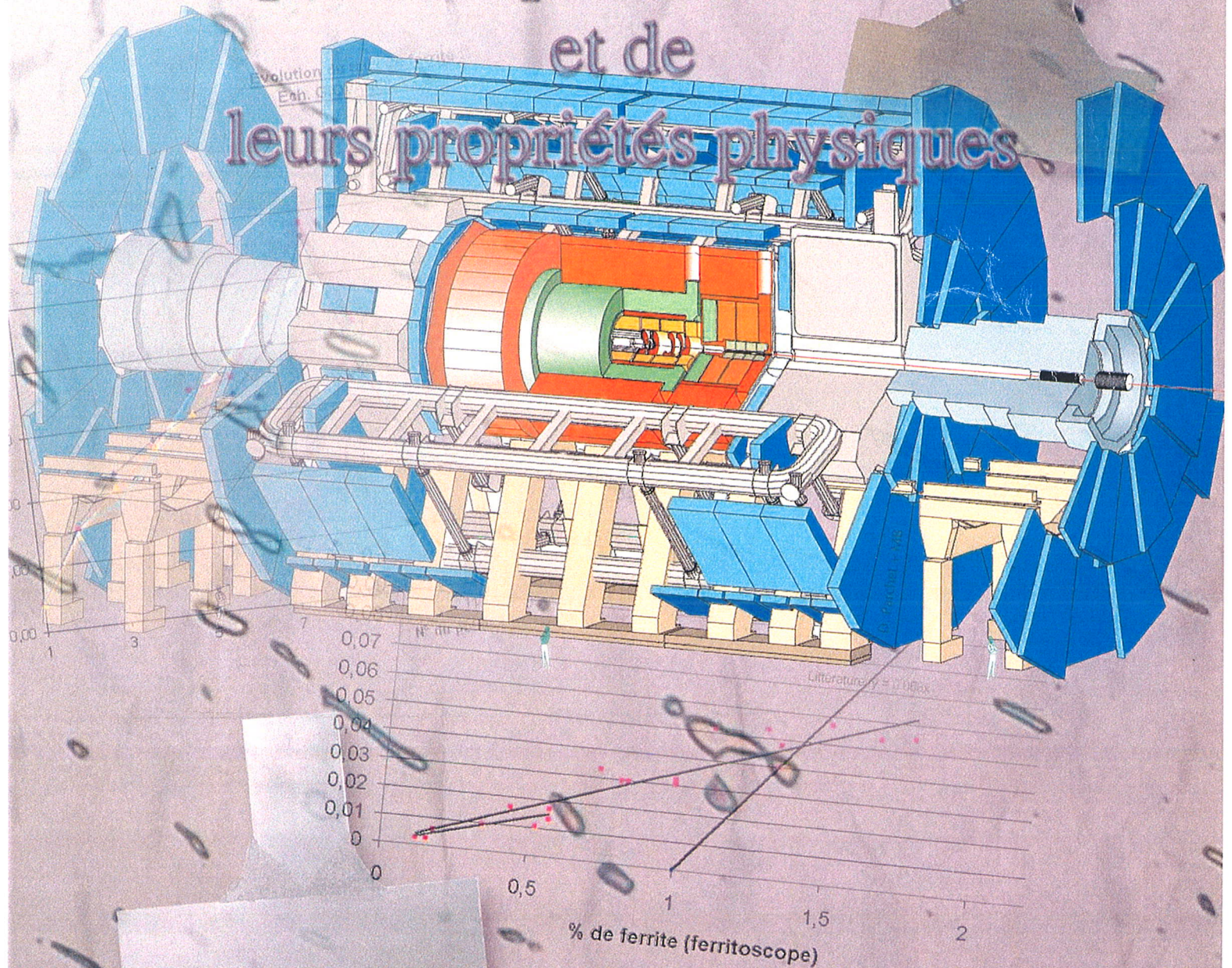


Qualification des soudures réalisées pour les pieds d'ATLAS et de leurs propriétés physiques



Maîtres de stage: S. SGOBBA / G. ARNAU
J.L. MARTIN

REMERCIEMENTS

Je voudrais commencer ce rapport de stage en remerciant les personnes qui m'ont soutenu de quelque manière que ce soit lors de ce stage.

Tout d'abord, M. S. SGOBBA. et G. ARNAU, tous deux maîtres de stage, et qui m'ont accompagné tout au long de ces trois mois.

Je suis aussi reconnaissant à M. B. NICQUEVERT car sans lui mon stage n'aurait pu avoir lieu.

Un grand merci également à J. HAFFNER, qui m'a fait part de son savoir faire et de ses connaissances.

Je remercie également toute l'équipe EST/SM/MB et toutes les personnes que j'ai rencontrées, pour leur accueil chaleureux et pour avoir pris de leur temps lorsque j'ai eu besoin d'eux.

SOMMAIRE :

I INTRODUCTION :

1.1 Présentation de l'entreprise.	p. 2
1.2 Le C.E.R.N. en quelques chiffres.	p. 2
1.3 Le groupe EST/SM.	p. 2
1.4 L'expérience ATLAS et le LHC.	p. 3

II LES PIEDS D'ATLAS :

2.1 Les moyens de production de l'acier.	p. 4
2.2 La fabrication des pieds.	p. 4
2.3 Le but du stage.	p. 6

III LES MATERIAUX : p. 6

IV LES EPROUVETTES DE SOUDAGE :

4.1 Qualification du mode de soudure C.E.R.N.	p. 8
4.2 Qualification du mode de soudure GIOVANOLA.	p. 9
4.3 Qualification du mode de soudure DESHORS.	p. 10
4.4 Conclusion sur les éprouvettes.	p. 11

V LES MOYENS DE DETECTION DE LA FERRITE :

5.1 Techniques non destructives :	
5.1.1 Le ferritoscope.	p. 12
5.1.2 Le magnétomètre.	p. 13
5.2 Techniques destructives :	
5.2.1 La balance magnétique.	p. 13
5.2.2 L'analyse d'images.	p. 15

VI RESULTATS :

6.1 Les mesures de ferrite par ferritoscope.	
6.2 Les mesures de susceptibilité avec le magnétomètre.	
6.3 Les mesures de susceptibilité à la balance magnétique.	
6.4 Discussion des résultats.	
6.5 Corrélation entre le ferritoscope et le magnétomètre.	
6.6 Corrélation entre le ferritoscope et le Quantimet 600	
6.7 Corrélation entre la susceptibilité et le taux de ferrite.	

VII CONCLUSIONS :

VIII BIBLIOGRAPHIE :

I INTRODUCTION :

1.1 PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

Ce stage de fin de deuxième année s'est déroulé du 3 avril au 23 juin 2000 au sein de la section métallurgique EST/SM/MB du C.E.R.N. (Centre Européen de Recherche Nucléaire) à Genève, sur la frontière franco-suisse

Le C.E.R.N. est une organisation intergouvernementale composée de 20 pays membres. L'objectif de ce groupement est de favoriser la recherche dans le domaine de la physique des particules.

Le C.E.R.N. étudie ce qu'est la matière, ce dont elle est faite et les forces qui la maintiennent agglomérée.

Dans ce but le C.E.R.N. s'occupe de toute les étapes de la construction et des expériences du plus grand et du plus célèbre accélérateur de particules au monde: le LHC, dans lequel s'inscrit l'expérience ATLAS.

1.2 LE C.E.R.N. EN QUELQUES CHIFFRES :

Le C.E.R.N. fonctionne avec un budget de 2 000 millions de CHF

Cet organisme regroupe 2735 personnes réparties selon :

- 95 physiciens de recherche.
- 950 Ingénieurs et scientifiques.
- Autant de techniciens.
- 450 administrateurs.
- 300 ouvriers spécialisés.

Le C.E.R.N. est réparti sur deux sites :

- à Meyrin (zone franco suisse).
- à Preessin (zone française).
- Les deux sites totalisent 600 ha.

1.3 La section EST/SM/Métallurgie et brasage :

La mission du groupe SM est définie de la façon suivante :

- Réaliser des prototypes en vue d'établir des spécifications techniques pour la production industrielle.
- Exécuter des travaux et des réparations urgentes qui ne peuvent être effectués à l'extérieur.
- Réaliser des études et des installations pour le contrôle qualité des produits industriels.
- Développer des solutions techniques en R&D sur des problèmes spécifiques rencontrés au CERN dans le cas où il n'existe pas de solution à l'extérieur.

Le groupe SM est organisé en 7 sections couvrant les domaines suivants :

- Métallurgie et analyse des matériaux.
- Caractérisation des matériaux sous vide.
- Traitement thermique et brasage sous vide.
- Traitements de surface chimique et électrochimique.
- Dépôt de couches minces.
- Production photomécanique de composants électroniques.

1.4 L'expérience ATLAS et le LHC :

Le LHC (Large Hadron Collider) est le nouveau projet d'accélérateur en cours de développement. Le but du LHC est d'élucider le mystère de la masse.

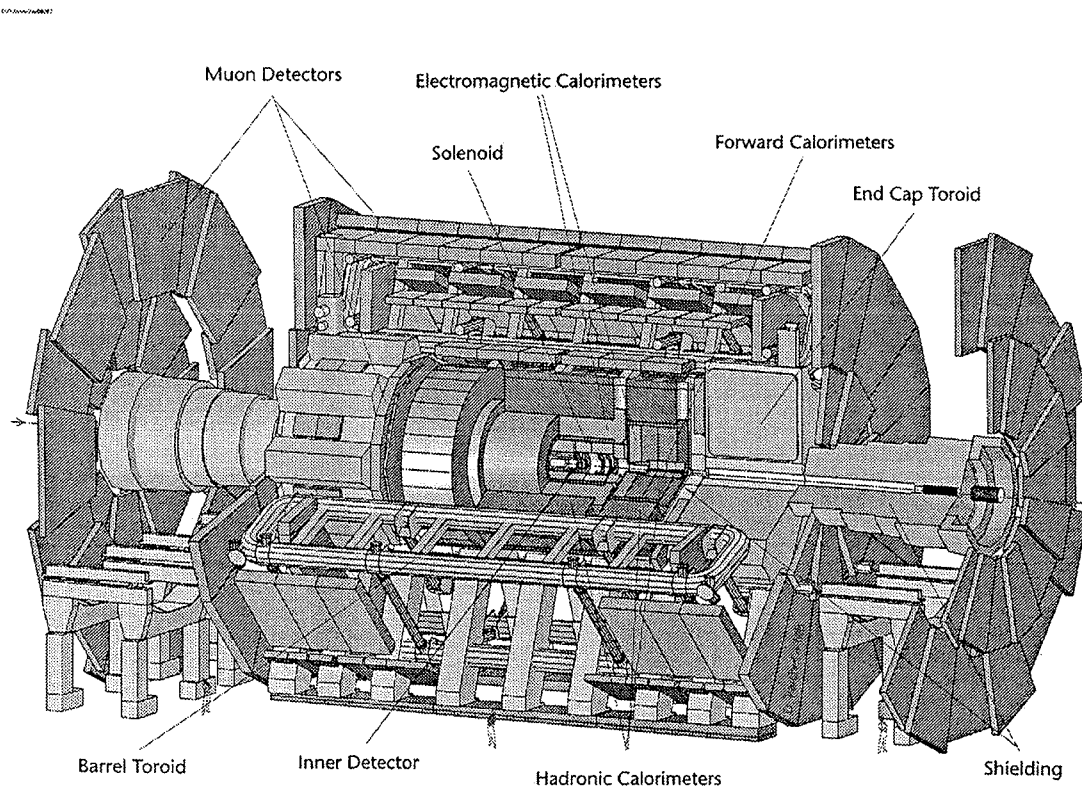
Sur la circonférence de l'accélérateur (27 Km de galerie), on retrouve différents détecteurs correspondant aux expériences menées ; ATLAS est l'un d'eux.

C'est un collisionneur de particules qui permettra la collision de hadrons avec une énergie de 14TeV.

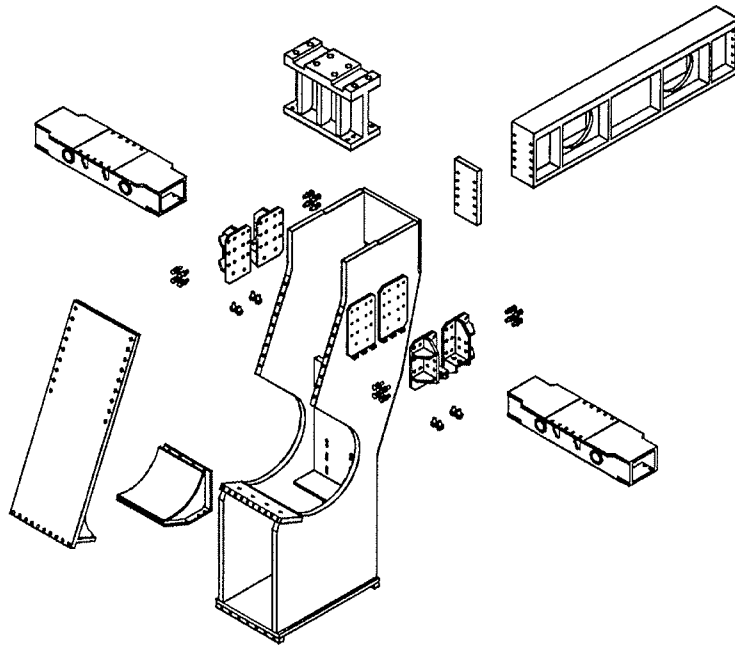
La caverne mesure 53 m de long, 30 m de large et 35m de haut. L'ensemble devrait peser aux alentours de 10 000 tonnes.

Le détecteur sera supporté par 9 paires de pieds de 6 m de haut, construits à l'aide de tôles de 100 mm d'épaisseur.

Pour les raisons citées dans le paragraphe 2.2, l'acier utilisé sera un acier inoxydable austénitique type 304L.



II LES PIEDS D'ATLAS :



Vue éclatée d'un des 18 pieds d'ATLAS :

Hauteur : 6m

Poids : 30 T.

Epaisseur des toles : 100 mm

2.1 LES MOYENS D'OBTENTION DE L'ACIER :

Les tôles du pieds peuvent s'obtenir selon deux moyens technologiques différents :

- la coulée en lingotière : cette méthode présente l'avantage de ne pas créer de contraintes internes lors de la solidification. Ce procédé est peu car le laminage se fait tôle à tôle. Cette technique est donc onéreuse.

- La coulée continue : cette méthode engendre énormément de contraintes internes lors de la solidification qui peuvent entraîner un problème de fissuration à chaud. Afin d'éviter cela, la nuance est ajustée de manière à précipiter de la ferrite δ . Celle-ci dissout les impuretés telles que le soufre et le phosphore, et évite qu'elles ne précipitent aux joints interdendritiques et des grains. La courbe de répartition typique de cette ferrite à travers l'épaisseur de la tôle est un double pic. Il s'explique par le cycle de ségrégation lors du refroidissement.

2.2 LA FABRICATION DES PIEDS :

Les pieds sont placés dans un champ magnétique et doivent être le plus amagnétique possible afin de ne pas entraîner de perturbation sur la trajectoire des particules. Cette restriction a permis de choisir un acier inoxydable type 304L :

La série 300 est une famille faiblement magnétique et très bon marché, tout venant et qui a de bonnes propriétés de soudabilité.

D'après des calculs effectués sur Ansys par le bureau d'études, l'utilisation de cet acier nécessiterait le soudage de plaques de renforts. Une étude est donc menée afin d'utiliser un acier type 304LN (enrichi en azote) dont la limite élastique est plus élevée que celle du 304L. Cette nuance permettrait de ne pas ajouter de renfort.

La complexité géométrique des pieds nécessite un bon nombre d'union en angle de tôles épaisses. Le choix de la méthode de fabrication des pieds n'est donc pas encore défini, mais pour des raisons pratiques et financières, deux possibilités de fabrication sont envisagés :

- *La méthode mécano soudée* : cette méthode pose des problèmes d'étude et de réalisation, mais serait intéressante sur le plan financier puisque l'étape de soudage serait très fortement réduite et probablement remplacée par un boulonnage des pièces.

- *La méthode par soudage* : c'est la méthode qui semble la plus facile d'exécution, mais elle demanderait beaucoup d'heures de soudage et de métal d'apport (5265 Kg soit 168 480 CHF de métal d'apport). Normalement, les paramètres de soudures sont choisis de façon à précipiter de la ferrite afin d'éviter le phénomène de fissuration à chaud.

Deux éléments sont particulièrement magnétiques :

- la martensite : elle peut précipiter lors de la solidification ou lors de la soudure. Elle peut également se former lorsque le métal est écroui.

- la ferrite : sa présence de ferrite sera prévisible :

- très probablement dans le métal de base puisque la méthode de fabrication des tôles la plus économiques est obtenu à partir de la coulée continue.
- Dans les soudures qui seront présentes, en nombre plus ou moins important selon la méthode de fabrication retenue. Comme on le verra dans 3.1 et 3.2, les soudures sans ferrite amènent à un problème de fissuration à chaud.

2.3 BUT DU STAGE :

Une partie du stage consiste donc à établir une qualification spécifiant de manière univoque le taux de ferrite maximal acceptable dans le métal, et dont la susceptibilité ne perturbera pas trop le champ magnétique. Ceci afin de pouvoir mettre en rapport le pourcentage de ferrite et la susceptibilité magnétique. En effet, connaissant la limite maximale de susceptibilité, la limite maximale de ferrite pourra alors en être déduite.

La seconde partie consiste à étudier la relation existante entre la susceptibilité magnétique et le taux de ferrite.

Une troisième partie visera à établir une qualification de mode opératoire de soudure (Q.M.O.S.) pour l'éprouvette DESHORS.

III LES MATERIAUX :

Plusieurs types de métaux sont utilisés, selon leur utilisation prévue :

Pour les raisons citées précédemment, le métal de base utilisé sera un acier austénitique inoxydable type 304L. A partir de sa composition (tableau ci dessous), son positionnement dans le diagramme de Schaeffler (cf annexe) peut être déterminé.

Les métaux d'apport :

Les tableaux ci dessous regroupent les compositions chimiques des métaux utilisés :

Valeurs données en pourcentage massique :

304L (MB)	C	Ni	Cr	Mn	Si	P	S	N	Mo
	<0.03	8 à 12	18 à 20	2.00	<1.00	<0.04 5	<0.03 0		

Métaux d'apport de l'échantillon C.E.R.N. :

1.4455 (MA)	C	Ni	Cr	Mn	Si	P	S	N	Mo
	0.01	16.3	20	7.3	0.36	0.01	0.15	0.154	2.75

317L (MA)	C	Ni	Cr	Mn	Si	P	S	N	Mo
	0.02	16.35	19.10	5.08	0.34	0.017	0.008	0.15	4.12

Métal d'apport de l'échantillon GIOVANOLA :

1.4453 (MA)	C	Ni	Cr	Mn	Si	P	S	N	Mo
	< 0.05	15 à 17.5	16 à 20	4 à 7.5	<1.5				

Métal d'apport de l'échantillon DESHORS :

308L (MA)	C	Ni	Cr	Mn	Si	P	S	N	Mo
	0.02	10.85	18.48	1.39	0.76	0.012	0.003		0.090

Une étude de propreté du métal de base a été menée et a donnée les résultats suivants :

Comptage inclusionnaire sur l'échantillon le métal de base de GIOVANOLA
Horizontal:

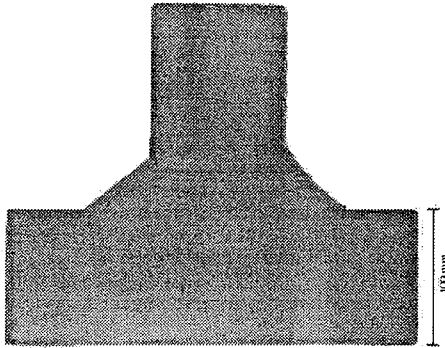
<i>CLASSE :</i>	A	B	C	D
1/2	2	13	10	65
1	0	4	1	196
1.5	0	1	0	29
2	0	0	0	1
2.5	0	0	0	0
Blanc	8			
			Nombre total de champs observés :	330

Comptage effectué à G=100x selon la norme ASTM E45-97

IV LES EPROUVETTES DE SOUDAGE:

Trois éprouvettes ont été réalisées afin de vérifier la faisabilité de soudures épaisses et à bas taux ferritique en milieu industriel :

4.1 Qualification du mode de soudure C.E.R.N. :



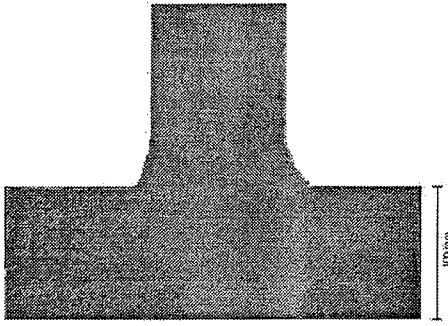
Une soudure M.I.G. (Metal Inert Gaz) en T a été réalisée (selon la norme NF EN 288.3) sur deux tôles de 100 mm en acier inoxydable type 304L. Les deux métaux d'apport utilisés sont un 1.4455 pour la soudure gauche, et un 317L pour la soudure droite

Ils ont été choisis en fonction des connaissances acquises par le C.E.R.N. par le passé, ainsi que pour leur capacité à ne pas précipiter de ferrite pour des raisons de magnétisme.

Une pré qualification effectuée par J. HAFFNER a permis de constater que les deux soudures sont totalement austénitiques et qu'il y avait environ deux fois plus de défauts (gouttes froides et fissuration à chaud) dans le métal d'apport 317L que dans le 1.4455. L'éprouvette a également permis d'évaluer le taux de ferrite du métal de base.

La soudure n'ayant pas pénétré, l'interface entre les deux tôles pose des problèmes de contrôle non destructif. Le contrôle par radiographie n'ayant pas été retenu à cause de l'épaisseur importante et de la nature du matériau utilisé, le contrôle par ultra son a été retenu. L'interface empêche cependant le contrôle par cette méthode.

4.2 Qualification du mode de soudure GIOVANOLA :



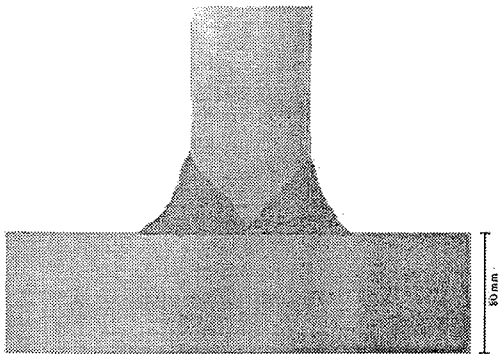
Cette éprouvette de soudage vise à tester la méthode de soudure sous flux, plus rapide mais non disponible au C.E.R.N.

Une soudure sous flux sur un chanfrein en V a été réalisée sur deux tôles de 100 mm en acier type 304L. Le métal d'apport utilisé est un 1.4453 et à également la propriété de ne pas précipiter de ferrite.

Après étude par le laboratoire, il a été constaté que la soudure n'a pas totalement pénétré. C'est une soudure totalement austénitique : elle a donc des défauts (gouttes froides et fissuration à chaud).

La nuance du métal de base utilisé était la même que celle du C.E.R.N., mais provenait d'une coulée différente. Or, une étude du taux de ferrite a permis de remarquer qu'il y avait environ deux fois plus de ferrite dans cet échantillon (env. 6%) que dans celui du C.E.R.N.

4.3 L'éprouvette DESHORS :



Ayant vu la non faisabilité de soudures acceptables sans ferrite, le C.E.R.N. a essayé de limiter le taux de ferrite en faisant appel à l'expérience industrielle d'une entreprise réputée.

Le C.E.R.N. n'a imposé que deux paramètres à la firme : l'utilisation d'un métal de base type 304L et un taux de ferrite minimal. Initialement, le taux était fixé à 1%, mais a été relâché car le métal de base, dont le volume est beaucoup plus important, contient plus de ferrite. Les autres paramètres étant laissés au libre choix selon les connaissances de la firme.

DESHORS a choisi d'effectuer une soudure M.I.G. sur un chanfrein en V en utilisant un fil fourré 308L comme métal d'apport. (connu pour précipiter 5 à 10% de ferrite).

Une visite de l'entreprise DESHORS, suivie d'une discussion technique a eu lieu afin d'étudier les résultats obtenus par la société, et mieux connaître les capacités de celle ci.

Les résultats obtenus sont très satisfaisants puisque la société chargée du contrôle (A.I.F.) n'a détecté aucun défaut. J'ai cependant repéré une goutte froide à la racine de la soudure, mais dont la taille est tolérée par la norme de critère d'acceptation.

Le taux de ferrite contenu dans les soudures est satisfaisant (5% en moyenne, 7% maximum en racine), même s'il est supérieur au 1% demandé initialement.

4.4 Conclusions sur les éprouvettes :

Ces éprouvettes ont permis de mettre en évidence que :

- Le métal de base contient systématiquement de la ferrite, dont le profil typique est un double pic puisque le métal provient de la coulée continue. Sur un acier type 304L, le taux de ferrite peut varier du simple au double selon la coulée.
- Sur des épaisseurs de soudure aussi importantes, un minimum de ferrite est nécessaire afin d'éviter un phénomène de fissuration à chaud.
- La réalisation est possible en milieu industriel, sans prendre de précautions particulières (salle blanche, ...). Cependant, DESHORS a attiré notre attention sur le fait que la température entre passes ne doit pas dépasser les 120°C afin de minimiser le taux de ferrite. Ceci peut donc avoir une conséquence importante sur le temps de soudage.

V LES MOYENS DE DÉTECTION DE LA FERRITE :

La ferrite étant l'élément le plus magnétique du métal de base utilisé et des soudures, sa quantification est donc nécessaire.

Le C.E.R.N. dispose pour cela de deux techniques de détection de la ferrite, par voie destructive ou par voie non destructive.

	Méthode non destructive	Méthode destructive
Méthode directe	magnétomètre 1.068	balance magnétique C.E.R.N.
Méthode indirecte	ferritoscope MP3C	l'analyse d'images

La méthode directe donne directement une mesure de la susceptibilité, tandis que la méthode indirecte permet d'obtenir la susceptibilité en fonction du taux de ferrite à l'aide des corrélations établies.

5.1 TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES :

Elle fait appel à deux appareils portables qui en font une méthode pratique, rapide et efficace.

5.1.1 Le ferritoscope MP3C:

C'est un appareil portable qui permet de donner une mesure directe du taux de ferrite des aciers duplex et austénitiques selon la norme DIN 50981 . La sonde utilisée permet de déterminer un taux de ferrite compris entre 0 et 80%.

Le principe de la mesure est l'induction magnétique. Le taux de ferrite est obtenu à partir de la perméabilité magnétique.

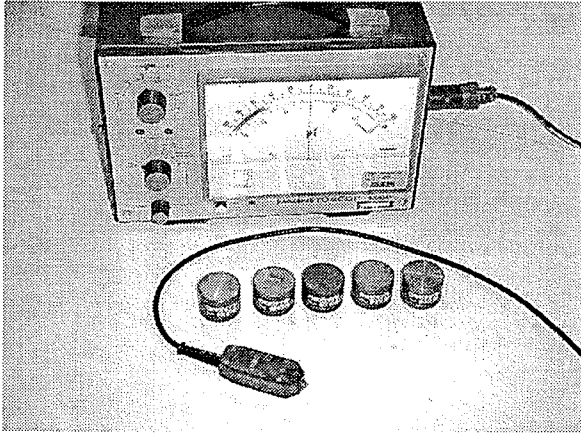
Avant chaque mesure, l'appareil est calibré à l'aide d'un jeu d'étalons.

La résolution latérale de l'appareil est d'environ 3mm, ce qui lui permet d'effectuer des mesures relativement ponctuelles.

Pour effectuer une mesure, il suffit d'étalonner l'appareil, puis d'appliquer la sonde au point de mesure. L'appareil était programmé de manière à lire un résultat en pourcentage de ferrite.

Le ferritoscope a permis d'étudier le profil de la ferrite sur les 3 éprouvettes, ainsi que de mesurer le taux moyen présent dans les soudures.

5.1.2 Le Magnétomètre 1.068 DR. Förster :



C'est un appareil portable qui permet des mesures de susceptibilité, grandeur nécessaire à connaître puisque c'est elle qui perturbera le champ magnétique. Il travaille à un champ de 0,1 T. et le palpeur de perméabilité utilisé mesure une susceptibilité comprise entre 1,01 et 2,00.

Avant chaque mesure, l'appareil est calibré à l'aide d'un étalon.

Le principe de la mesure est l'induction magnétique.

La résolution latérale de l'appareil est assez faible (env. 7mm) et donne des courbes très moyennées. La susceptibilité mesurée au niveau des pics est donc sous-estimée puisque les valeurs maximales sont très ponctuelles.

Tout comme le ferritoscope, il suffit de placer le palpeur au point de mesure pour obtenir la susceptibilité. Il faut cependant vérifier sur quel facteur d'amplification est l'appareil afin de savoir sur quelle échelle la valeur doit être lue.

5.2 TECHNIQUES DESTRUCTIVES :

Elle fait appel à deux appareils qui nécessitent des échantillons prélevés dans la matière. Ce n'est donc pas une méthode qui permet des mesures rapides.

5.2.1 la balance magnétique C.E.R.N. :

Une partie de l'étude a été effectuée à l'aide de la balance magnétique. C'est un instrument qui mesure la susceptibilité magnétique relative d'un échantillon. Cette susceptibilité est une propriété intrinsèque au matériau et caractérise l'aptitude de celui-ci à s'aimanter en présence d'un champ magnétique.

La mesure de susceptibilité se fait selon le principe de la sécante : la susceptibilité est obtenue par la différentielle de la droite passant par l'origine et le point de champ B.

Principe : Le fonctionnement est basé sur la mesure de la force agissant sur l'échantillon lorsqu'il est placé dans un champ magnétique connu. Connaissant la force (variation de masse) exercée, on peut en déduire la susceptibilité à l'aide de l'équation suivante :

$$\mu = 1 + \chi \quad \text{et} \quad \chi = \frac{10.k.F}{V}$$

μ est la perméabilité magnétique, χ est la susceptibilité magnétique relative.

Le volume V peut être déterminé à l'aide du poids et de la masse volumique.

k est une constante pré établie et caractéristique à chaque champ.

F est la différence de poids entre celle mesurée pour un champ donné et celle sans champ.

Appareil de mesure:

Une source de courant alternatif (250 V) suivit d'un redresseur pour obtenir une tension continue alimente deux électroaimants à pôles tronconiques. Ces pôles peuvent produire un champ magnétique variant de 0 à 10^4 Oe, soit 0 à 1 T. Un circuit d'eau permet de refroidir les 4900 tours de fil de cuivre de chaque bobine.

Pour mesurer les différences de masse, une balance mécanique sensible à 10^{-7} Kg soutient un tube en verre dans lequel se trouve l'échantillon mesuré.

Un potentiomètre et un ampèremètre permettent de faire varier le champ magnétique.

Les échantillons :

Les échantillons utilisés pour la balance magnétique sont standards et font l'objet d'une attention toute particulière lors de la mise en oeuvre. Ce sont des échantillons cylindriques de 2 mm de diamètre par 3 mm de haut. Lors de l'usinage, la dernière passe doit retirer 0.2 mm de matière. Ceci afin de ne pas écrouir la surface du cylindre et qui entraînerait une modification de la susceptibilité.

Après réception, les échantillons subissent une attaque chimique permettant de retirer la couche superficielle qui aurait pu être écrouie par l'opération d'usinage (transformation martensitique).

Déroulement des mesures :

Le premier stade de la mesure consiste à vérifier que la balance est étalonnée, puis que l'échantillon est bien positionné par rapport aux électroaimants.

Après avoir pesé le tube à vide, une seconde mesure avec le tube contenant l'échantillon permettra de connaître la masse de l'échantillon, puis son volume. Ces deux mesures s'effectuent pour un champ magnétique nul.

La masse de l'échantillon est ensuite mesurée pour un champ de 800, 2150, 3450, 4650, 5450 puis 6150 Oe.

Ces données sont ensuite traitées sous Excel pour obtenir la susceptibilité relative des échantillons.

5.2.2 l'analyse d'images :

C'est une méthode moderne qui utilise l'analyse d'images. Un microscope est relié à un ordinateur par une caméra, et l'image est traitée informatiquement. L'utilisation d'un programme approprié permet de faire de nombreuses analyses différentes telles que :

- la mesure de porosité.
- la mesure d'inclusions.
- la mesure du taux de ferrite.

C'est cependant une méthode longue car elle nécessite le polissage des échantillons, qui est d'autant plus long que la surface à polir est importante.

Une fois parfaitement poli, l'échantillon subit une attaque Murakami, qui permet d'observer la ferrite.

Les échantillons, polis et attaqués, peuvent alors être observé au microscope optique.

Méthode d'observation :

La mesure du taux de la ferrite se fait généralement en fond noir car cela facilite son observation. Le programme demande une valeur de RGB (Red Green Blue), ce qui permet de considérer les différentes nuances de gris comme étant ou non de la ferrite. La valeur de RGB doit être constante pour un même grossissement mais peut varier lors du changement d'objectif.

Des mesures ont été effectuées à 200x et à 500x et m'ont permis de choisir de faire les observations à un grossissement de 500x. Les observation faites à 200x sont majorées de 30% par rapport à la valeur lue au ferritoscope, mais est représentative des valeurs mesurées au ferritoscope. L'observation du déroulement du programme m'a permis de conclure sur ce choix, car le programme considère à 500x certaines inclusions comme étant de la ferrite.

Les observations ont été effectuées sur les échantillons utilisés par la balance magnétique. Cela a permis d'associer sans équivoque le taux de ferrite observé au microscope à la susceptibilité relative mesurée à la balance magnétique C.E.R.N.

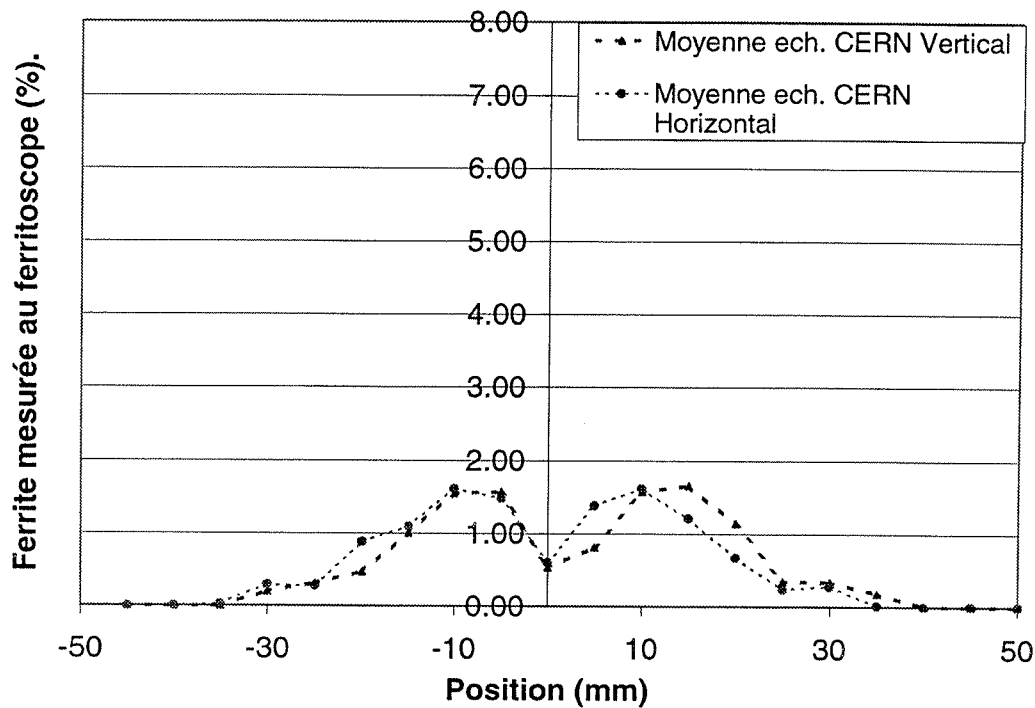
Les échantillons ont été choisi de manière à couvrir tout les pourcentages de ferrite dont je disposais.

6.1 Les mesures de ferrite par ferritoscope :

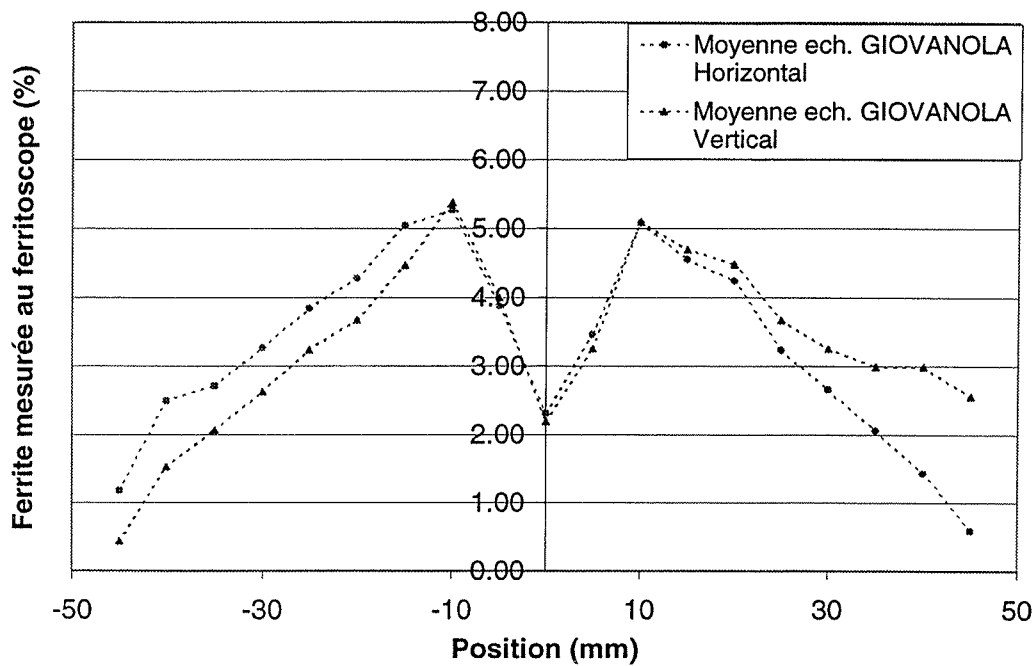
Ces mesures ont permis d'observer le profil typique de la répartition de la ferrite dans le métal de base des trois éprouvettes. Ce double pic est du à la coulée continue. Les mesures ont été effectuées sur les trois éprouvettes, avec un pas régulier de 5mm.

Les mesures ont été effectuées sur 3 lignes situées à 18, 23 et 28 mm des extrémités.

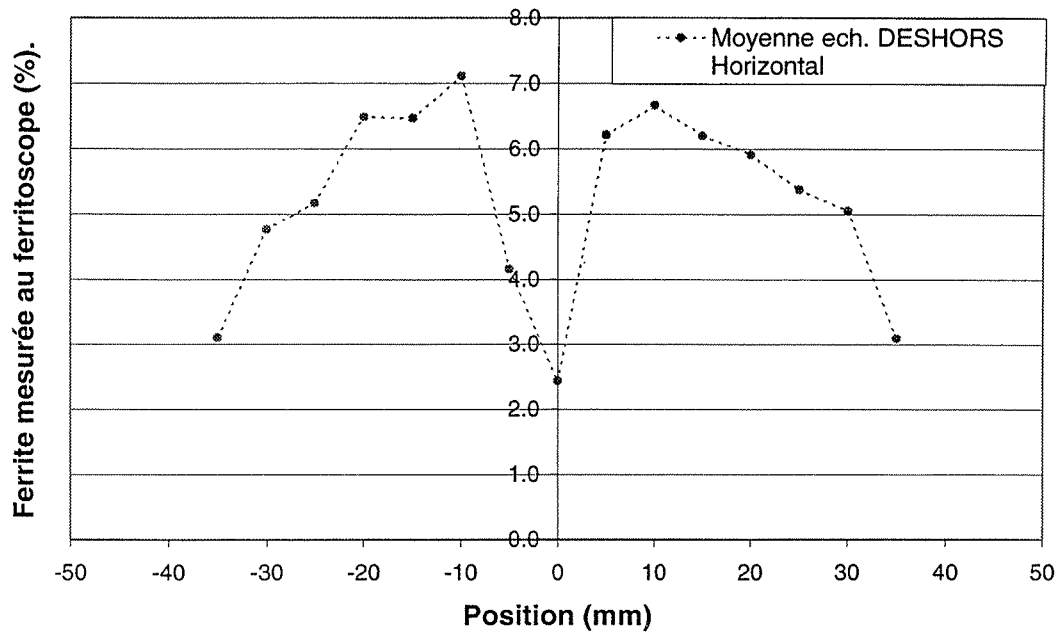
Bien que la nuance du métal de base soit le même, le pourcentage de ferrite varie beaucoup entre les éprouvettes et peut monter jusqu'à 7% (échantillon DESHORS).



Evolution du taux de ferrite à travers l'épaisseur du métal de base de l'échantillon C.E.R.N.



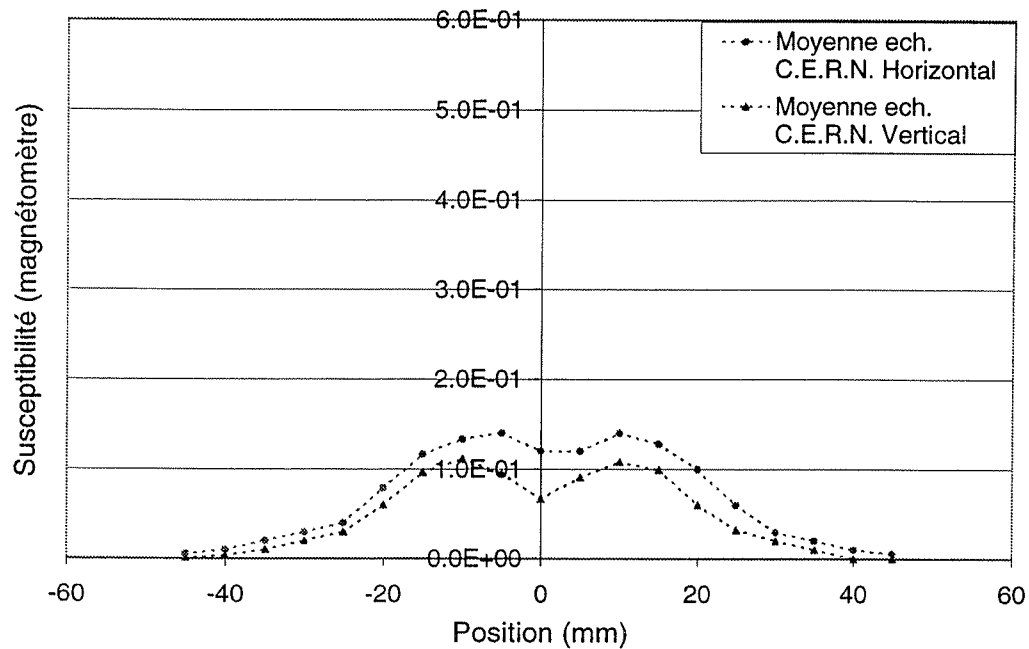
Evolution du taux de ferrite à travers l'épaisseur du métal de base de l'échantillon GIOVANOLA.



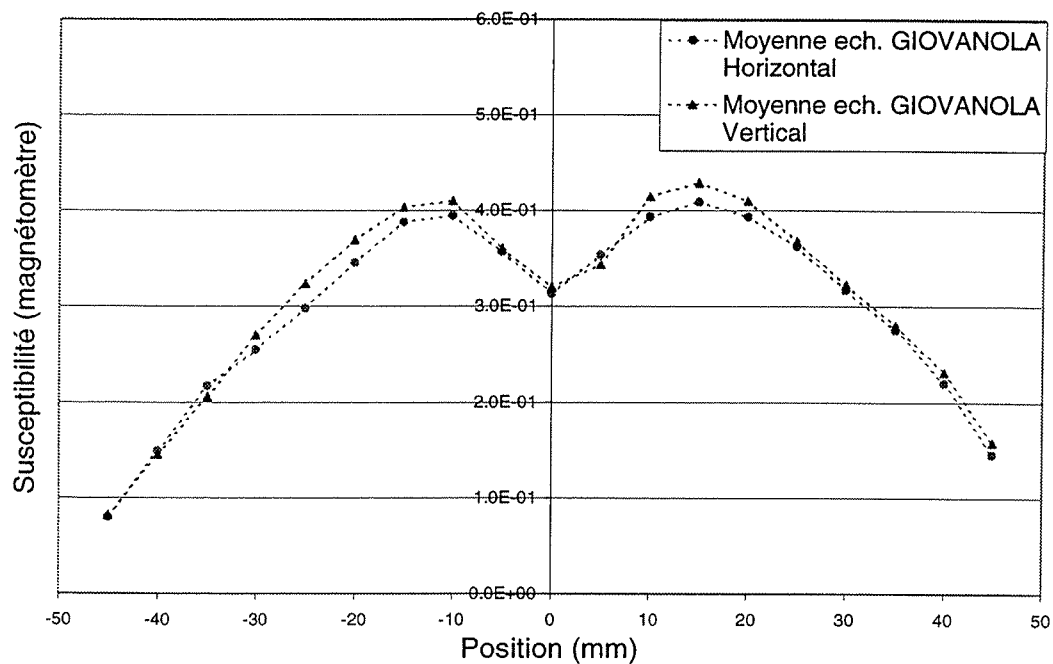
Evolution du taux de ferrite à travers l'épaisseur du métal de base de l'échantillon DESHORS.

6.2 Les mesures de susceptibilité au magnétomètre :

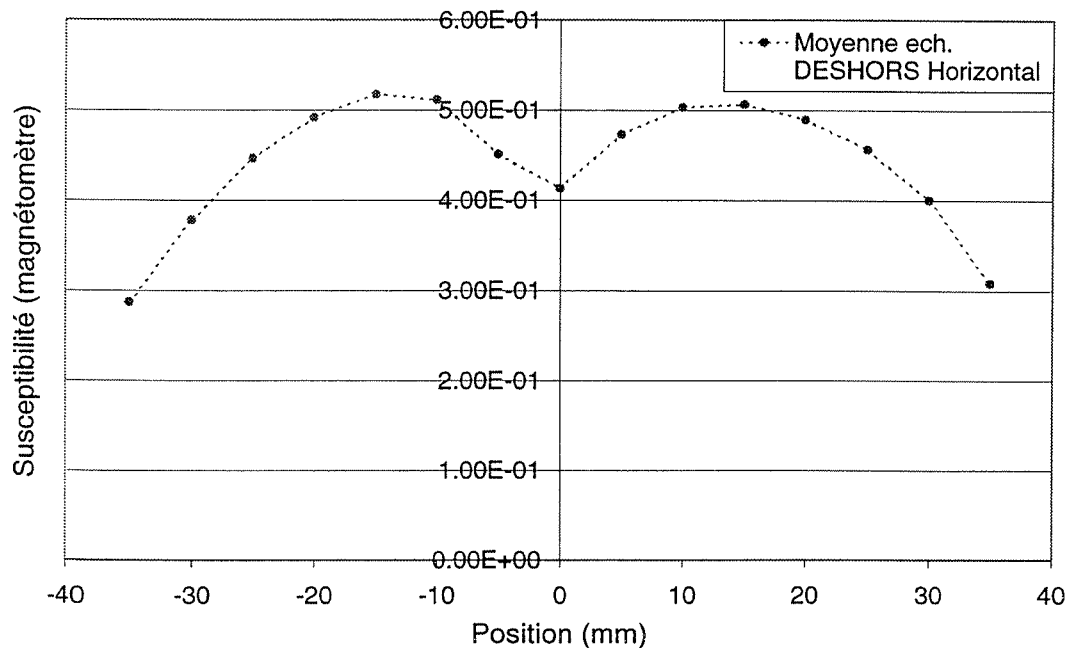
Les mesures ont été réalisées sur les mêmes points que ceux utilisés par le ferritoscope, soit sur 3 lignes situées à 18, 23 et 28 mm des extrémités des trois éprouvettes. Les points de mesure sont espacés de 5 mm.



Evolution de la susceptibilité relative mesurée avec le magnétomètre à travers l'épaisseur du métal de base de l'échantillon C.E.R.N.



Evolution de la susceptibilité relative mesurée avec le magnétomètre à travers l'épaisseur du métal de base de l'échantillon GIOVANOLA.



Evolution de la susceptibilité relative mesurée avec le magnétomètre à travers l'épaisseur du métal de base de l'échantillon DESHORS.

6.3 Les mesures de susceptibilité à la balance magnétique :

Les échantillons ont été fabriqués par une firme extérieure au C.E.R.N.

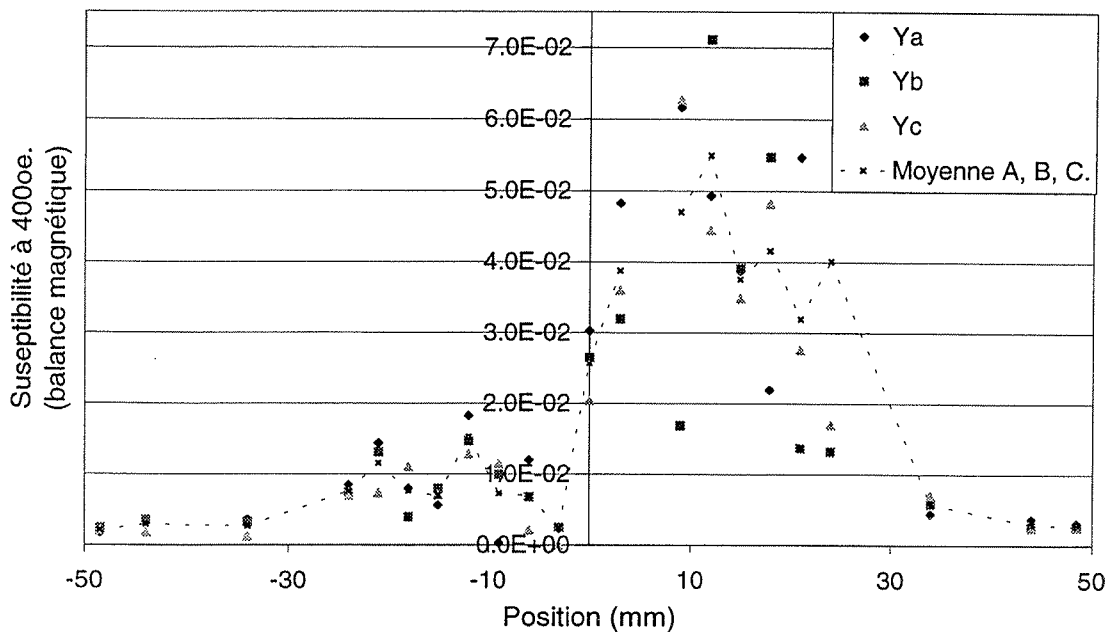
Ils ont été prélevés selon un plan de découpe ci-joint en annexe.

Les valeurs utilisées pour construire le graphique ont été mesurées à 400 Oe. car la balance magnétique sature pour certains échantillons dont le taux de ferrite est trop important.

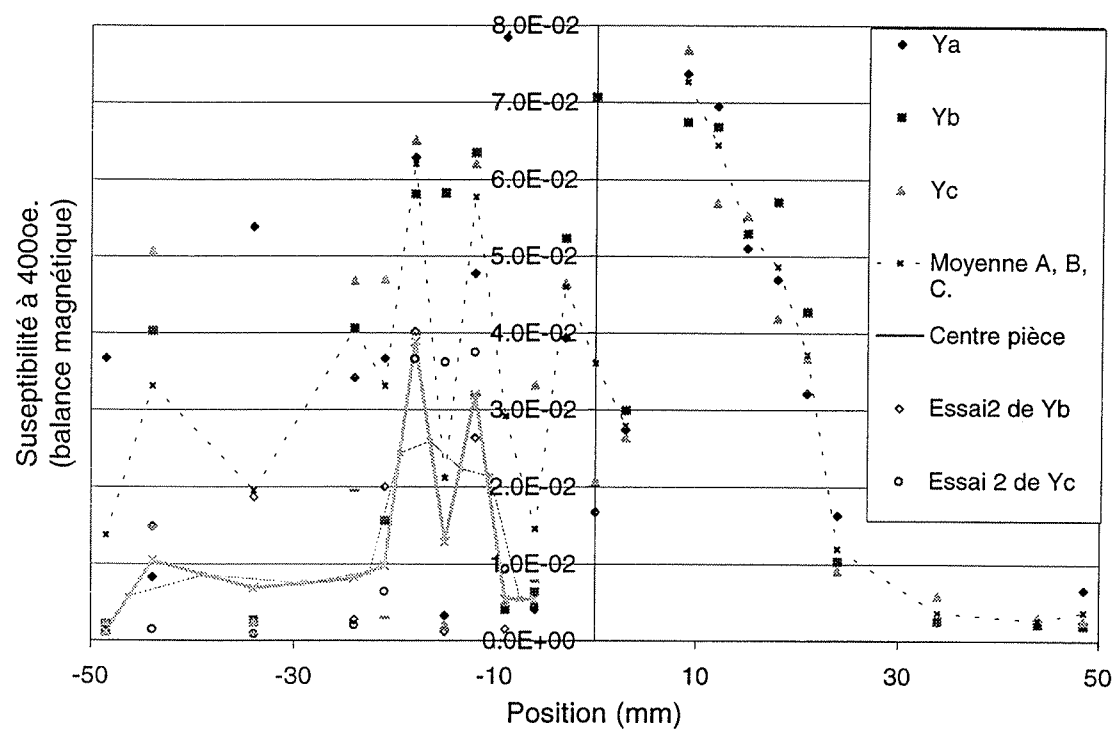
La précision de la balance à 400 Oe (plus faible intensité) étant faible, des courants d'air ou des variations de température peuvent modifier considérablement les valeurs.

Seules les mesures sur l'échantillon C.E.R.N. ont été possibles car l'éprouvette GIOVANOLA contient trop de ferrite et provoque immédiatement la saturation de la balance magnétique.

Ces mesures sont inexploitable en raison de la trop grande dispersité des points. Cette mesure n'est donc pas fiable.



Evolution de la susceptibilité relative mesurée à 400 Oe avec la balance magnétique selon de plan de découpe en annexe.



Evolution de la susceptibilité relative mesurée à 400 Oe avec la balance magnétique selon de plan de découpe en annexe.

6.4 Discussion des résultats :

Mesure de ferrite par ferritoscope :

La variation du taux de ferrite dans le profil du métal de base nous permet de constater la présence systématique du double pic, phénomène due à la coulée en continue.

Le taux de ferrite présent dans le métal de base varie d'un facteur 2, bien que la nuance utilisée pour la fabrication des trois éprouvettes soit la même. Cela signifie donc que le taux de ferrite est difficilement contrôlable. De plus, le métal de base ayant été fourni par le magasin matière du C.E.R.N., cela signifie donc qu'il faut prendre des précautions et faire des contrôles.

Mesure de ferrite par magnétomètre :

La mesure de susceptibilité relative au magnétomètre nous permet de retrouver le double pic. Cette constatation était prévisible puisque le taux de ferrite et la susceptibilité sont liés.

La susceptibilité maximale est de $5.2 \cdot 10^{-1}$ et correspond à un taux de ferrite de 6.1%.

Le magnétomètre peut s'avérer très utile pour mesurer des susceptibilités importantes et de manière non destructive. Il ne faut cependant pas oublier qu'il a une faible résolution latérale et la valeur affichée est donc certainement sous estimée au niveau des pics.

Mesure de susceptibilité relative avec la balance magnétique C.E.R.N.:

Les mesures effectuées par la balance magnétique donne des valeurs très dispersées. Seule une partie de chaque courbe est exploitable.

A cause de la rapide saturation de la balance, les mesures effectuées à 800 Oe. subissent une erreur relative importante, qui peut être due à différents paramètres extérieurs.

La balance nécessiterait cependant d'être recalibrée avant d'effectuer d'autres séries de mesures car les résultats obtenus sont difficilement exploitables.

Les parties utilisables des courbes montrent cependant le début du double pic, placé au bon endroit.

Corrélation quantitative entre le ferritoscope et le magnétomètre:

Ce graphique permet une corrélation entre les deux appareils de la méthode non destructive et permet d'associer taux de ferrite et susceptibilité. En effet, bien que l'on cherche à évaluer le taux de ferrite, le but est de déterminer la susceptibilité du métal de base.

L'utilisation des trois éprouvettes a permis d'obtenir la corrélation pour un taux de ferrite allant jusqu'à 7%.

Nous pouvons constater que les points sont peu dispersés pour un taux ferritique inférieur à 2%, mais que les résultats sont plus dispersés au dessus de ces 2%.

Les coefficients de la courbe de tendance obtenus sont certainement sous estimés à cause de la faible résolution latérale du magnétomètre.

La courbe donnée par la littérature, donnant la susceptibilité magnétique relative en fonction du pourcentage de ferrite [X], sous estime les valeurs mesurées.

Corrélation entre le ferritoscope et le Quantimet 600S :

Cette relation démontre que le ferritoscope et le Quantimet fournissent des mesures similaires puisque l'on obtient une courbe de tendance unitaire.

On peut remarquer que le nuage de points est peu dispersé pour un faible taux de ferrite (<1.5%) et que les mesures pour un taux supérieur à 2% entraîne une approximation du résultat.

Cette corrélation permettra de connaître le taux de ferrite facilement et avec fiabilité par le ferritoscope, sans passer par une méthode destructive.

Il est préférable de faire des mesures du taux de ferrite à un grossissement de 200x, car le logiciel ne comptabilise plus les taches et inclusions comme étant de la ferrite. Les mesures sont plus rapides et plus fiables.

Corrélation entre la susceptibilité et le taux de ferrite :

La balance magnétique saturant très rapidement et les points étant très dispersés, cette courbe est simplement donnée pour information.

Nous pouvons observer un nuage de points peu dispersés juste pour de faible pourcentage de ferrite (<0.6%)

La balance nécessiterait d'être recalibrée avant d'être réutilisée.

6.5 Corrélation quantitative entre le ferritoscope et le magnétomètre:

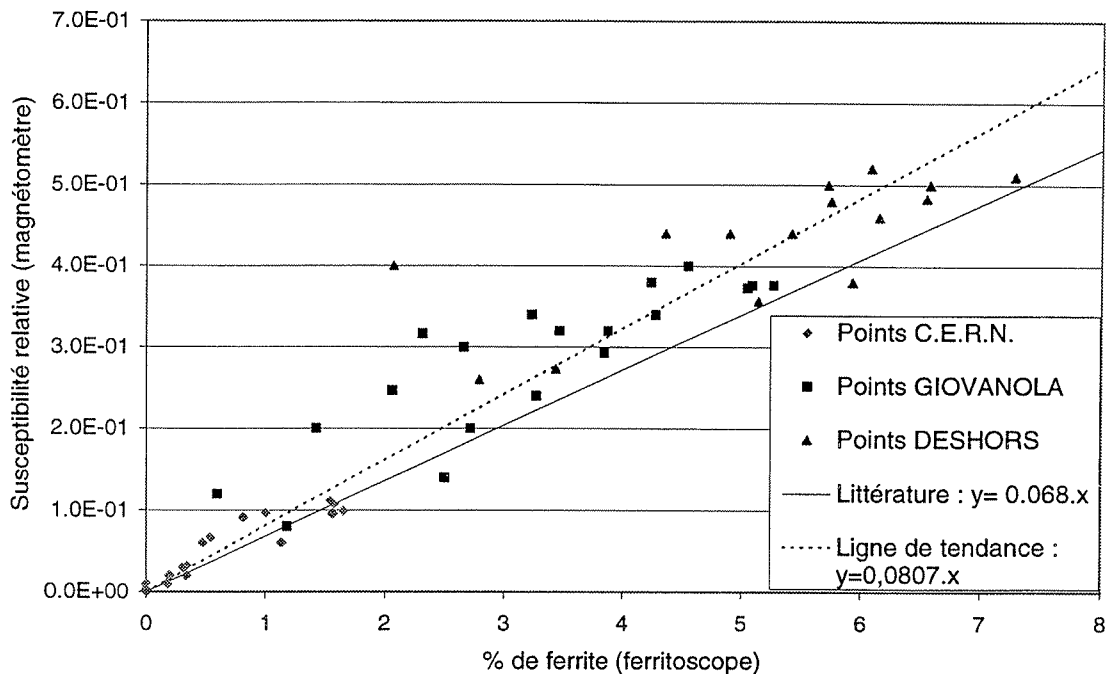
Ce graphique permet une corrélation entre les deux appareils de la méthode non destructive et permet d'associer taux de ferrite et susceptibilité. En effet, bien que l'on cherche à évaluer le taux de ferrite, le but est de déterminer la susceptibilité du métal de base.

L'utilisation des trois éprouvettes a permis d'obtenir la corrélation pour un taux de ferrite allant jusqu'à 7%.

Nous pouvons constater que les points sont peu dispersés pour un taux ferritique inférieur à 2%, mais que les résultats le sont plus au dessus de ces 2%.

Les coefficients de la courbe de tendance obtenus sont certainement sous estimés à cause de la faible résolution latérale du magnétomètre.

La courbe donnée par la littérature, donnant la susceptibilité magnétique relative en fonction du pourcentage de ferrite, sous estime les valeurs mesurées.



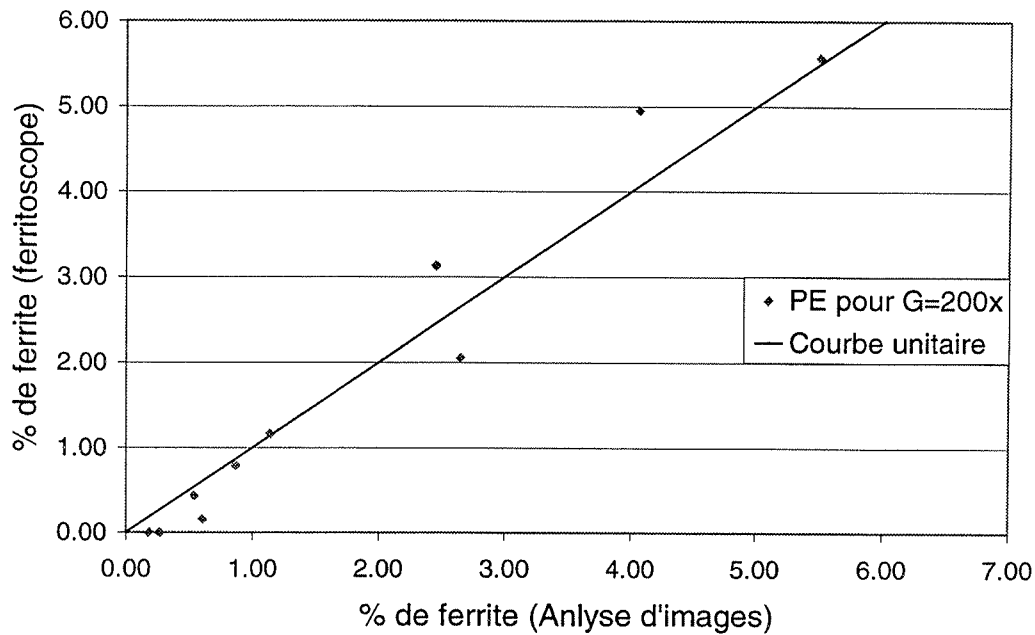
Corrélation entre le pourcentage de ferrite mesuré au ferritoscope et la susceptibilité mesurée au magnétomètre.

6.6 Corrélation entre le ferritoscope et l'analyse d'images :

Cette relation démontre que le ferritoscope et le Quantimet fournissent des mesures similaires puisque l'on obtient une courbe de tendance unitaire.

On peut remarquer que le nuage de points est peu dispersé pour un faible taux de ferrite (<1,5%) et que les mesures pour un taux supérieur à 2% entraînent une approximation du résultat.

Cette corrélation permettra de connaître facilement le taux de ferrite et avec fiabilité, sans passer par une méthode destructive.



VII CONCLUSIONS :

Cette étude a démontré que souder des pièces en inox sur des épaisseurs aussi importantes nécessite de prendre quelques précautions, mais pouvait se faire de manière industrielle.

Le métal de base type 304L contient de la ferrite, dont le taux est variable selon les coulées. Ceci nécessite des contrôles car il y a un facteur deux entre les variations mesurées.

Un faible pourcentage de ferrite entraîne systématiquement la présence de fissuration à chaud. Il est donc nécessaire d'utiliser un métal d'apport prévu pour précipiter de la ferrite (env. 6%) afin d'éliminer le problème de la fissuration à chaud.

La pratique d'un chanfrein en V à pleine pénétration car cela facilite le contrôle.

Ces mesures ont permis d'établir des corrélations entre les différents appareils permettant, de manière directe ou indirecte, de connaître la susceptibilité des pieds.

Ces méthodes permettront de faire des mesures rapides non destructives sur les soudures effectuées.

Concernant les appareils de mesure, il faut savoir que :

- La balance magnétique devra être recalibrée avant d'être réutilisée car les mesures sont trop dispersées.
- Le magnétomètre permet de mesurer la susceptibilité sur une gamme beaucoup plus importante que la balance.
- Le ferritoscope est donc étalonné et sera très utile pour ses mesures fiables, rapides et non destructives.
- La méthode par analyse d'images permet plusieurs type de mesures (taux de ferrite, inclusions, ...) qui pourront être utile pour caractériser le métal de base à sa réception.

L'étude a démontré que pour un maximum de ferrite (6.1%), la susceptibilité atteint $5.2 \cdot 10^{-1}$. Cette valeur peut être critique pour le détecteur et perturber le champ. La susceptibilité maximale autorisée reste cependant encore à définir, mais cette étude permettra de spécifier de façon univoque le taux maximal de ferrite acceptable.

VIII BIBLIOGRAPHIE :

NF EN 25817 Nov. 92 Assemblage en acier soudés à l'arc : guide des niveaux d'acceptation des défauts.

NF EN 26520 Fev. 92 Classification des défauts dans les soudures par fusion des métaux, avec commentaires explicatifs.

NF EN 10088-2 Nov. 95 Aciers inoxydables : condition technique de livraison des toles et bandes pour usage général.

NF EN 288-3 Juin 92 Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques.

ASTM E 45 -97 Standart Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel.

Welding Research supplement jan. 97 Ferrite determination in Stainless Steel Welds – Advances since 1974.

Rapport n° 99/12/20. J. HAFFNER

Rapport n° 99/02/06. J. HAFFNER

Rapport de visite EST-SM/GAI/ph/2000-002 G. ARNAU

ANNEXES :

Annexes 1 et 2 : Qualification du Mode Opérateur de Soudage C.E.R.N.

Annexe 3 : Qualification du Mode Opérateur de Soudage. GIOVANOLA.

Annexes 4 à 7 : Qualification du Mode Opérateur de Soudage DESHORS.

Annexe 8 : Diagramme de SCHAËFFLER.

Welding specification

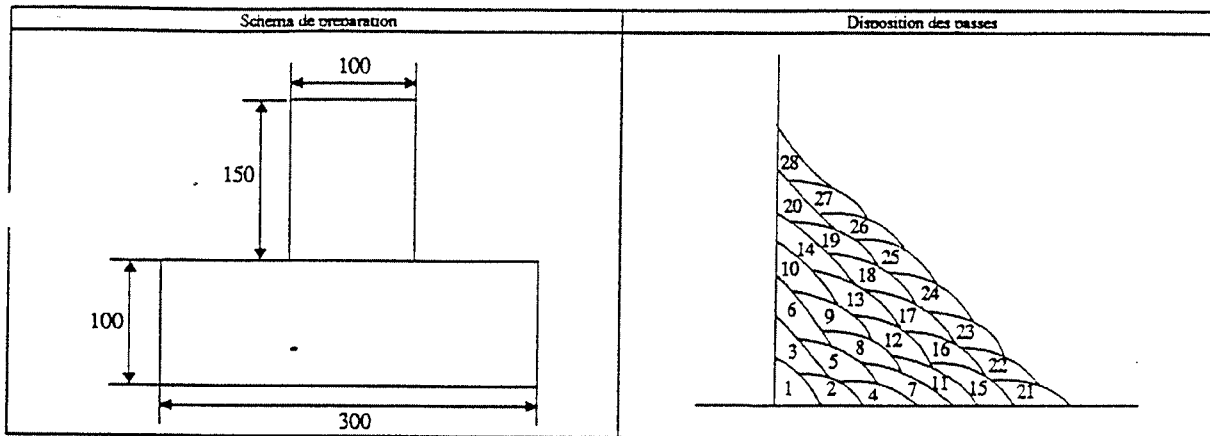
Descriptif de mode opératoire de soudage du constructeur ou du fabricant (DMOS)

Pieds ATLAS

Lieu : CERN
 DMOS référence n° : EST-MF 98-17 (seconde partie)
 PV-QMOS n° :
 Constructeur ou Fabricant : CERN
 Nom du soudeur : P. Garritty
 Procédé de soudage : 131
 Type de joint : FW
 Détail de préparation de joint (Schéma) :

EXAMINATEUR OU ORGANISME D'INSPECTION :

Méthode de préparation et nettoyage :
 Usinage, nettoyage alcool
 Spécification matériaux de base : 304 L
 Epaisseur du matériaux de base (mm) : 100
 Diamètre du matériaux de base (mm) : /
 Position de soudage de l'assemblage : PB



Paramètres de soudage :

passe n°	Procédé	Dimension métal d'apport	Courant (A)	Voltage (V)	Type de courant Polarité	Vitesse de fil (mm/min)	Vitesse d'avance (mm/min)
1 à 3	131	1.2 mm	251	28.7	/	9.3	280
4 à 28	131	1.2 mm	227	27.5	/	8.4	280

Métal d'apport : codification : Verk. 1.4455
 marque et type : NOVONIT
 Reprise spéciale ou séchage : /
 Gaz de protection / Flux : endroit : 4% CO₂ - 5% N₂ -
 reste Ar
 envers : /
 Débit de gaz (l / min.) : endroit : 18
 envers : /

Autres informations :

Passe No5 : Fusion de la buse cuivre, meulage des 100 derniers mm

Température entre passes

Passe	T °C	Passe	T °C	Passe	T °C	Passe	T °C
1	45	8	60	15	60	22	60
2	60	9	45	16	45	23	60
3	30	10	45	17	60	24	60
4	60	11	60	18	60	25	60
5	40	12	45	19	60	26	60
6	30	13	45	20	45	27	60
7	60	14	50	21	60	28	45

Type d'électrode / dimension : /
 Température de préchauffage : /
 Détail de gougeage ou de support envers : /
 Température entre passes : Voir "autres informations"
 Traitement thermique après soudage ou vieillissement : /
 Temps, température, méthode : /
 Vitesse de montée en température et refroidissement : /
 L'assemblage de qualification décrit ci-dessus a été soudé en présence de :

Constructeur ou fabricant Nom, date et signature	Examineur ou organisme d'inspection Nom, date et signature

Welding specification (cont.)

Descriptif de mode opératoire de soudage du constructeur ou du fabricant (DMOS)

Pieds ATLAS

Lieu : CERN

DMOS référence n° : EST-MF 98-17 (première partie)

PV-QMOS n° :

Constructeur ou Fabricant : CERN

Nom du soudeur : P. Garrity

Procédé de soudage : 131

Type de joint : FW

Détail de préparation de joint (Schéma) :

EXAMINATEUR OU ORGANISME D'INSPECTION :

Méthode de préparation et nettoyage :

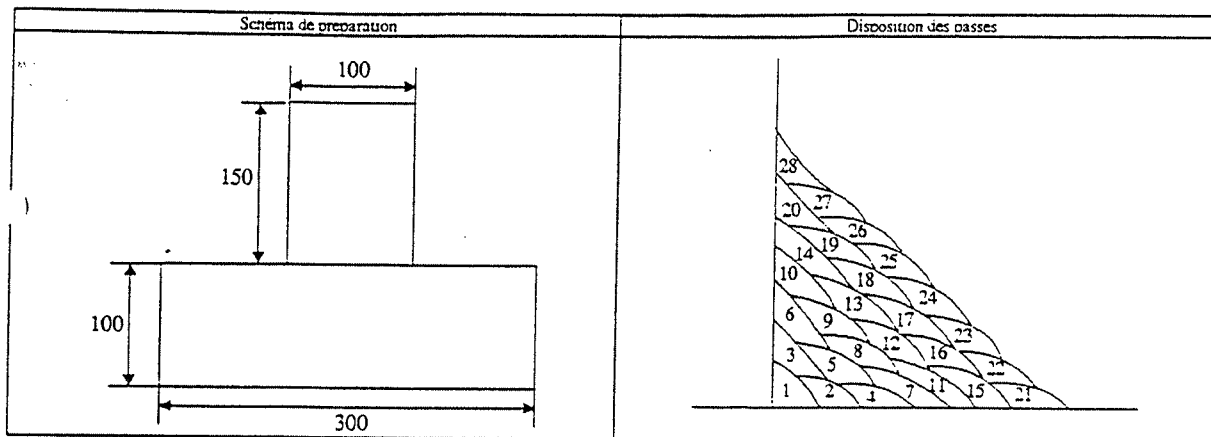
Usinage, nettoyage alcool

Spécification matériaux de base : 304 L

Epaisseur du matériaux de base (mm) : 100

Diamètre du matériaux de base (mm) : /

Position de soudage de l'assemblage : PB



Paramètres de soudage :

passe n°	Procédé	Dimension metal d'apport	Courant (A)	Voitage (V)	Type de courant Polarité	Vitesse de fil (m/min)	Vitesse d'avance (mm/min)
1 à 28	131	1,2 mm	227	27,3	/	8,3	280

Métal d'apport : codification : DIN 32526 MG

marque et type : BOHLER ASN5 IG

Reprise spéciale ou séchage : / 317L (N°5)

Gaz de protection / Flux : endroit : 1% O₂ - reste Ar
(CARGAL 1)

envers : /

Débit de gaz (l / min.) : endroit : 18

envers : /

Type d'électrode / dimension : /

Température de préchauffage : /

Détail de gougeage ou de support envers : /

Température entre passes : Voir "autres informations"

Traitement thermique après soudage ou vieillissement : /

Temps, température, méthode : /

Vitesse de montée en température et refroidissement : /

L'assemblage de qualification décrit ci-dessus a été soudé en présence de :

Autres informations :

Passe No13 : Défaut, meulage des 200 premiers mm

Température entre passes

Passe	T °C	Passe	T °C	Passe	T °C	Passe	T °C
1	45	8	40	15	60	22	60
2	60	9	45	16	45	23	60
3	30	10	45	17	60	24	60
4	60	11	60	18	60	25	60
5	40	12	45	19	60	26	60
6	30	13	45	20	45	27	60
7	60	14	45	21	60	28	45

Constructeur ou fabricant Nom, date et signature	Examineur ou organisme d'inspection Nom, date et signature

Désignation: *Cern - Epruvette de soudage*

Désignation: *Lern - Epreuve de soudage*

2000

Date: 8.7.99

Objet: 2 tôles ep 100 m Yuhari L 304

Remarque: soudage en pos. PA

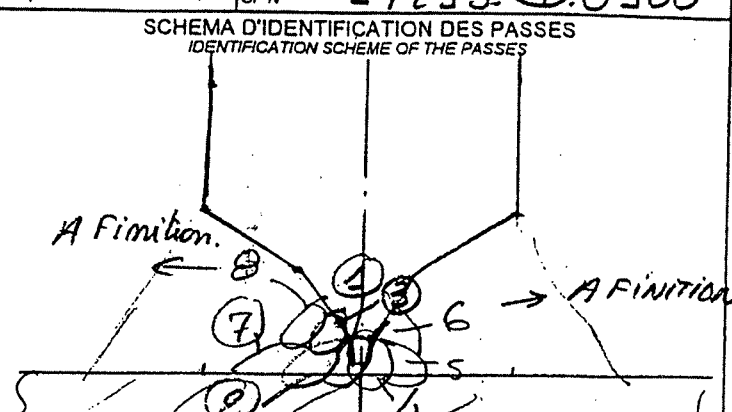
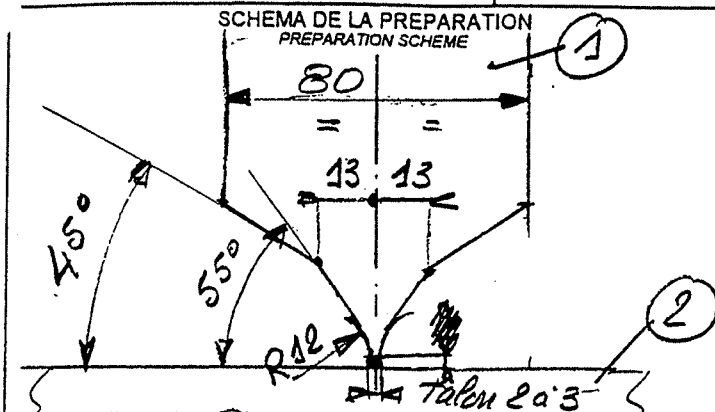
[illegible]

CLIENT
CUSTOMER

C. E. R. N

FICHE N°
OF N°

17213.D.0100

SCHEMA DE LA PREPARATION
PREPARATION SCHEMESCHEMA D'IDENTIFICATION DES PASSES
IDENTIFICATION SCHEME OF THE PASSESMETAL BASE
PARENT METAL

(1) 304 L (12) 304 L

TYPE et MODE D'ASSEMBLAGE
JOINT TYPE & DETAILS OF DE JOINT TYPE

P. FW. bs. mb

PREPARATION DES BORDS
PREPARATION OF THE EDGESOXYCOUPAGE
OXYGAS CUTTING☐ MEULAGE
GRINDING☐ USINAGE
MACHINING☒ AUTRES PROCÉDES
ANOTHER PROCESSNETTOYAGE ENTRE PASSES
CLEANING BETWEEN PASSES

Brossage + Meulage

ELIMINATION DE LA RACINE
ROOT ELIMINATION

oui AV reprise envers

N° PASSES
NUMBER OF PASSESPROCÉDE DE SOUDAGE
WELDING PROCESSPOSITION DE SOUDAGE
POSITION OF WELDSOUDAGE AUTO
WELDING PROCESSSOUDAGE OXYACÉTYLENIQUE
OXYACETYLENE WELDINGPRODUIT D'APPORT
FILLER METALFLUX DE PROTECTION
PROTECTIVE FLOWELECTRODE REFRACTAIRE - Ø
FUSE ELECTRODE - ØNATURE DU COURANT [-; =; LP]
TYPE OF CURRENTINTENSITE en A ±
AMPER INTENSITYTENSION en V ±
CHORD TENSIONVITESSE D'EXECUTION V D'UNE PASSE [cm/mn]
ADVANCING SPEEDVITESSE DE DEROULEMENT DU FIL [cm/mn]
WIRE FEED SPEEDENERGIE DE SOUDAGE MAXI en JOULES/cm [UxIx60/V]
MAX WELDING ENERGYTEMPERATURE DE PRECHAUFFAGE [en °C]
PREHEAT T°CTEMPERATURE ENTRE PASSES [en °C]
MAX T° INTER PASSPOSTCHAUFFAGE
POST HEATTEMPERATURE °C
T°CDUREE DU MAINTIEN
SOAKING TIMEN° PLAN
DRAWING N°REPERES SOUDURES
WELDINGS MARKSREDIGE PAR
WRITTEN BY

IND

DATE

NOM

VISA

N°

NORME
STANDARDQ M O S
OPERATING MODE QUALIFICATION"ACCORD D'UTILISATION"
"APPROVAL FOR USE"NOM
NAME

DATE

DATE

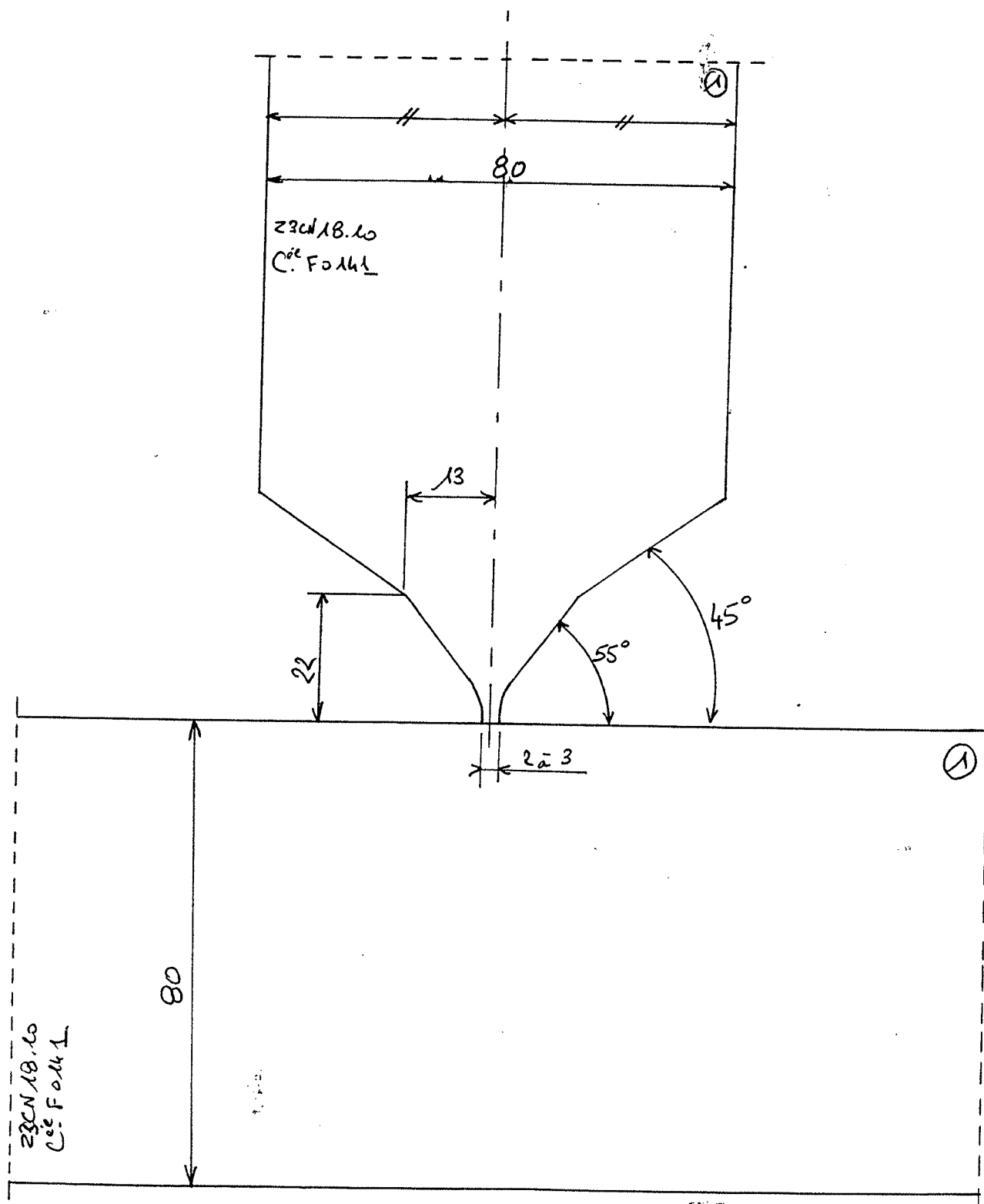
VISA

FS 04/98-1

FS 04/98-1

FS 04/98-1

FS 04/98-1

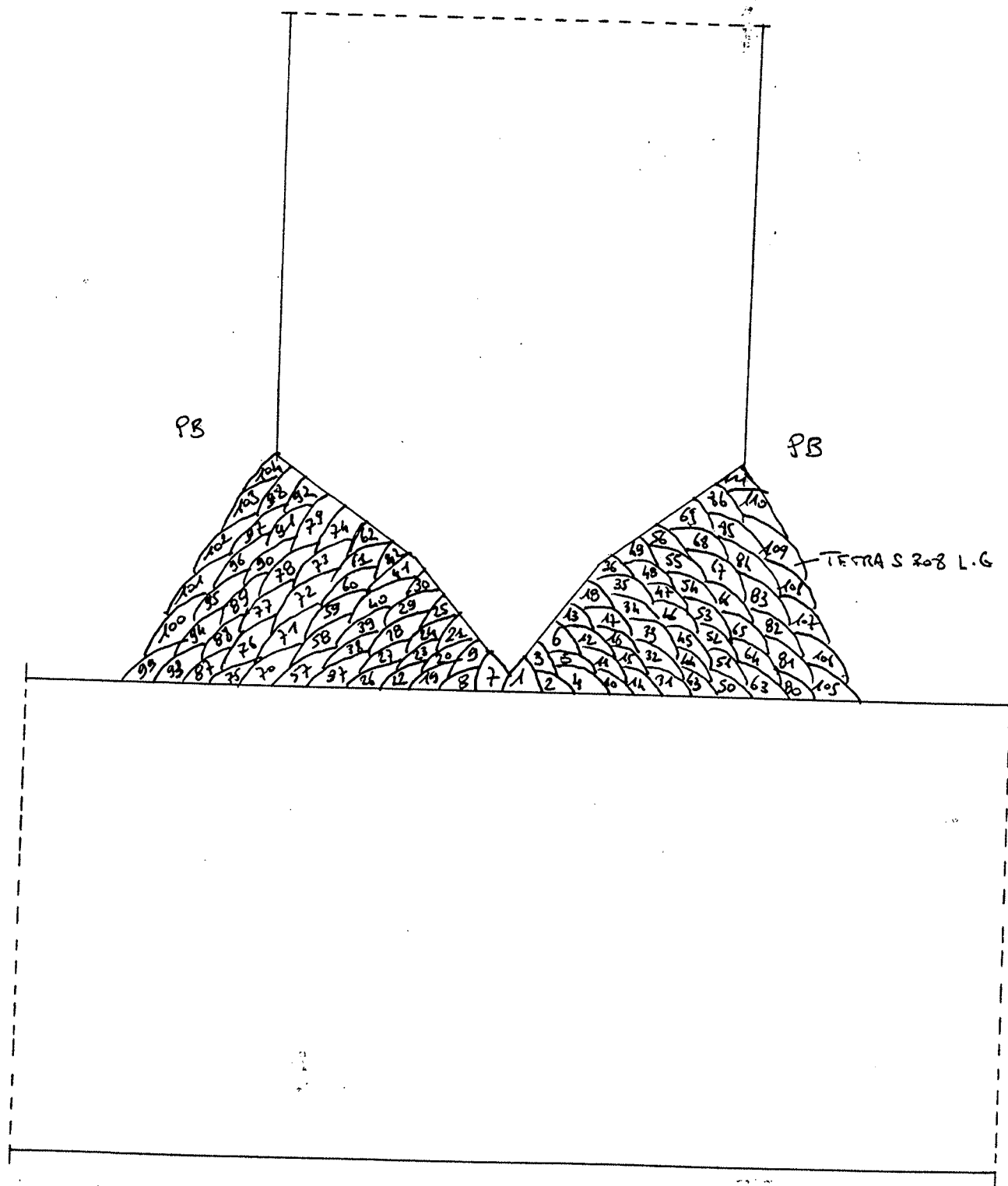




BUREAU DE CONTRÔLE

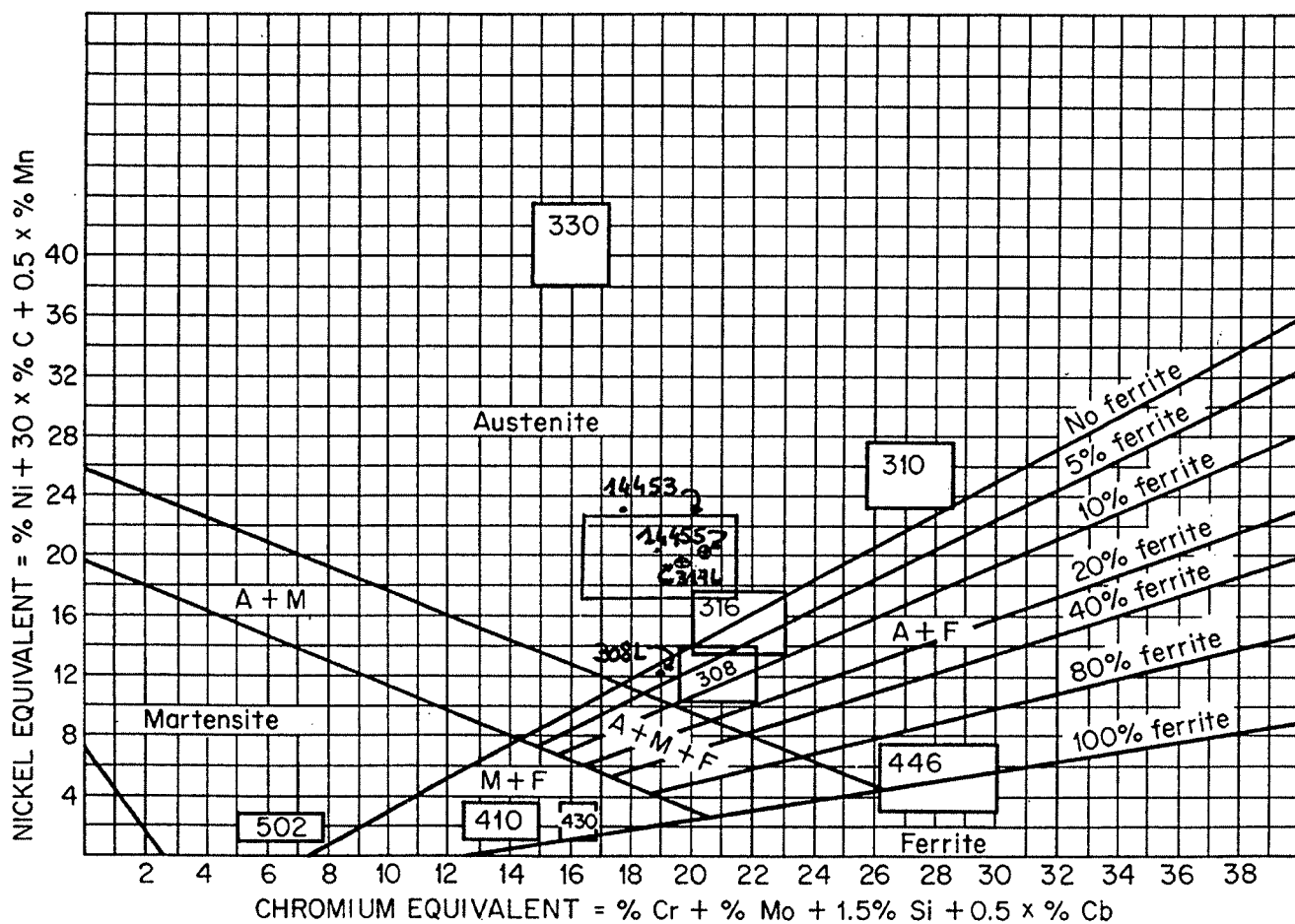
Répartition des passes

Annexe 2



Page 10

Diagramme de Schaeffler



Positionnement des métaux utilisés dans le diagramme de Schaeffler