais effectués au CERN) et la résilience (essais effectués chez LINDE AG) des joints soudés, à une température proche de la température de fonctionnement (4.2 K).
- 2) à étudier le comportement de ces mêmes joints après cyclage; en effet, un vieillissement est induit sur la machine par des réchauffements périodiques (maintenance, réparations, ...). Pour en simuler les conséquences sur l'assemblage, des tôles soudées des trois matériaux ont été cyclées cinq fois de la température ambiante à 4.2 K (voir annexe 1). Les essais se rapportant à ces tôles seront désignés dans la suite du rapport par le terme "cyclé". Bien que, dans l'ensemble de sa vie, la machine soit soumise à un nombre de cycles thermiques supérieur à cinq, les principaux phénomènes pouvant modifier le comportement mécanique des aciers cités interviendront dans le premier cycle. En effet, les déformations plastiques seront induites essentiellement par le premier cycle. De plus, le nombre réel de cycles thermiques sera si petit qu'il n'est pas nécessaire d'étudier le composant en fatigue oligocyclique.

¹ Nous nous référons à la note citée pour tout détail sur la composition et les caractéristiques métallurgiques des trois alliages.

2. FISSURATION INDUITE PAR LE CYCLAGE THERMIQUE

Des coupes métallographiques réalisées sur les joints soudés ont révélé pour deux des trois nuances la présence de fissures induites par le cyclage thermique (Tableau 1)

Nuance	Métal d'apport	Fissures présentes dans le métal d'apport du matériau cyclé ?	Fissures présentes dans le métal d'apport du matériau non cyclé ?
X20 MD	304LN	oui	non
316LN	304LN	non	non
304LN	304LN	oui	non

Tableau 1 : fissuration induite par le cyclage thermique

L'observation systématique des joints soudés (exemple de microfissures à l'annexe 2) a démontré que la fissuration, qui ne se développe qu'après cyclage, ne peut être due à l'opération de soudure (fissuration à chaud).

3. ESSAIS DE TRACTION

3.1 - Prélèvements et caractéristiques des essais

Trois séries de trois éprouvettes ont été prélevées (annexe 3) : des éprouvettes dans le métal de base, dans le métal d'apport (304 "Lincoln") et perpendiculaires au cordon de soudure (sens travers), dans les tôles non cyclées et cyclées. L'évolution, après cyclage, des propriétés mécaniques n'a été mesurée que sur les trois métaux de base.

La manipulation de traction à 4.2 K informatisée disponible au CERN permet d'évaluer très précisément les caractéristiques élastiques (module d'Young (E) et limite élastique à 0.2% ($R_{p0.2}$)) puisque les résolutions qui ont pu être atteintes sont inférieures à 0.2 μm pour le déplacement et 2 N pour la force.

Les valeurs à la rupture (contrainte (σ_r) et déformation (ϵ_r)) sont également déterminées mais sont fortement dépendantes des petites dimensions des éprouvettes et de la qualité de l'usinage (fraisage et électroérosion). Leur reproductibilité, pour un même essai, est donc plus aléatoire.

Les effets de serration propres aux basses températures sont aussi bien résolus. Ils se manifestent dans tous les tests à températures cryogéniques et se caractérisent par des allongements rapides et des chutes de force sur la courbe de traction (annexe 4). Ce phénomène est souvent associé à une précipitation de martensite dans les aciers inoxydables austénitiques à basse température ou à un chauffage adiabatique de l'échantillon par la chaleur produite lors de la déformation [4,5].

3.2 - Résultats expérimentaux

La nuance X20 MD (métal de base) présente les caractéristiques mécaniques les plus élevées avant et après cyclage (tableau 2) : cela est dû à sa forte teneur en azote (3660 ppm contre 1500 ppm pour les deux autres nuances).

L'effet du cyclage sur les caractéristiques mécaniques des métaux de base est important pour les nuances X20 MD et 304LN (environ 24% et 58% d'augmentation de la limite élastique respectivement). Cette augmentation est beaucoup plus modérée pour la nuance 316LN (5%).

MATERIAU (Etat)		E (GPa) ± 10 GPa		Rp _{0,2} (MPa) ± 10 MPa		σ _r (MPa)		ε _r (%)	
		Non cyclé	Cyclé	Non cyclé	Cyclé	Non cyclé	Cyclé	Non cyclé	Cyclé
X20 MD	Métal de base	201	211	1303	1718	1844	2069	8.9	8.6
	Métal d'apport		155		1287		1676		22.5
	Sens travers		191		1382		1583		5.2
316LN	Métal de base	202	206	1008	1070	1550	1569	30.7	33.5
	Métal d'apport		170		1180		1543		27.5
	Sens travers		203		1171		1469		14.3
304LN	Métal de base	190	208	783	1250	1696	1768	32	33
	Métal d'apport		153		1332		1519		28.4
	Sens travers		196		1229		1407		19.8

Tableau 2 : Résultats des essais de traction à 4.2 K - Valeurs moyennes.

Les caractéristiques mécaniques du métal d'apport sont relativement constantes quel que soit le métal de base. Les écarts enregistrés pourraient provenir des différences de prélèvement des éprouvettes dans le cordon de soudure. En effet, six passes sont nécessaires pour souder la tôle.

Les caractéristiques mécaniques (Rp_{0,2} et σ_r) des éprouvettes transversales cyclées sont plus faibles que celles du métal de base pour la nuance X20 MD (-19%), alors qu'elles se maintiennent pour les deux autres nuances.

4. ESSAIS CHARPY

4.1 - Types d'essais

Linde A.G. réalise des essais de résilience à 4.2 K (annexe 5). Les éprouvettes standard (ISO V) sont encapsulées dans une enveloppe en verre, dans un bain d'hélium liquide. La capsule est ensuite fermée par deux bouchons en polystyrène, retirée du bain d'hélium et placée sur le pendule. Le temps disponible pour le positionnement de l'éprouvette et pour l'essai est de six secondes. Une courbe de calibration a été établie pour connaître l'absorption d'énergie due à la capsule.

Trois types d'éprouvettes ont été prélevés dans les tôles cyclées et non cyclées : dans le métal de base, dans le métal soudé et dans la zone de transition [1]. L'annexe 6 contient une coupe métallographique montrant les zones où ont été usinées les entailles ISO V. Un minimum de trois tests a été réalisé pour chaque type d'éprouvette.

4.2 - Résultats expérimentaux (tableau 3)

D'après des observations en microscopie à balayage (Linde AG), toutes les ruptures, pour les trois nuances, sont totalement ductiles.

MATERIAU (Etat)		Energie de rupture (J)		Energie de rupture normalisée (J/cm ²)		Expansion latérale (%)	
		Non cyclé	Cyclé	Non cyclé	Cyclé	Non cyclé	Cyclé
X20 ME3	Métal de base	54	52	67	65	3.6	3.8
	Métal d'apport	46	38	57	47	3.6	2.9
	Zone transition	51	52	64	65	3.3	3.9
316LN	Métal de base	293	268	366	335	23.5	22.2
	Métal d'apport	81	83	101	104	6.1	5.7
	Zone transition	187	147	234	184	11.7	11.8
304LN	Métal de base	133	102	175	126	13.1	9.4
	Métal d'apport	77	78	113	97	6.3	7.3
	Zone transition	101	103	147	128	9.9	9.1

Tableau 3 : résultats des essais Charpy.

Le faible volume de précipitation ferritique dans la zone de transition du 304LN (nuance qui en présentait le plus) n'est pas encore néfaste pour sa ténacité à rupture. Elle n'engendre pas de comportement fragile à basse température pour les essais mis en oeuvre. La diminution de la résilience et de l'expansion latérale dans le métal d'apport de la nuance X20 MD cyclée pourrait être due à la fissuration qui se développe lors du cyclage. Par ailleurs, la nuance X20 MD dans le métal de base et la zone de transition reste essentiellement stable du point de vue de la résilience.

Par contre, on observe une chute de l'énergie absorbée pour les deux séries 300, respectivement 316LN et 304LN, dans le métal de base (-8% et -28%) et dans la zone de transition (-21% et -12%), alors que les résiliences du métal d'apport demeurent relativement constantes.

5. DISCUSSION

L'examen des caractéristiques mécaniques des trois séries d'éprouvettes cyclées fait apparaître que les limites élastiques et les contraintes à la rupture sont quasiment équivalentes pour le métal d'apport et le sens travers quel que soit le métal de base.

Les essais de traction sur les éprouvettes transversales caractérisent l'assemblage, c'est à dire le métal d'apport soudé avec le métal de base par l'intermédiaire des interfaces (entre les passes de soudage et entre le métal d'apport et le métal de base).

Les résultats alors obtenus sont ceux du composant le plus faible, ici le métal d'apport (tableau 2), puisque l'assemblage peut être grossièrement modélisé par des ressorts en série, modulé par l'effet des interfaces (6 passes de soudage) et du sens de traction sur le métal d'apport (sur les éprouvettes transversales, on sollicite le métal d'apport dans une direction perpendiculaire par rapport aux tests effectués directement sur le cordon, les propriétés étant sensiblement différentes car le cordon n'est pas isotrope).

Cela explique pourquoi les limites élastiques et les contraintes à la rupture des éprouvettes transversales sont sensiblement égales quelle que soit la nuance de base.

En outre, plus le métal de base a des propriétés mécaniques élevées (module et limite élastiques) plus le métal d'apport est déformé pour une élongation donnée lors des essais sur les éprouvettes transversales. La déformation imposée à l'éprouvette est transmise en grande partie à la faible longueur occupée par le métal d'apport (entre 5 et 10 mm suivant la position des éprouvettes transversales dans l'épaisseur de la tôle) ce qui a pour effet de diminuer fortement les élongations à la rupture.

Cela explique les faibles allongements des éprouvettes transversales de la nuance X20 MD (qui a les caractéristiques mécaniques les meilleures) et les différences généralement constatées entre les cordons et les éprouvettes transversales.

Du point de vue des résiliences, il apparaît que le 316LN a une ténacité à rupture beaucoup plus grande que les deux autres. Sa teneur en azote bien plus faible que celle du X20 MD est en partie responsable; le faible taux inclusionnaire, dû à l'élaboration de deuxième fusion, contribue aussi aux valeurs d'énergie absorbée plus importante que pour la nuance 304LN.

Le point surprenant est la différence de résilience du métal d'apport selon qu'il est soudé avec l'une ou l'autre des nuances. Cette différence peut en partie dépendre de la présence ou l'absence de fissures dans les éprouvettes cyclées. Mais plus généralement, la taille de la zone plastique, à l'arrière de l'entaille, lors de la rupture de l'éprouvette est fortement dépendante de la différence des caractéristiques élastiques du métal de base et du métal d'apport. En effet, cette zone est d'autant plus confinée dans le métal d'apport que la limite élastique du métal de base est grande par rapport à celle du métal d'apport. Le cordon de

soudure est alors plus rapidement plastifié que le métal de base, la zone plastique progresse préférentiellement dans la soudure. La rupture dans le cordon est alors favorisée. Cela explique les faibles valeurs de résilience du métal d'apport soudé avec la nuance qui a la plus grande limite élastique (X20 MD).

A la lumière de ces remarques, pour obtenir un bon assemblage, il paraît nécessaire de souder un métal de base avec un métal d'apport qui a des caractéristiques mécaniques similaires (c'est le cas du 316LN et du 304LN). Employer un métal de base très résistant (X20 MD) et un métal d'apport plus faible (304LN "Lincoln") est néfaste, les déformations ne sont pas distribuées uniformément mais sont concentrées dans le métal d'apport qui est alors trop sollicité. De faibles allongements à la rupture et résiliences sont alors à prévoir.

Les mêmes considérations s'appliquent si on considère l'effet du cyclage sur le métal d'apport. La perte maximum de résilience sur le métal d'apport s'obtient en correspondance de la nuance X20 MD, puisque le métal d'apport est plus fortement déformé (jusqu'à l'apparition de fissures) si associé à un métal de base trop résistant.

6. CONCLUSION.

Les conditions mécaniques imposées à la frette sont :

- une rigidité suffisante,
- une limite élastique à 300K et à 1.8 K supérieure respectivement à 150 MPa [6] et 400 MPa,
- une valeur de résilience, à 4.2 K, supérieure à 40 J/cm² (valeur réglementaire).

Les tests mécaniques présentés montrent que pour les trois nuances étudiées et dans leur état de réception :

- la précipitation ferritique résiduelle dans la nuance 304LN n'est pas encore critique du point de vue de la fragilité à basse température.
- à 4.2 K, les critères de limite élastique (400 MPa) et de fragilité (40 J/cm²) sont satisfaits par les trois nuances (figure 1).
- la condition de rigidité n'est pas discriminante pour les aciers envisagés.
- les 5 cycles thermomécaniques n'ont pas d'effet déterminant sur les propriétés mécaniques étudiées mais introduisent une fissuration sur deux des trois nuances soudées.

Si l'on considère la contrainte nominale dans la frette après refroidissement (environ 400 MPa), toutes les nuances étudiées conviennent.

Par contre, lors du soudage à température ambiante, il existera certainement des zones de concentration de contraintes (spécialement à l'interface métal de base - métal d'apport) qui seront plastifiées si les nuances 304LN et 316LN, spécifications CERN, sont utilisées (leur limite élastique à chaud est de seulement 290 MPa).

A l'inverse, la limite élastique du X20 MD, à température ambiante, (450 MPa) permet de s'affranchir de ce risque.

Pour la nuance X20 MD, la valeur de résilience à 4.2 K est juste supérieure à 40 J/cm^2 (tableau 2). Une étude de mécanique de la rupture sur cette nuance serait peut-être nécessaire, si elle était retenue pour la construction, afin de s'affranchir de la limite réglementaire et de prouver la sécurité de l'assemblage soudé. Toutefois, la nuance pourrait être retenue seulement en association avec un métal d'apport qui ne soit pas assujéti, grâce à ses propriétés mécaniques, à la fissuration due au cyclage thermique, et qui garantisse une efficacité plus élevée du joint soudé.

Actuellement, la société COGNE procède à l'optimisation d'une nuance, type série 200, avec un contenu en azote plus faible (pour améliorer la ténacité à rupture), et des contenus en Mn et Ni plus élevés (pour garantir la stabilité austénitique) que ceux de la nuance X20 MD. La production de cette même nuance optimisée sous forme de fil pour le métal d'apport est aussi en cours.

Le soudage de cette nuance pourrait produire un assemblage homogène qui garantirait des élongations à la rupture suffisantes et des résiliences admissibles.

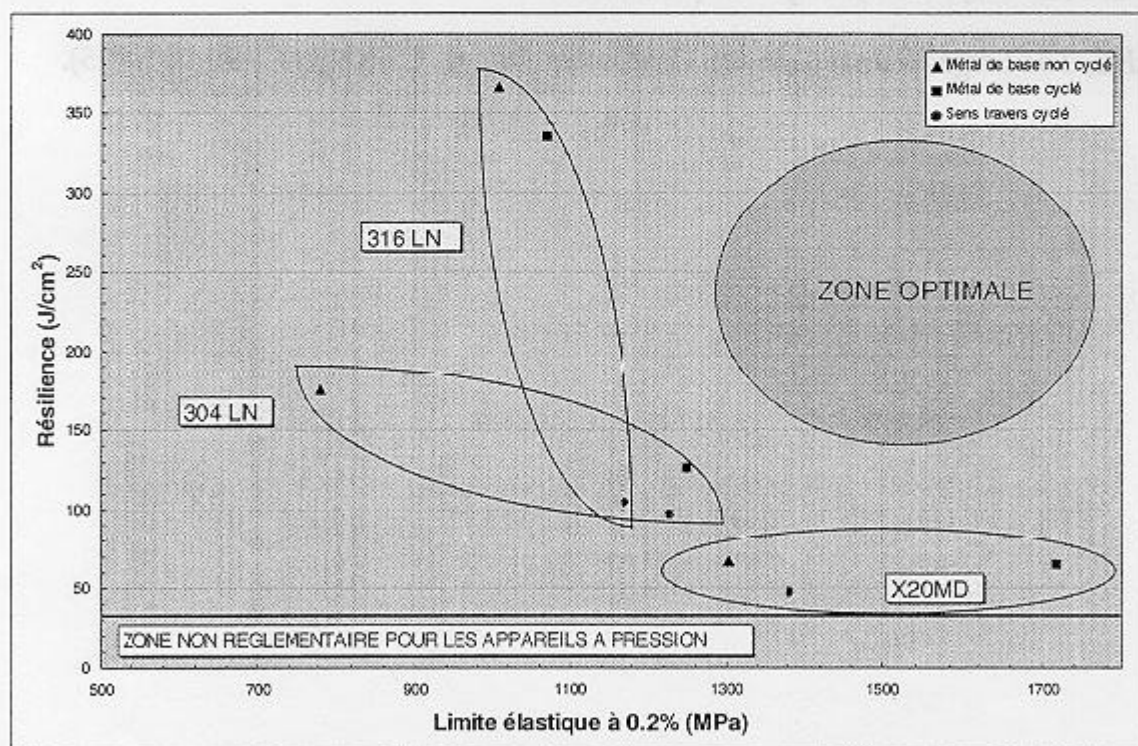


Figure 1 : Performances comparées à 4K des trois nuances.

7. REMERCIEMENTS

M. Cacciopoli a réalisé les soudures, J. Haffner les observations microstructurales, F. Savary a proposé le sujet. Finalement, nous remercions LINDE AG pour les essais de résilience, ainsi que J.P. Bacher pour la constante discussion critique.

8. BIBLIOGRAPHIE

- [1] O. Zilber, *Frette LHC Etude du soudage MiG de trois aciers inoxydables austénitiques*, Note technique MT-SM/95-01 (1995).
- [2] D.C. Larbalastier and H.W. King, *Austenitic Stainless Steels at Cryogenic Temperatures, Structural Stability and Magnetic Properties*, *Cryogenics* 3 (1973) 160
- [3] M.I. Mc Henry, *The Properties of Austenitic Steels at Cryogenic Temperatures*, Plenum Press, NY (1983)
- [4] Z.S. Basinski, *The Instability of Plastic Flow of Metals at Very Low Temperatures*, *Proc. R. Soc. Lon. A*, **240** (1957) 229.
- [5] Z.S. Basinski, *Aust. J. Phys.* **13** (1960) 354.
- [6] *LHC, The Large Hadron Collider, Conceptual Design*, CERN/AC/95-05 (1995).

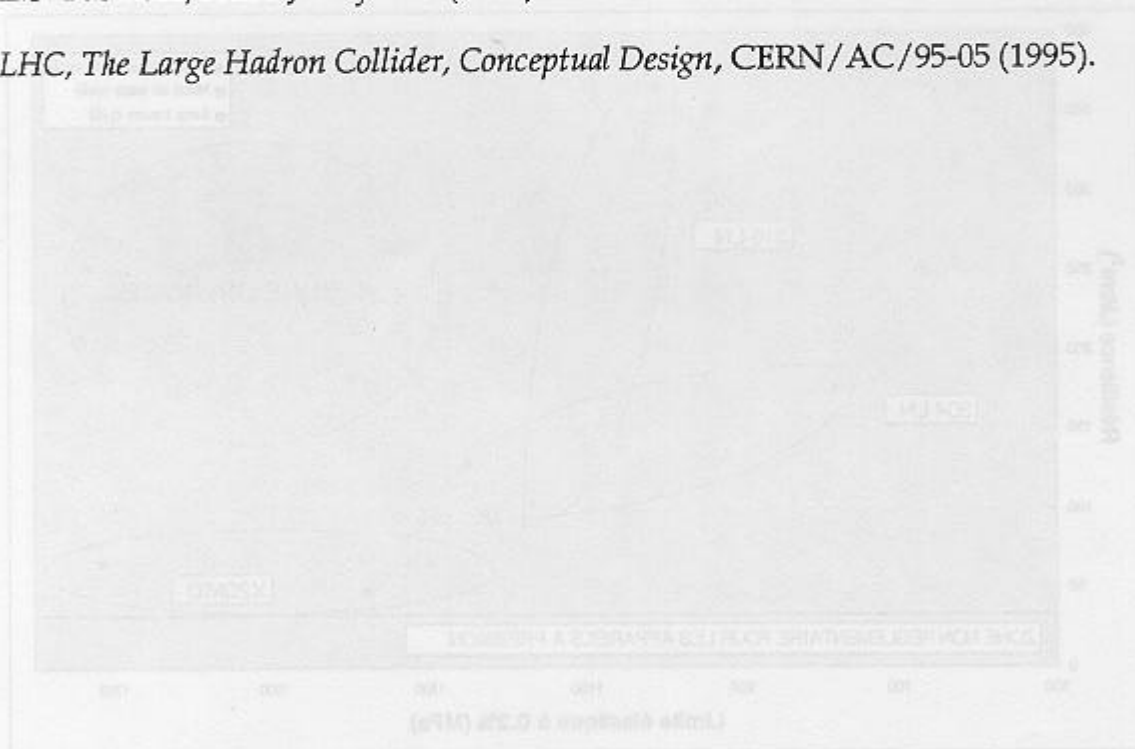


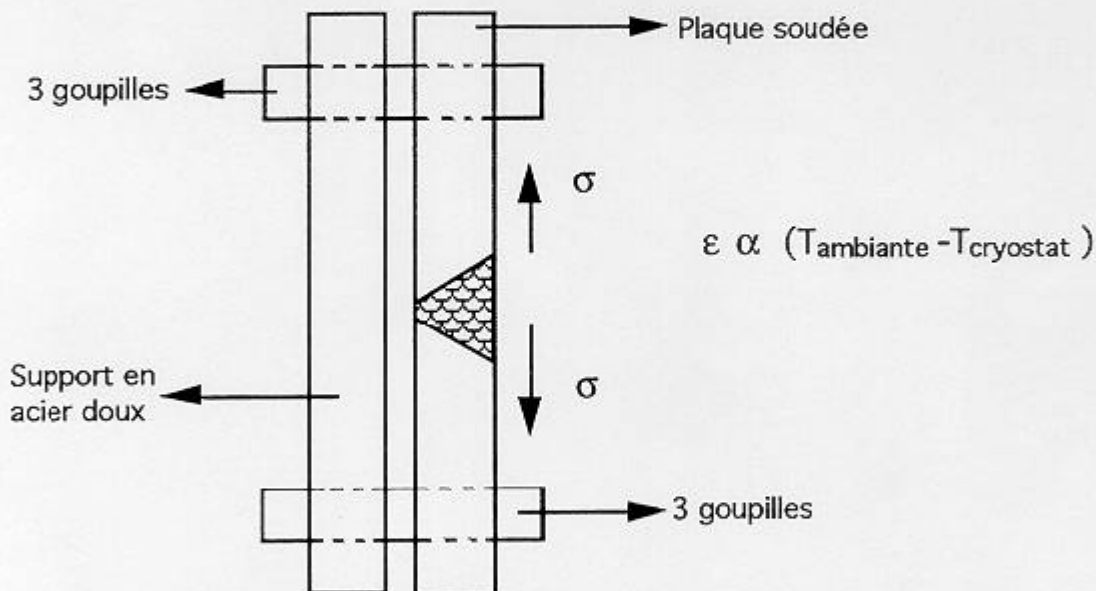
Figure 1 : Performances comparées à 4K des trois nuances.

ANNEXE I

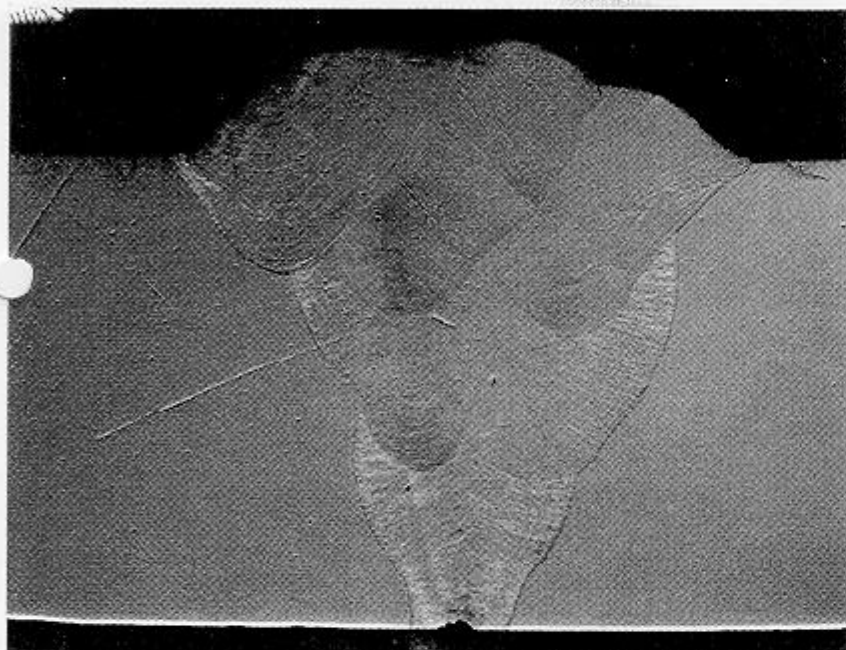
Descriptif du cyclage thermomécanique

Les échantillons sur lesquels les soudures ont été réalisées sont fixés par six goupilles sur une plaque d'acier de coefficient de dilatation thermique différent. On obtient ainsi, lors de la descente à 4.2 K, l'application d'une déformation proportionnelle à la différence de température. Ce dispositif, simple et peu coûteux, permet de s'approcher des conditions réelles de fonctionnement.

Un cyclage est défini par le cycle de température suivant : température ambiante - 4.2 K - température ambiante. Chaque échantillon a subi 5 cyclages. Ce nombre, en dessous du nombre réel de cycles qu'aura à subir un aimant, a été choisi car il permet certainement de prendre en compte d'éventuels événements métallurgiques néfastes à la ténacité à rupture de l'aimant.



ANNEXE II



Étude de la fissuration des joints soudés en MIG sur acier inoxydable spéciaux pour frette LHC

Soudure MIG, cyclé, avant résilience, matière de base X 20MD.

Fissure dans les 2ème et 3ème passes

G = x 6

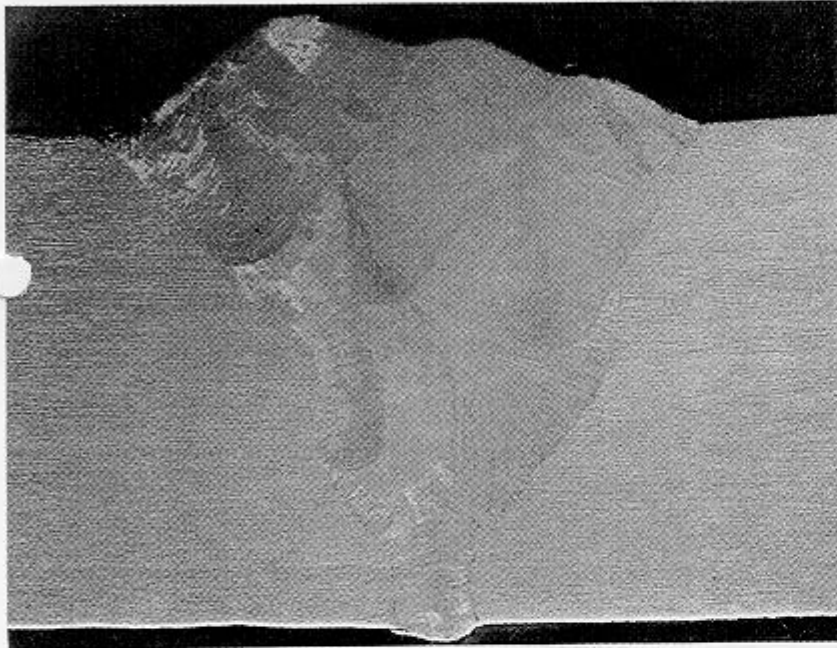


Étude de la fissuration des joints soudés en MIG sur acier inoxydable spéciaux pour frette LHC

Soudure MIG, cyclé, avant résilience, matière de base X 20MD.

Détail de la fissure dans la 2ème passe

G = x 500

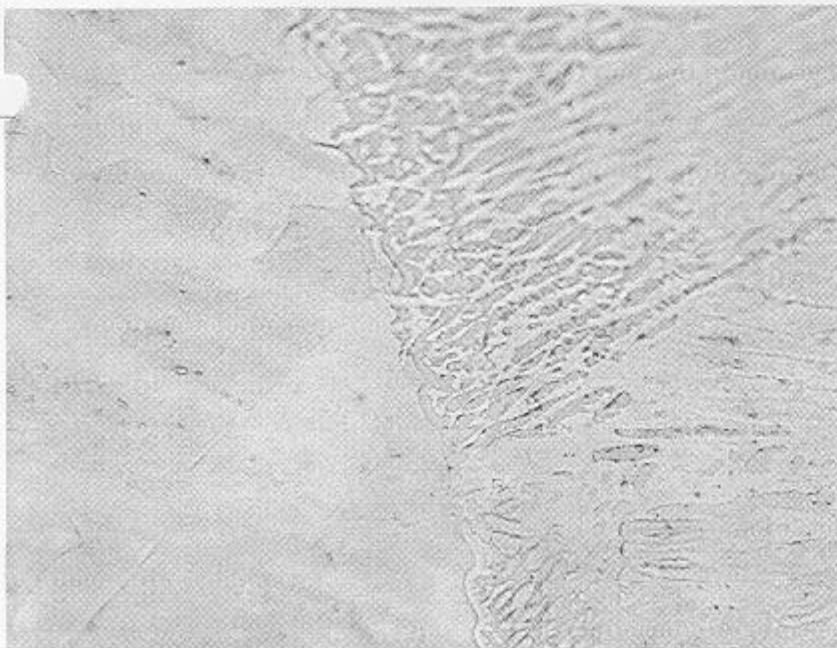


Étude de la fissuration des joints soudés en MIG sur acier inoxydable spéciaux pour frette LHC

Soudure MIG, cyclé, avant résilience, matière de base 316 LN.

Pas de manque d'alimentation, pas de ferrite dans la soudure et en ZAT, pas de fissures

G = x 6



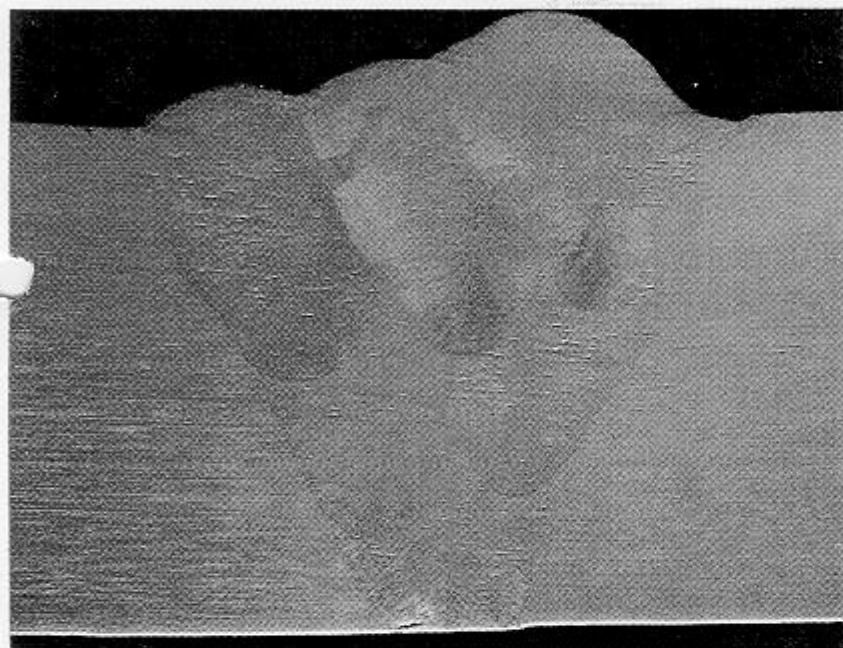
Étude de la fissuration des joints soudés en MIG sur acier inoxydable spéciaux pour frette LHC

Soudure MIG, cyclé, avant résilience, matière de base 316 LN.

Détail de la ZAT

G = x 500

Rapport N° 96/02/09
(suite)



Étude de la fissuration des joints soudés en MIG sur acier inoxydable spéciaux pour frette LHC

Soudure MIG, cyclé, avant résilience, matière de base 304 LN.

Fissure en racine

G = x 6



Étude de la fissuration des joints soudés en MIG sur acier inoxydable spéciaux pour frette LHC

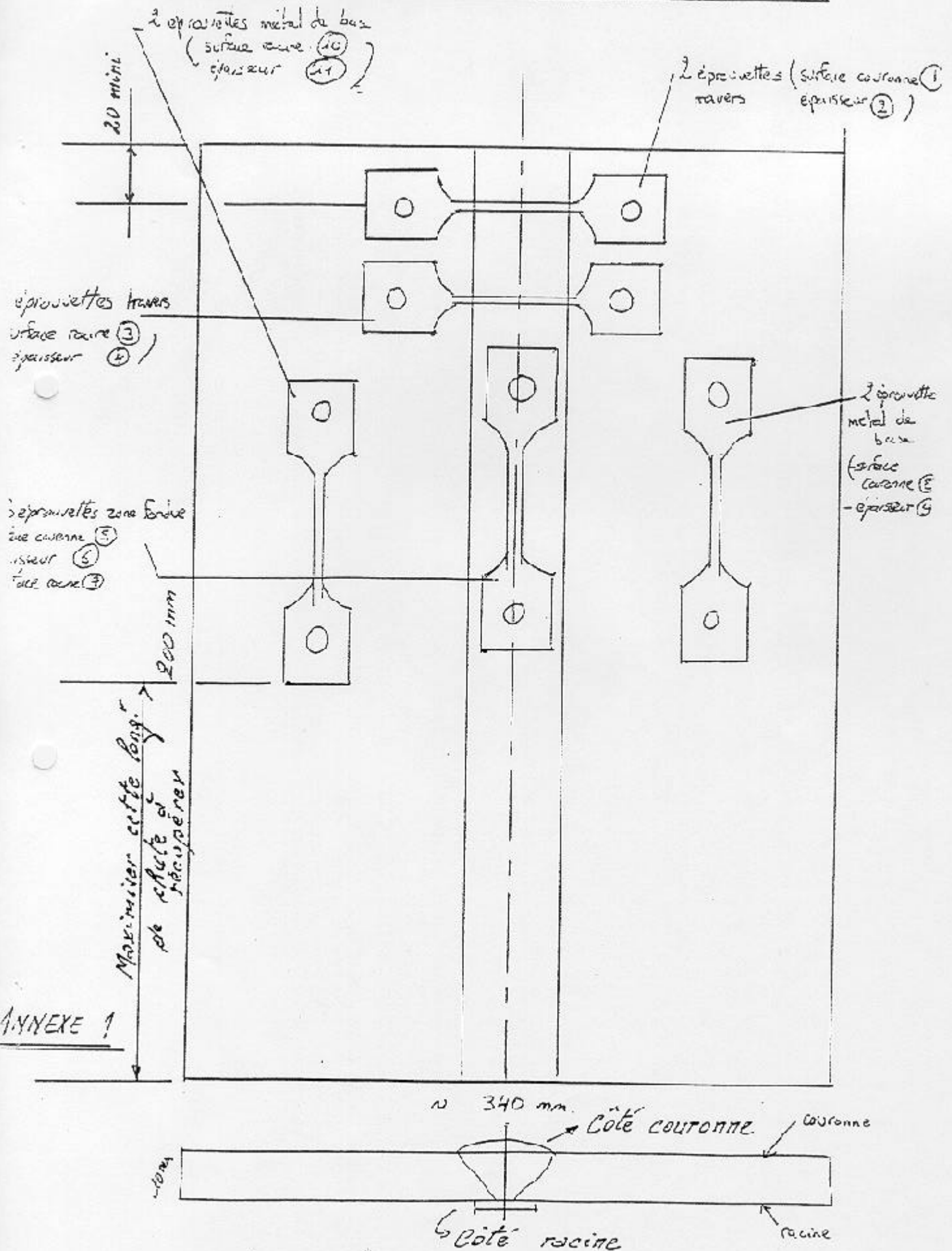
Soudure MIG, cyclé, avant résilience, matière de base 304 LN.

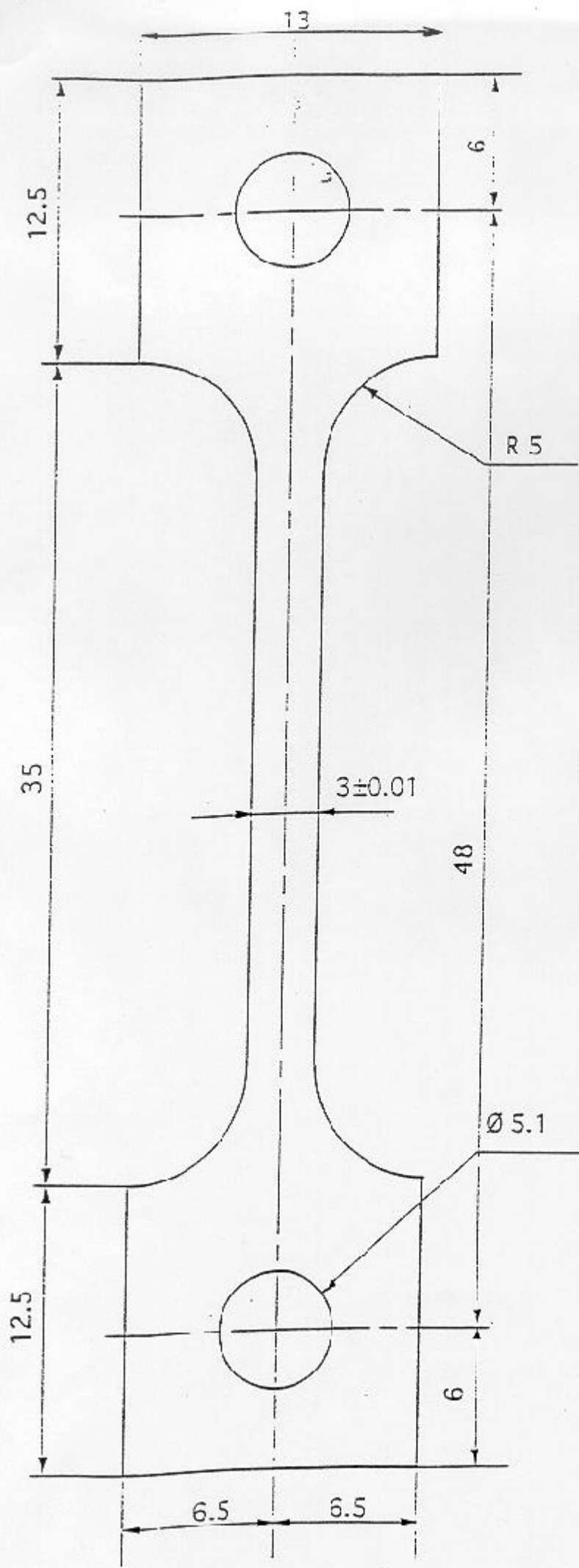
détail de la fissure

G = x 100

ANNEXE III

PLAN DE PRELEVEMENT DES EPROUVETTES



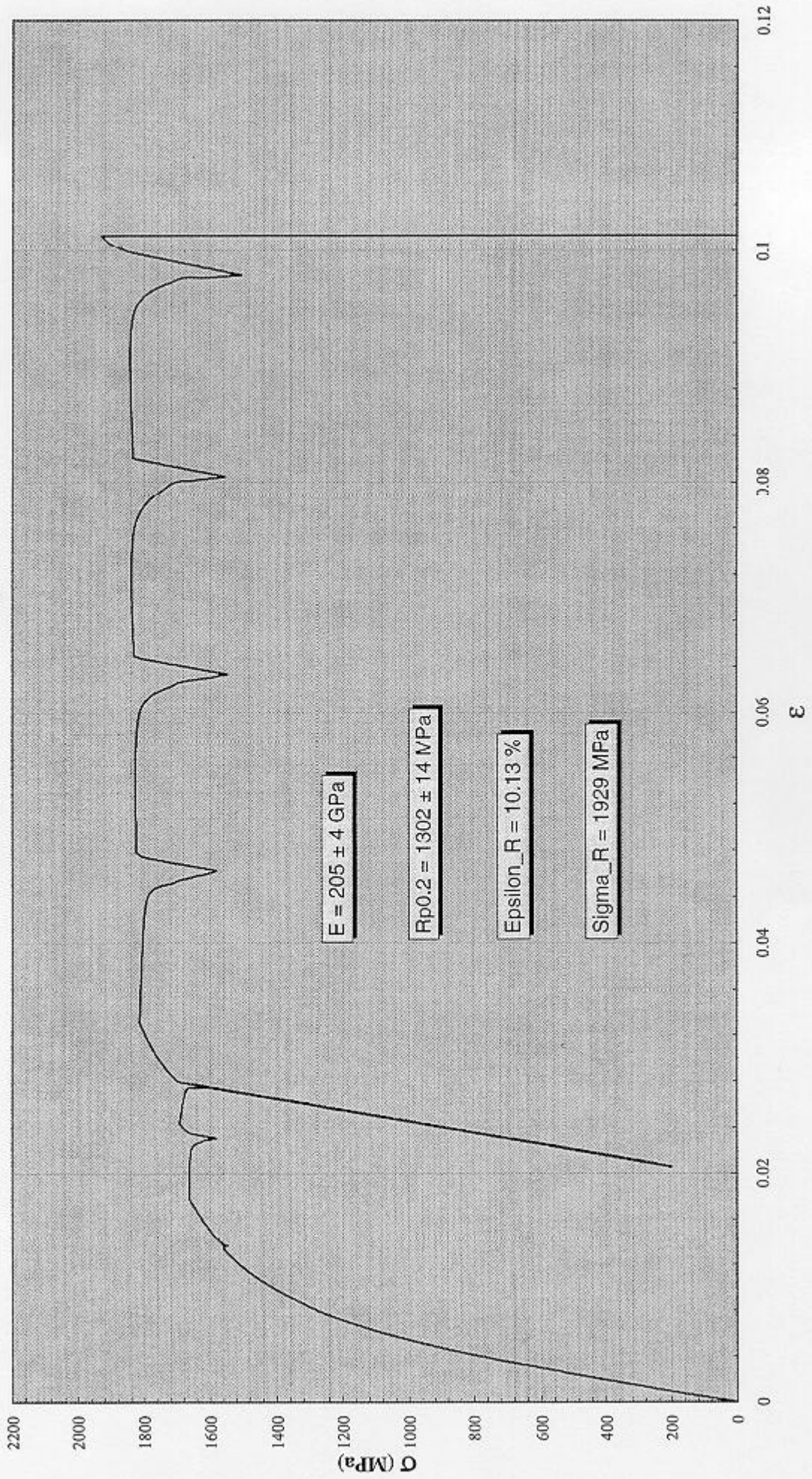


Epaisseur : 2mm

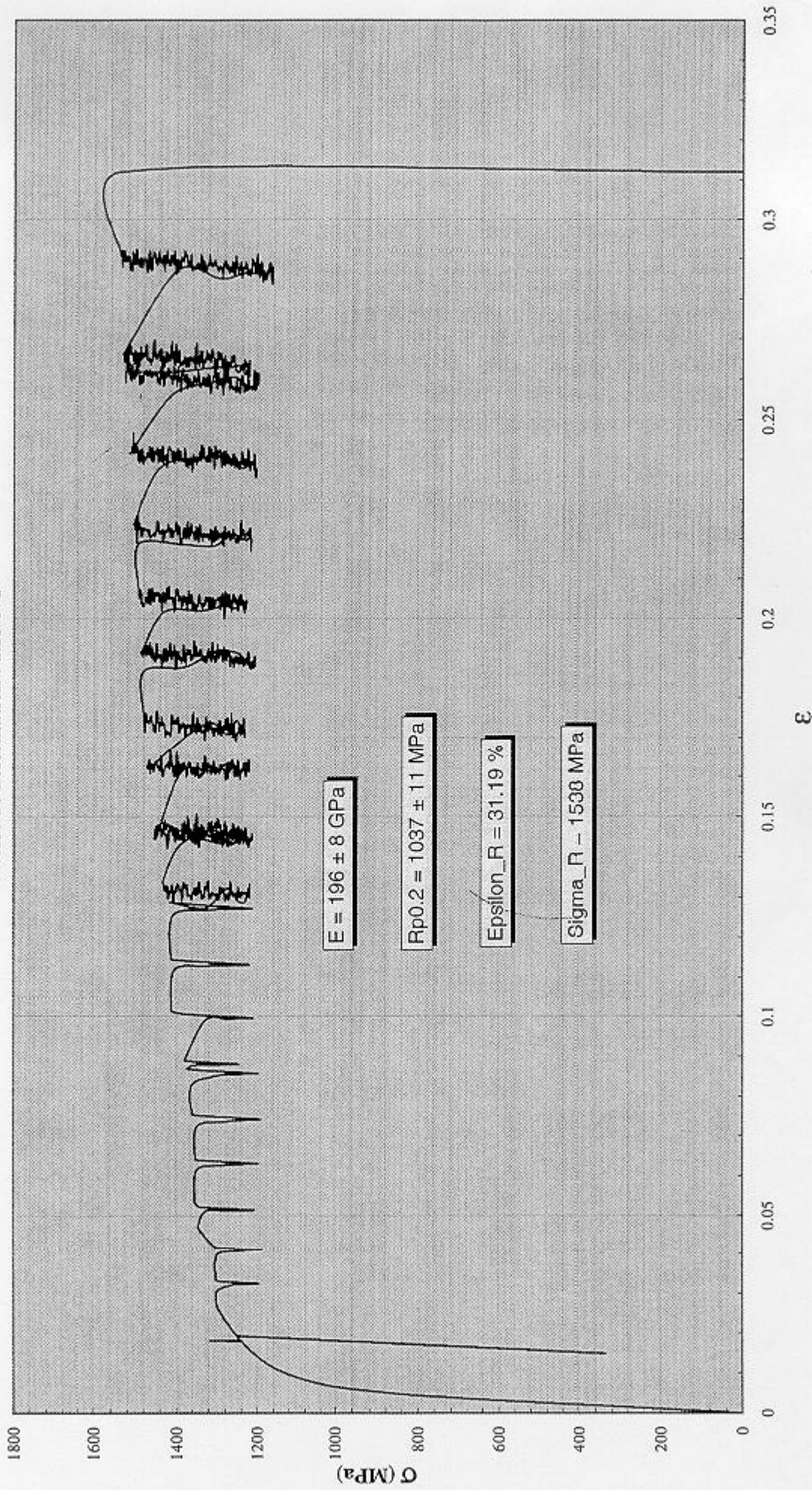
Ech: 4:1

ANNEXE IV

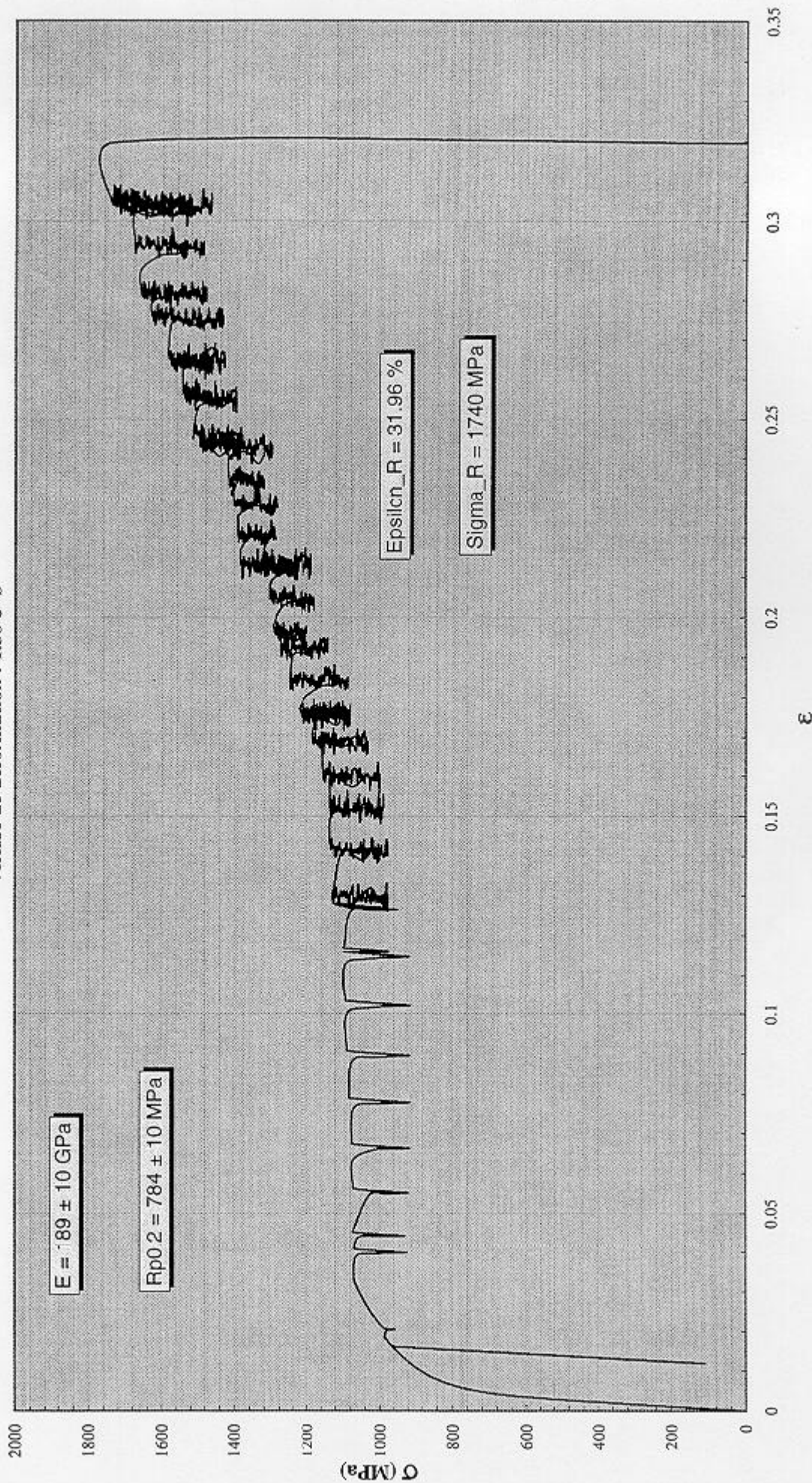
X20MD- METAL DE BASE
Eprouvette N° X20MDBA1 - Section : 5.974 mm² - T = 4.2 K
Vitesse de déformation : 1.33 e⁻³ s⁻¹



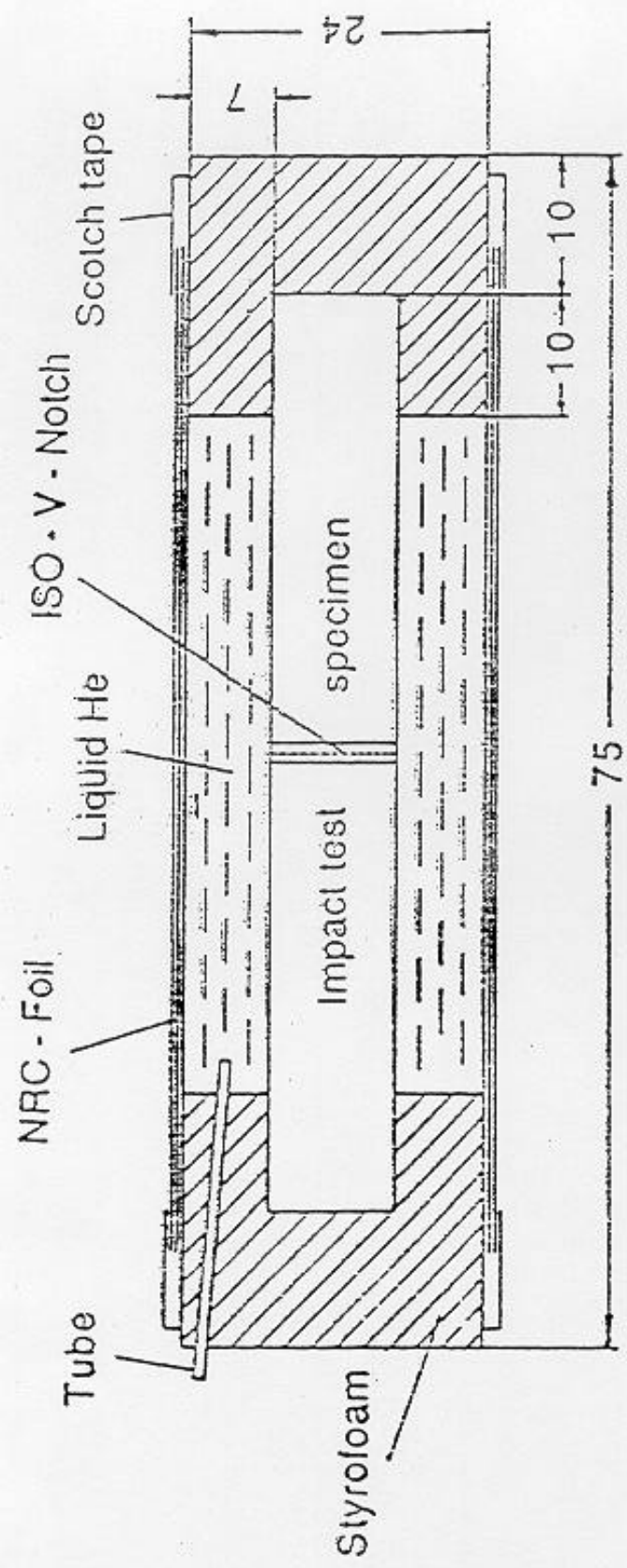
316 LN - METAL DE BASE
Eprouvette N° 316LNBA1 - Section : 6,024 mm² - T = 4.2 K
Vitesse de déformation : 1.33 e⁻³ s⁻¹



304 LN - METAL DE BASE
Eprouvette N° 304LNBA1 - Section : 6,021 mm² - T = 4,2 K
Vitesse de déformation : 1,36 e⁻³ s⁻¹

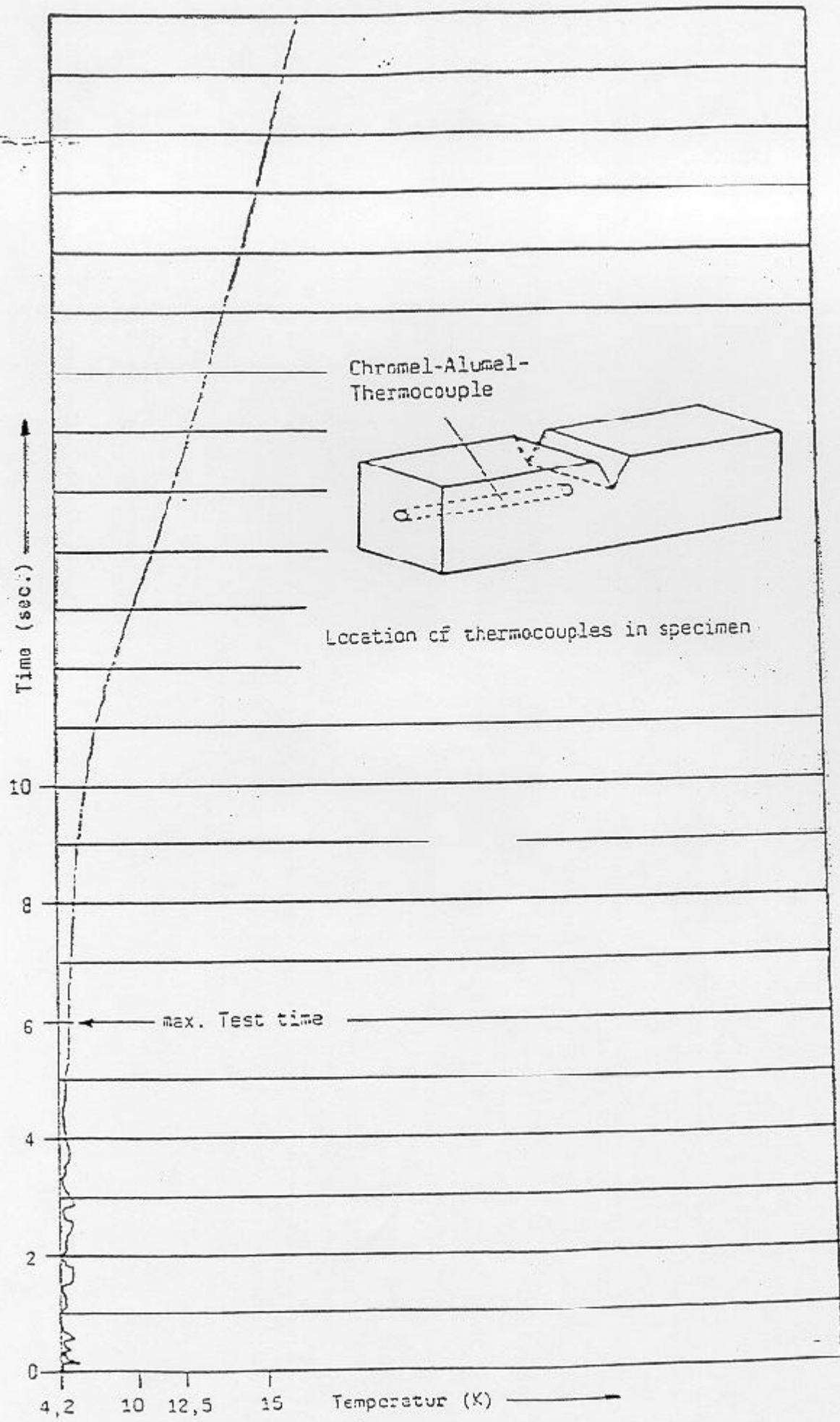


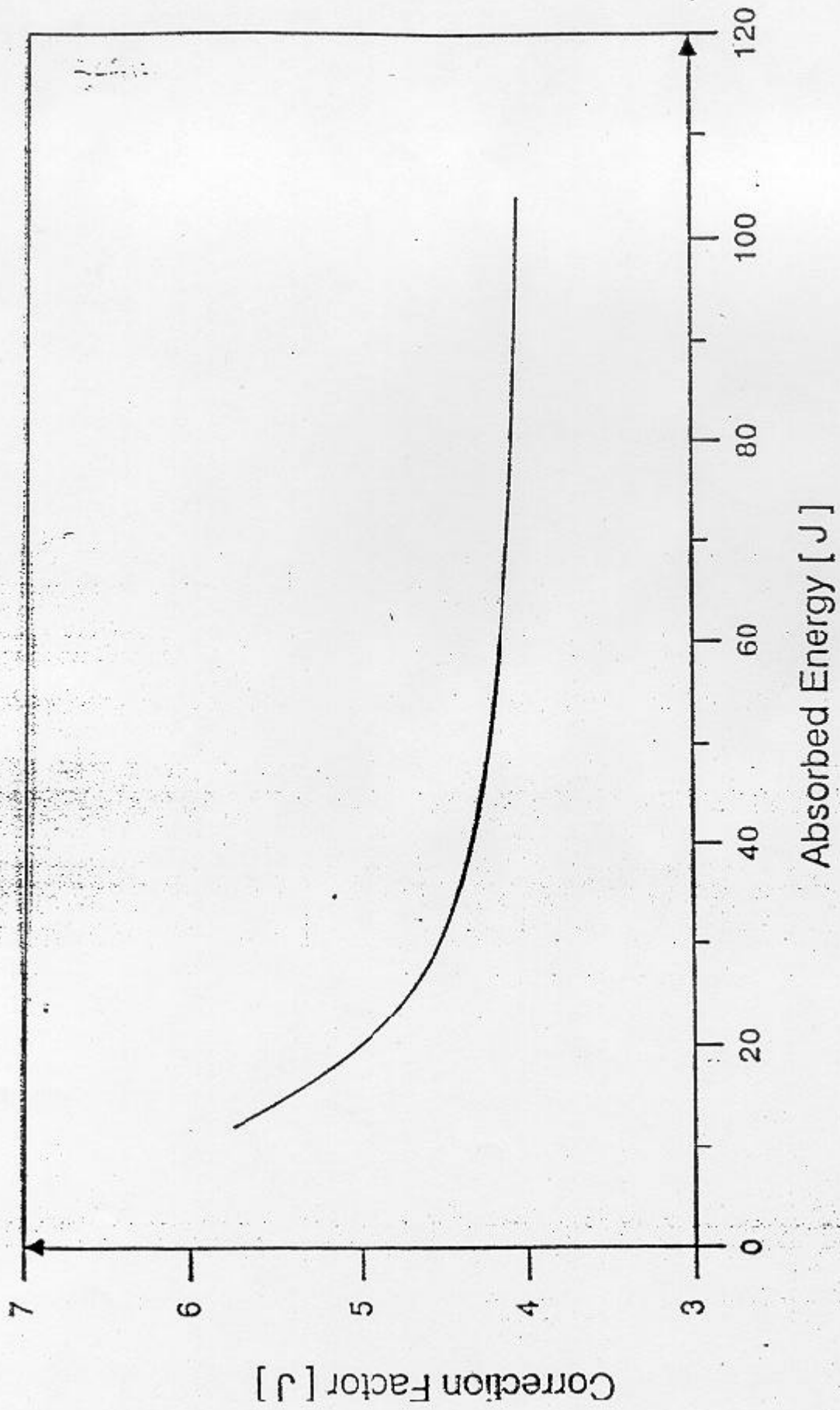
ANNEXE V



Encapsulated Impact ISO - V - Specimen According to LINDE

Determination of temperature vs. time of encapsulated
ISO-V-Specimen after removal of He-bath





CALIBRATION CURVE FOR IMPACT TESTS AT 4,2 K
(ISO - V - SPECIMEN)

ANNEXE VI

Positionnement des entailles des éprouvettes Charpy dans le cordon de soudure.

