

UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
"HOUARI BOUMEDIENE"

Lex

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER
Département de Génie - Mécanique

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

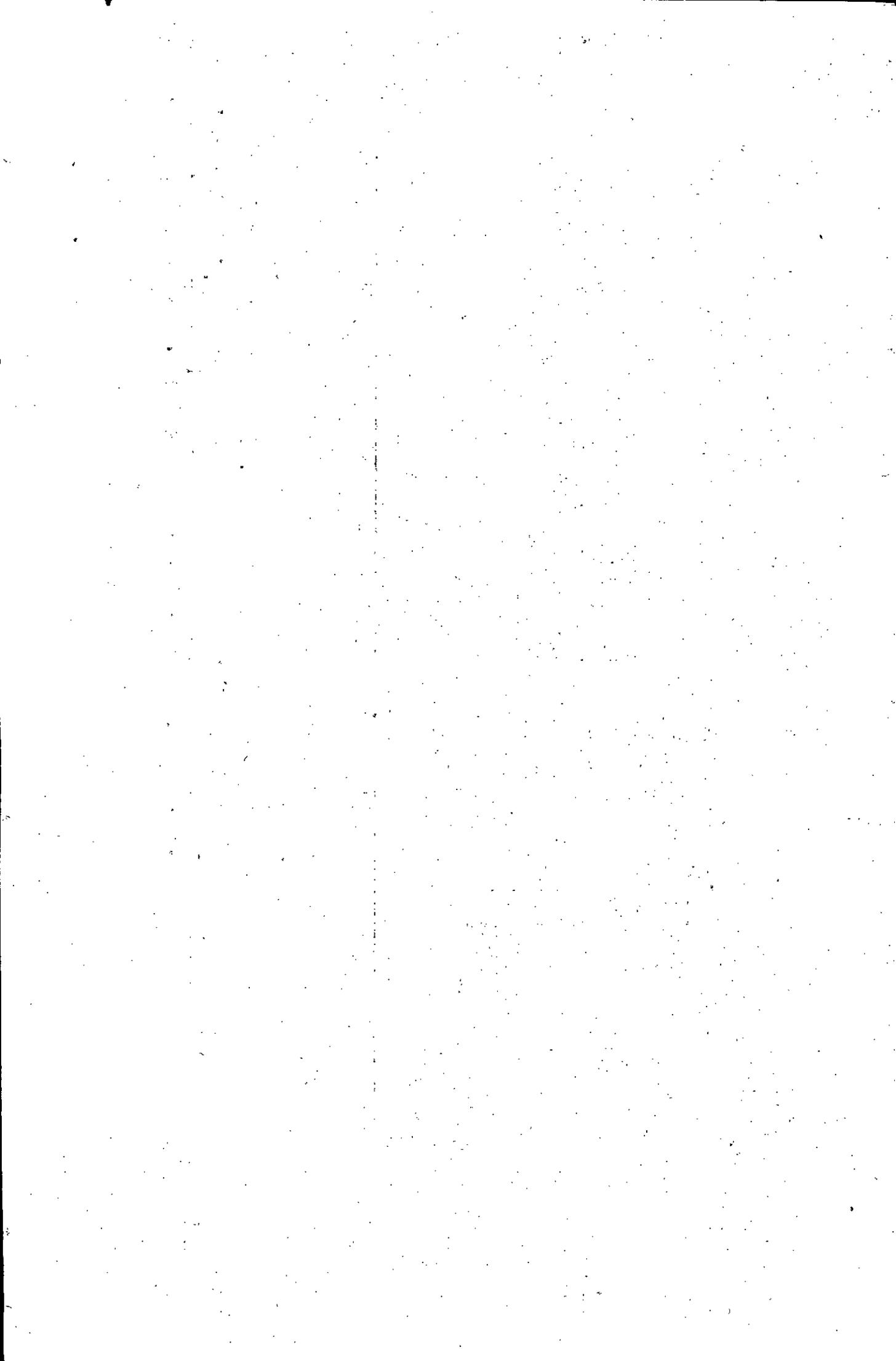
Téchnologie d'Exécution
d'une cuve de chaudière
à H.P.

Proposé et suivi par :

Mr BARDOKINE Evgueni
Maître de conférence à l'E.N.P.A.

Étudié par :

GHAFFAR Zaki - Amali



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
"HOUARI BOUMEDIENE"

ECOLE NATIONAL POLYTECHNIQUE D'ALGER
Département de Génie - Mécanique

PROJET DE FIN D'ETUDES

»O«

*Téchnologie d'Exécution
d'une cuve de chaudière
à H.P.*

Proposé et suivi par :

Mr BARDOKINE Evgueni
Maître de conférence à l'E.N.P.A.

Etudié par :

GHAFFAR Zaki - Amali

Promotion Juin 1982

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier très vivement Monsieur BARDOKINE Evgueni, Maitre de conférence, à l'Ecole Nationale Polytechnique d'ALGER (E.N.P.A.) pour l'aide combien précieuse qu'il m'a prodiguée tout au long de mon travail et pour les efforts qu'il a déployés durant tout ce semestre, pour m'avoir assuré un très bon encadrement technologique.

Je remercie aussi tous les professeurs du département de génie mécanique, pour avoir contribué à ma formation d'ingénieur et aussi ceux qui m'ont enseigné pour que j'arrive à ce stade des études.

DEDICACES :

- A mes chers parents.
 - Aux professeurs du département de génie mécanique.
 - A mes camarades de l'E.N.P.A.
-

S U J E T

TECHNOLOGIE D'EXECUTION D'UNE CUVE DE
CHAUDIERE A H.P.

D O N N E E S

- CENTRALE :

- . Chaudière à haute pression
 - pression dans la cuve : 150 ata
 - vapeur vive : 230 t/h ; 565°C.

- DIMENSIONS DE LA CUVE :

- . Longueur de la virole cylindrique : 9200 mm.
- . Rayon extérieur : $Re = 905$ mm.
- . Rayon intérieur : $Ri = 770$ mm.
- . Epaisseur : $e = 135$ mm.

S O M M A I R E

| | Pages |
|---|-------|
| INTRODUCTION..... | 1 |
| I. - GENERALITES..... | 2 |
| I.1. Rôle de la cuve de chaudière..... | 2 |
| I.2. Classification des cuves de chaudière..... | 2 |
| I.3. Localisation de la cuve de chaudière..... | 3 |
| I.4. Description et fonctionnement de notre cuve de chaudière.. | 3 |
| I.5. Méthode de construction des cuves de chaudière..... | 4 |
| II. - TECHNOLOGIE D'EXECUTION..... | 5 |
| II.1. Choix du métal de base..... | 5 |
| II.1.1. Méthode d'essais des aciers..... | 5 |
| II.1.2. Caractéristiques à exiger d'un acier pour cuve de - chaudière..... | 6 |
| II.1.3. Aciers employés actuellement..... | 8 |
| II.1.4. Influence des impuretés..... | 11 |
| II.1.5. Critère de choix du matériau de base de la cuve de chaudière..... | 13 |
| II.1.6. Choix du matériau de base approprié..... | 13 |
| II.1.7. Normalisation de l'acier de base choisi..... | 14 |
| II.1.8. Soudabilité de notre acier..... | 19 |
| II.1.8-1 Etude métallurgique..... | 19 |
| II.1.8-2 Zone thermiquement affectée par la chaleur..... | 19 |
| II.1.8-3 Conditions de soudabilités..... | 20 |
| II.1.8-4 Vérification de la soudabilité de notre acier..... | 20 |
| II.1.9. Contrôle du métal de base choisi..... | 22 |
| II.2. Choix du procédé de soudage..... | 24 |
| II.2.1. Soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée..... | 24 |
| II.2.2. Soudage automatique sous flux solide..... | 28 |
| II.2.2-1 Soudage avec fil électrode toronné et imprégné de flux..... | 28 |
| II.2.2-2 Soudage avec fil fourré..... | 28 |
| II.2.2-3 Soudage avec flux magnétique sous protection gazeuse.. | 28 |

| | Pages |
|--|-------|
| II.2.2-4 Soudage à l'arc avec électrode en carbone..... | 28 |
| II.2.2-5 Soudage automatique sous flux..... | 29 |
| II.2.3. Soudage sous gaz inerte avec électrode de tungstène (T.I.G.)..... | 33 |
| II.2.4. Soudage semi-automatique sous protection gazeuse (M.I.G.)..... | 35 |
| II.2.5. Soudage par bombardement électronique..... | 37 |
| II.2.6. Cycles thermiques de soudage..... | 39 |
| II.2.7. Tensions résiduelles de soudage..... | 44 |
| II.2.8. Précautions à prendre pour réaliser de bonnes soudures..... | 46 |
| II.2.9. Défauts des joints soudés..... | 48 |
| II.3. Contrôle des joints soudés..... | 49 |
| I. Contrôle avant le soudage..... | 49 |
| 2. Contrôle pendant le soudage..... | 49 |
| 3. Contrôle après le soudage..... | 49 |
| II.4. Essais hydrauliques..... | 55 |
| II.5. Gamme de fabrication et choix des équipements. | 54 |
| CONCLUSION..... | 77 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | 78 |

I N T R O D U C T I O N

La cuve de chaudière joue un rôle important dans les installations de chaudière, elle réalise la séparation des phases eau-vapeur et permet une régulation aisée du débit d'eau qu'elle contient. La cuve de chaudière a beaucoup évolué au cours de ces dernières années, elle est même utilisée dans les chaudières de centrale d'énergie, et les chaudières industrielles, fonctionnant pour des pressions de la vapeur pouvant dépasser 230 bars, et pour des débits de vapeur pouvant aussi dépasser 600 t/h. Cette évolution rapide de l'utilisation de la cuve de chaudière est due essentiellement au développement rapide de la technologie en général et de la technologie d'exécution en particulier, tels que :

- les études expérimentales sur la résistance et les caractéristiques des métaux, pour une utilisation correcte de ceux-ci, comportant la mise au point de nouveaux modes d'emploi pour améliorer leur efficacité, et même l'élaboration de nouveaux métaux ;
- le travail des tôles ;
- la mise en forme ;
- les techniques de soudage qui ont beaucoup évolué dans le but d'améliorer la qualité et accroître la fiabilité des assemblages.

Dans mon travail j'ai beaucoup insisté sur les points suivants :

- choix du métal de base idéal ;
- les méthodes pour le travail des tôles ;
- la mise en forme ;
- le procédé de soudage adéquat ;
- traitement thermique ;
- contrôle.

J'ai aussi surtout insisté sur les méthodes qu'il y a lieu de suivre et signaler celles qu'il faut utiliser comme conformes aux règles de construction telle que la normalisation.

I. - GENERALITES

I.1. Rôle de la cuve de chaudière

Le rôle de la cuve de chaudière est double et très important :

- réaliser la séparation des phases eau-vapeur ;
- permettre une régulation facile du débit d'eau d'alimentation grâce au volume d'eau qu'il contient.

I.2. Classification des cuves de chaudière

On classe les cuves de chaudière suivant :

- les installations de chaudières et l'utilisation de celles-ci ;
- suivant les pressions de la vapeur produite ;
- suivant les débits de vapeur ;
- méthode de construction (matériaux et produits utilisés).

I.2-1 Les cuves de chaudières suivant l'utilisation des installations de chaudière.

- cuves des chaudières productives d'énergie, dont le but est de produire (chaudière) de la vapeur d'eau ayant des caractéristiques élevées, et utilisées pour produire de l'énergie mécanique, et celle-ci est transformée en énergie électrique au moyen de groupes électrogènes.
- cuves de chaudières industrielles, ces chaudières servent en principe à produire de la vapeur qui est d'une pression modérée, et est faiblement surchauffée, cette vapeur est envoyée pour les besoins techniques des entreprises.
- cuves de chaudières de chauffage : ces chaudières servent à produire de la vapeur saturée à basse pression ou de l'eau chaude qui sont ensuite employées habituellement et exclusivement pour chauffer et ventiler les bâtiments d'habitation et bâtiments industriels.

I.2-2 Les cuves de chaudières suivant la pression de la vapeur produite :

| Basses pressions | Moyennes pressions | Hautes pressions | Très hautes pressions | Pressions hypercritiques |
|------------------|--------------------|------------------|-----------------------|--------------------------|
| 8 à 16 bars | 22 à 39 bars | 60 à 140 bars | 150 à 220 bars | > 230 bars |

I.2-3 Les cuves de chaudières suivant le débit de vapeur :

| Petites installations | Moyennes installations | Installations de grandes puissances. | Installations de très grandes puissances. |
|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|---|
| 4 à 6 t/h | 10 à 75 t/h | 100 à 420 t/h | > 600 t/h |

I.2-4 Les cuves de chaudières suivant la méthode de constructions

On a des cuves de chaudières en aciers moulés soudables, des cuves de chaudières construites en tôle en aciers non alliés et en aciers alliés, cela dépend des conditions d'emploi de la chaudière.

On a aussi des cuves de chaudières dont la tuyauterie a des dispositions diverses.

I.3. Localisation de la cuve de chaudière

Toute chaudière à circulation naturelle comporte une ou plusieurs cuves, après le développement de la technologie dans le domaine des chaudières, on a construit des chaudières modernes à tubes vaporisateurs verticaux et, dans ce cas on n'a qu'une seule cuve de chaudière située à la partie supérieure de la chaudière et le plus souvent à l'intérieur d'une chambre morte sans communication avec le foyer, parfois la cuve est appelée ballon, tambour ou collecteur de chaudière.

I.4. Description et fonctionnement de la cuve de chaudière dans notre cas

La cuve comporte une vinole cylindrique de longueur 9.200 mm et d'épaisseur 135 mm, terminées par deux fonds soudés, le corps est supporté par deux étriers fixés à la charpente de la chaudière, le cylindre est percé de nombreux orifices dans lesquels viennent s'adapter les diverses tuyauteries de liaisons qui sont :

- une ou deux tuyauteries d'alimentation en eau venant de l'économiseur et qui débouche généralement dans les rampes percées d'orifices et placé sous le niveau normal du plan d'eau ; *
- les tuyauteries de descente d'eau qui aboutissent à la partie inférieure de l'appareil (raccordements soudés) ;

- un grand nombre de tubes de dégagement du vaporisateur dont les raccordements sont répartis sur la virole, ils sont mandrines, soit soudés ce qui est plus fréquent ;
 - les tuyauteries de départ de vapeur saturée vers le surchauffeur, situé à la partie supérieure de la virole (raccordements soudés).
- L'habillage intérieur comporte divers accessoires :
- . caissons de dégagement d'émulsion
 - . séparateurs cyclones
 - . sécheurs
 - . plaques déflectrices.

I.5. Méthode de construction des cuves de chaudières

Avant d'entamer les opérations de fabrication, c'est-à-dire employer les techniques utilisées afin de réaliser une cuve de chaudière, il est très important de connaître les conditions d'emploi de la cuve de chaudière, afin de déterminer le métal de base idéal, qui a des qualités compatibles avec les conditions d'emploi et surtout aussi, il faut qu'il soit soudable.

Après avoir déterminé le métal de base, il est important de connaître les techniques utilisées, tel que le travail des tôles à plat, la mise en forme des surfaces, les différents procédés d'assemblage, dont le plus important pour nous est le soudage et enfin les opérations de finition et le contrôle.

II. - TECHNOLOGIE D'EXECUTION

II.I. Choix du métal de base

II.I-I Méthode d'essai des aciers

Les caractéristiques mécaniques d'un acier sont déterminées par des essais de laboratoire sur éprouvettes, les plus courants des essais sont les suivants :

II.I-I-I Essai de traction : détermine

a/ La limite des allongements proportionnels ou limite d'élasticité E, exprimée en kg/mm² de la section initiale.

b/ La charge de rupture R exprimé en kg/mm²

c/ L'allongement A, exprimé en % est égale à $A \% = \frac{Lu - Lo}{Lo} \times 100$

Lu : longueur ultime entre repères en mm

Lo : longueur initiale entre repères en mm.

La forme et les dimensions de l'éprouvette sont fixées par des normes telle que la NF A 03-I5I, juin 1978.

II.I-I-2 Essai de résilience

Avant d'utiliser un métal, pour la construction, il est nécessaire de déterminer sa résistance au choc, certains défauts tels que les entailles, fissures, angles, vifs d'une construction; etc. diminuent beaucoup la résilience du métal, pour cela on crée sur l'éprouvette un défaut artificiel, c'est ainsi qu'on a choisi une entaille en U ou en V et l'essai le plus courant est l'essai Charpy (charpy U, charpy V) d'après les normes NF A 03-I56 et NF A 03-I6I juin 1978.

Pour ce qui est des dimensions de l'éprouvette à entaille en U, sont données par NF A 03-I5I juin 1978 et pour l'éprouvette à entaille en V sont données par NF A 03-I6I juin 1978.

La résilience \mathcal{L} est exprimée en kg m/cm², elle consiste à mesurer le travail en kg m nécessaire pour rompre l'éprouvette par choc et on apporte ce travail à la section en cm², c'est l'aptitude d'un métal à résister aux chocs.

II. I-1-3 Essai de pliage

Appliqué surtout aux tôles, il consiste à plier progressivement une tôle de façon à appliquer les deux branches de l'éprouvette à bloc, l'une sur l'autre.

II. I-1-4 Essai par efforts répétés

Consiste à soumettre une éprouvette à des tensions périodiques variables, on détermine aussi la charge à laquelle le métal peut être soumis indéfiniment aux efforts alternatifs, c'est la limite à la fatigue

II. I-2 Caractéristiques à exiger d'un acier pour cuve de chaudière

Les capacités qui constituent une cuve de chaudière contiennent un fluide sous pression et à température élevée qui représente une énergie accumulée considérable, donc on doit exiger de la paroi d'une cuve de chaudière une sécurité complète, la rupture de celle-ci peut avoir des conséquences graves pour le personnel (brûlures par la vapeur). Il est surtout nécessaire que l'acier/soit pas rendu fragile par le travail qu'on lui fait subir lors de la confection de la cuve de chaudière.

Quelques faits essentiels à connaître du point de vue du travail de l'acier :

- l'érouissage produit en particulier par le travail à froid, modifie les caractéristiques mécaniques du métal : la limite élastique s'élève et se rapproche de la charge de rupture, l'allongement et la résilience diminue. Le métal devient fragile, c'est le vieillissement accompagné d'un grossissement des cristaux du métal.

Cette observation justifie toutes les mesures en usage pour éliminer lors de la fabrication de la cuve de chaudière, toutes les parties des tôles ayant subi un érouissage sans recuit ultérieur.

Les aciers au nickel sont moins sujet au vieillissement que les aciers au carbone (I).

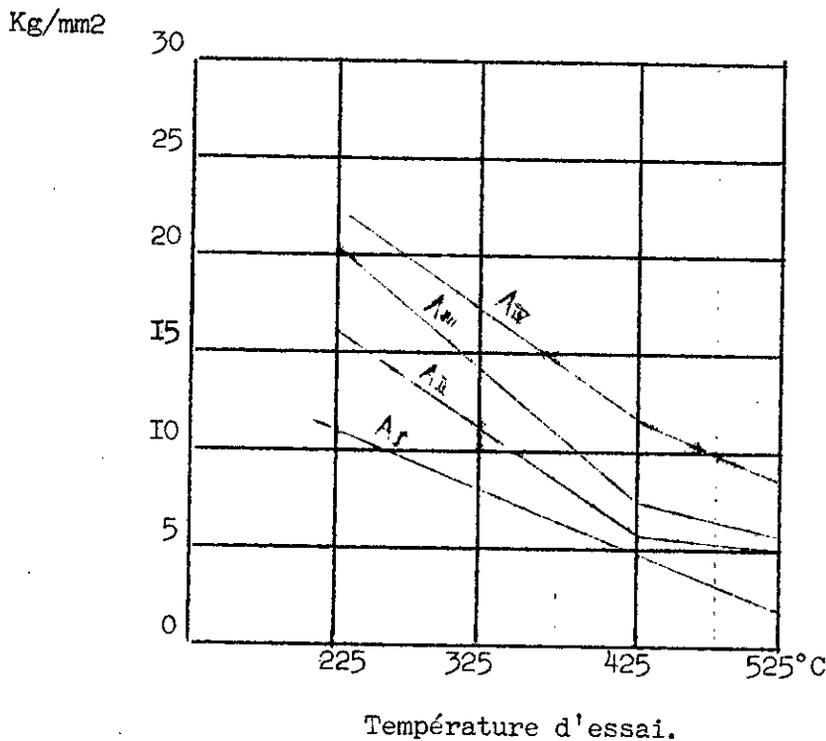
Résistance à chaud des aciers :

- Tous les métaux subissent à chaud un abaissement de leur résistance qui s'accroît très nettement entre 300° et 400°C.

Quelques résultats numériques : les aciers au carbone dont les caractéristiques sont données dans le tableau ci-dessous ont été

essayés au centre d'études du Bureau VERITAS (I)

| ACIER | Composition chimique % | | | Caractéristiques à froid à l'état recuit | | | |
|-------|------------------------|------|------|--|-----------|------|------|
| | C | Mn | Si | E (kg/mm ²) | R (kg/mm) | A % | ℓ |
| A I | 0,15 | 0,32 | 0,07 | 20,5 | 37,3 | 30,7 | 13 |
| A II | 0,17 | 0,53 | 0,10 | 23,8 | 44,2 | 29,5 | 10,5 |
| A III | 0,18 | 0,58 | 0,11 | 25,5 | 46,8 | 27 | 9,5 |
| A IV | 0,35 | 0,60 | 0,08 | 29,5 | 55,2 | 23,4 | 7 |



Variation de la Limite d'Elasticité en Fonction de La charge

On remarque que les aciers au carbone ne peuvent pas être employés aux températures élevées.

Pour cela les métallurgistes se sont efforcés à élaborer des métaux présentant à chaud une caractéristique mécanique meilleure que les aciers au carbone manganèse.

Le molybdène possède heureusement la propriété d'améliorer la résistance à chaud, le tableau ci-dessous donne la limite des allongements élas-

./.

tiques de quelques aciers spéciaux à 450°C à 500°C.

| NATURE DE L'ACIER | Composition chimique % | | | | Limite des logements élastiques. | |
|---------------------------|------------------------|------|------|------|----------------------------------|-------------------------------|
| | C | Ni | Cr | Mo | à 450°C kg/mm ² | à 500°C kg/mm ² |
| Acier à 1 % de Ni | 0,17 | 4,95 | " | " | 15 | " |
| Acier au Mi Cr (mi dur) | 0,26 | 2,54 | 0,36 | " | 15 | " |
| Acier au Mo trempé revenu | 0,3 | 2,75 | 0,75 | 0,03 | 29 à 34 | 16 à 27 |
| Acier au Mo | " | " | " | 0,5 | 16 à 19 | 9 à 12 |

Détérioration des aciers à chaud :

- La pratique des centrales à hautes températures a mis en évidence des changements de structure de certains aciers, pouvant provoquer des ruptures.

a/ Les aciers austénétiques du type 18-8 (18 % de Cr et 8 % de Ni) sont sujet à la fissuration intergranulaire au bout d'un certain nombre d'heures de marche.

b/ Les aciers au molybdène sont sujet à une détérioration particulière, le carbone se sépare du fer, le carbure Fe_3C se décompose avec dépôt de graphite et diminution des caractéristiques mécaniques. Le phénomène paraît se produire au voisinage des soudures (dans les tuyauteries). Pour éviter ce phénomène on ajoute un peu de chrome de l'acier et en employant le silicium au lieu de l'aluminium pour désoxyder le bain d'acier.

II.I-3 Les aciers employés actuellement :

II.I-3-1 Les aciers à faible teneur en chrome et molybdène : 0,5 Cr et 0,5 Mo environ.

II.I-3-2 Les aciers au Cr, Mo, al : C = 0,4, Si = 0,1, Mn = 0,750, Cr = 0,55, Mo = 0,45, al = 0,5 à 1. %

La limite d'écoulement VERITAS de cet acier : (5 à 10 4 % par heure entre la 25ème et 35ème heure) est de 12 kg/mm² à 500° et 7 kg/mm² à 550°.

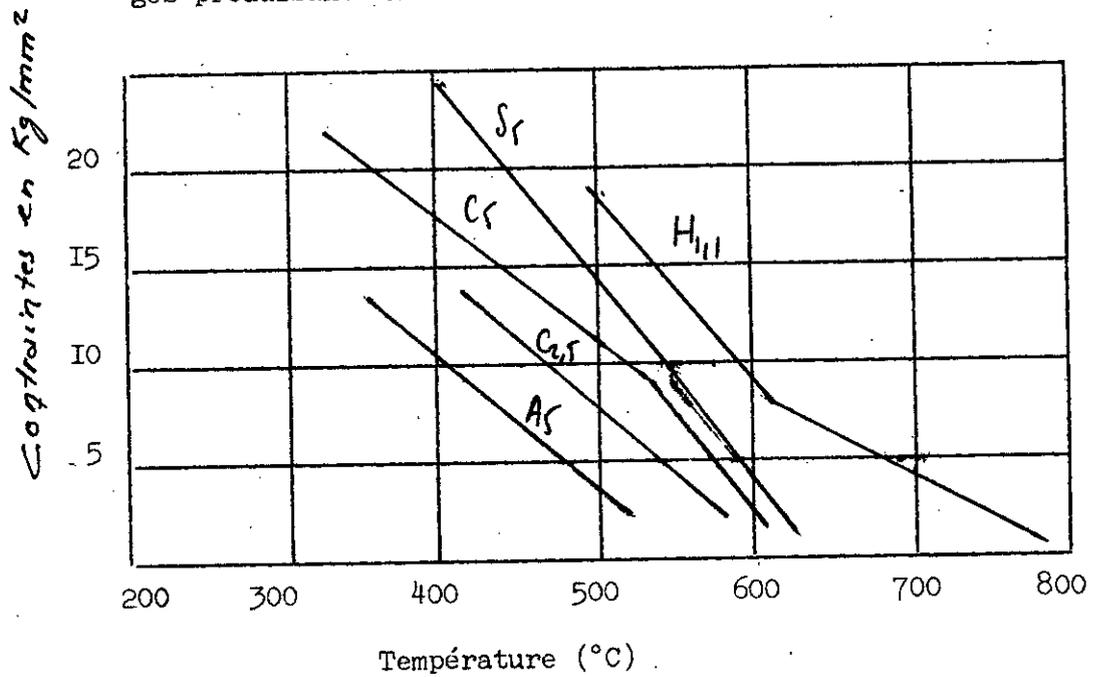
La résistance à l'oxydation est bonne, la perte de résilience par écrouissage est moins forte que celle des aciers au carbone.

./.

II.I-3-3 Les aciers au Cr, Mo de 5 à 6 % de Cr et quelquefois le silicium.

II.I-3-4 Pour des températures de 800° à 900°C des teneurs plus fortes en Cr et Ni (I2 à I4 % de Cr)

Courbe donnant quelques aciers en fonction de la température, les charges produisant une vitesse de fluage déterminée



Vitesse d'allongement de divers aciers en fonction de la charge et la température.

La composition des aciers est la suivante :

| ACIERS | C % | Mn % | Cr % | Mo % | Si % | Al % | Ni % |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| A | 0,1 | 0,5 | - | - | - | - | - |
| C | 0,15 | 0,8 | 0,5 | 0,5 | - | - | - |
| S | 0,15 | - | 5 | 0,5 | 1 | 0,5 | - |
| H | 0,14 | 0,32 | 17,4 | - | 0,7 | - | 8 |

A : acier doux.

C : acier à 0,5 % de Cr et 0,5 de Mo.

S : acier à 5 % de Cr et 0,5 de Mo.

H : acier inoxydable de la catégorie I8-8.

Résistance à l'oxydation et à la corrosion :

- La cuve de chaudière est soumise à l'action de la vapeur d'eau et des corps qu'elle contient et portés à haute température, on peut donc prévoir leur oxydation plus ou moins rapide. On peut diminuer l'oxydation de l'acier par l'addition de certains métaux, en proportion plus ou moins forte suivant le résultat à obtenir et le prix qu'on peut admettre, citons en particulier le Cr, le Ni, le Si, le Cu, le Mo.

Les aciers au carbone résistant à cette oxydation jusqu'à 500°. Au delà il est nécessaire d'employer des aciers spéciaux, citons quelques uns.

- . Aciers au Cr-Mo (1 % de Cr permet de résister à l'oxydation à 600°) l'addition du Si améliore sensiblement la résistance à l'oxydation des aciers au chrome.

Bonne soudabilité :

- La soudabilité diminue lorsque la teneur en éléments d'addition et l'épaisseur augmentent. Par effet de trempe, les zones soudées durcissent (augmentation de la dureté et de la fragilité) ce qui exige des précautions particulières. La soudabilité est influencée par la composition du métal d'apport, le régime de soudage, la température ambiante, la composition chimique de l'acier, de l'épaisseur des pièces, les conditions de fixations des pièces et par d'autres conditions constructives, technologiques et d'exploitation.

Donc faisons un tableau qui nous donne l'influence des éléments d'addition, vis à vis des qualités des aciers en tenant compte surtout de leur soudabilité.

| PROPRIETES | C | Si | Mn | Ni | Cr | W | V | Mo | Co | Ti | P | S |
|--|----|----|----|----|----|----|---|----|----|----|---|---|
| Charge de rupture | ++ | + | ++ | + | ++ | + | + | ++ | + | + | + | |
| Dureté | ++ | + | ++ | + | ++ | + | + | ++ | | | + | |
| Ductilité | - | | + | ++ | + | + | + | + | | + | - | - |
| Résistance à la chaleur et à la corrosion. | | - | - | + | ++ | + | | + | | + | | |
| Soudabilité | - | - | + | | | | + | + | | | | - |
| Usinage | - | - | - | | - | | | | + | | + | + |
| Elasticité | + | ++ | + | | + | | + | + | | | | |
| Résilience | - | | + | + | + | + | + | + | + | + | | |
| Magnétisme | | - | | - | + | ++ | | | ++ | | | |
| Forgeabilité | | | + | + | | | + | + | | + | | - |

++ = recommandé ;

+ = bon ;

- = médiocre.

II.I-4 Influence des impuretés

Les principales impuretés et leurs influences respectives sont les suivantes :

- Le soufre se combine au fer et donne naissance à un sulfure fragile, mais le soufre se combine plus facilement avec le manganèse qu'avec le fer, si la teneur en soufre est très faible ($< 0,05 \%$) et la teneur en manganèse suffisante, il ne se forme que du sulfure de manganèse non nuisible, en conclusion le manganèse réduit donc l'effet nuisible du soufre ; le phosphate renforce la ferrille, mais si la teneur est trop élevée, il se forme un phosphure de fer très fragile.

Influence de l'hydrogène :

- La présence d'hydrogène dans le métal des soudures peut conduire à de graves inconvénients. L'hydrogène peut provenir de l'humidité des enrobages, fils et flux ou des impuretés les recouvrant, de l'atmosphère naturelle, etc. Pour diminuer les conséquences graves de la présence d'hydrogène dans les soudures (fissuration et rupture) on doit :

- . Chauffer à 250°C, pendant 6 heures au moins et 16 heures au plus, les éprouvettes d'essai de traction employées pour l'évaluation des propriétés mécaniques du métal déposé au moyen des électrodes de soudage à l'arc, c'est le dégazage, son but est d'éliminer plus rapidement l'hydrogène qu'à la température ambiante.
- . Stockage des électrodes dans un lieu très sec.
- . La mise au point d'électrodes à basse teneur en hydrogène.

II. I 5 Critères de choix du matériau de base de la cuve de chaudière

Le choix du matériau de base dans les applications industrielles est très important et il exige que ses qualités soient surtout compatibles avec les conditions d'emploi, c'est-à-dire que le choix dépend des propriétés du matériau relatives à l'utilisation envisagée

Les propriétés d'un matériau fournissent une base pour la prévision de son comportement dans les diverses conditions où il peut se trouver. Donc ayant une idée sommaire sur les différentes propriétés des matériaux et afin de déterminer l'acier de base idéal, nous devons pour cela connaître très bien les conditions d'emploi et l'utilisation envisagée

Pour ce qui est de notre cas, c'est-à-dire la technologie d'exécution d'une cuve de chaudière, donc on doit faire un choix adéquat qui réponde aux critères suivants :

- bonne résistance mécanique ;
- bonne résistance au fluage ;
- bonne soudabilité
- ductile ;
- tenir compte des considérations économiques et des disponibilités du matériau ;
- une bonne résistance à l'oxydation et à la corrosion ;
- tenir compte de l'épaisseur

Ayant donné les critères de choix du matériau de base, je tiens à préciser que ces critères sont dus aux conditions de service et des opérations pratiques de la technologie d'exécution de cette cuve de chaudière.

II I 6 Choix du matériau de base approprié répondant aux critères précédents (II 5)

Ayant donné les critères de choix du métal de base et connaissant les conditions d'emploi de la cuve de chaudière, l'acier qui répond à tous ces critères est l'acier Cr Mo (0,5 % de Cr et 0,5 % de Mo et 0,8 % Al) cet acier se prêtant au travail à froid comme au forgeage ou au chaudronnage, présente néanmoins au fluage une excellente résistance dans le domaine de la température correspondant à la surchauffe de la vapeur, le domaine d'utilisation s'étend jusqu'à 600°C.

II I 7 Normalisation de l'acier de base choisi

On a une épaisseur de 135 mm et la norme française AFNOR
NF A 36 206 (juillet 1978) nous donne :

| e (mm) | NUANCES D'ACIER | e (mm) | NUANCES D'ACIER |
|-----------|-----------------------------------|-----------|---------------------------|
| 60 | I5.CD.4.05 | I20 | Z I0.CD.5.05 |
| 80? | I5 D3, I5 CD.2.05, I0 CD 9.I0. | I50 | I8 MD.4.05 et I5.MDV.4.05 |

COMPOSITION CHIMIQUE

COMPOSITION CHIMIQUE EN

| N° | NUANCES | Cmax sur produit | Si sur produit | Mn sur produit | Pmax sur produit | Smax sur produit | Cr sur produit | Mo sur produit | V sur produit |
|----|--------------|------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| 1 | I5.03 | 0,20 | 0,10-0,35 | 0,45-0,85 | 0,040 | 0,035 | 0,30 | 0,25-0,4 | 0,04 |
| 2 | I8.MD.4.05 | 0,22 | 0,10-0,40 | 0,90-1,50 | 0,035 | 0,035 | 0,30 | 0,4-0,6 | 0,04 |
| 3 | I5.MDV.4.05 | 0,20 | 0,10-0,40 | 0,90-1,50 | 0,035 | 0,035 | 0,30 | 0,4-0,6 | 0,04-0,1 |
| 4 | I5.CD.2.05 | 0,20 | 0,10-0,35 | 0,45-0,85 | 0,035 | 0,035 | 0,35-0,65 | 0,4-0,6 | 0,04 |
| 5 | I5.CD.4.05 | 0,20 | 0,10-0,40 | 0,40-0,85 | 0,035 | 0,035 | 0,75-1,25 | 0,4-0,6 | 0,04 |
| 6 | I0.CD.9.I0 | 0,17 | 0,10-0,40 | 0,40-0,85 | 0,035 | 0,035 | 1,95-2,55 | 0,9-1,15 | 0,04 |
| 7 | Z I0.CD.5.05 | 0,17 | 0,10-0,55 | 0,30-0,65 | 0,035 | 0,035 | 3,90-6,10 | 0,4-0,65 | 0,04 |

- En outre la teneur en cuivre est limitée à 0,25 % sur coulée comme sur produit pour toutes les nuances, toutefois une teneur de 0,30 % sur coulée comme sur produit est tolérée lorsque le produit n'est pas destiné à subir des opérations de formage à chaud (température supérieure à 700°C)
- Pour les nuances 1, 4, 5, 6 et 7 la teneur en nickel résiduel est limitée à 0,30 % sur coulée comme sur produit, pour les nuances 2 et 3, cette tolérance est portée à 0,50 %.

CARACTERISTIQUES MECANIQUES A LA TEMPERATURE AMBIANTE.

| NUANCES | Trait thermique de référence normalisation + revenu (refroidissant à l'air °C) | CARACTERISTIQUES DE TRACTION Lo = 5,65 \ / So | | | | | | | Pliage à 180° ép. du mandrin. | Résilience KCU (à 20°C) du J/cm ² minimal. |
|------------|--|--|-----------------------------------|-------------|--------|-----------|-------------|--------|-------------------------------|---|
| | | R N/mm ² | (minim) Ro 0,02 N/mm ² | | | A minimal | | | | |
| | | | e ≤ 60 | 60 < e ≤ 80 | 80 < e | e ≤ 30 | 30 < e ≤ 60 | 60 < e | | |
| I5 D 3 | 875/925 air 600/675 | 430-530 | 265 | 255 | - | 25 | 23 | 22 | 2a | 6 |
| I8.MD.405 | 875/925 air 600/675 | 510-610 | 345 | 345 | 325 | 21 | 20 | 19 | 3a | 6 |
| I5MDV.405 | 875/925 air 600/675 | 510-610 | 345 | 345 | 325 | 21 | 20 | 19 | 3a | 6 |
| I5 CD 205 | 875/925 air 625/700 | 450-550 | 275 | 265 | - | 25 | 23 | 22 | 2a | 6 |
| I5.CD.405 | 900/950 air 650/725 | 470-570 | 295 | - | - | 23 | 22 | - | 2a | 6 |
| I10.CD.910 | 900/925 | e 20 540-640 e 20 520-620 | 310 | 310 | - | 21 | 20 | 18 | 3a | 6 |
| I10.CD.505 | 900/950 air 700/760 | 590-710 | 390 | 390 | 390 | 15 | 15 | 15 | 3a | 6 |

Remarques :

- a : épaisseur de l'éprouvette de pliage en millimètres

pour e ≤ 30 a = e

pour e > 30 a = 30

I N/mm² = I MPa.

Tableau de la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % à température élevée.

| NUANCES | Ro, 002 minimal en N/mm2 à la température T. (°C) | | | | | | |
|--------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 200°C | 250°C | 300°C | 350°C | 400°C | 450°C | 500°C |
| I5 D 3 | 245 | 226 | 196 | 186 | 177 | 166 | - |
| I8.MD.4.05 | 309 | 294 | 284 | 265 | 235 | 216 | - |
| I5.MDV.4.05 | 309 | 294 | 284 | 265 | 235 | 216 | - |
| I5.CD.2.05 | 255 | 235 | 216 | 196 | 186 | 181 | 177 |
| I5.CD.4.05 | 275 | 255 | 235 | 216 | 201 | 191 | 181 |
| I0.CD.9.I0 | 275 | 255 | 235 | 226 | 216 | 206 | 196 |
| Z I0.CD.5.05 | 333 | 323 | 309 | 294 | 279 | 265 | 255 |

Tableau du module d'élasticité en N/mm2.

| TEMPERATURE | 20°C | 200°C | 300°C | 400°C | 500°C |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 206.000 | 191.000 | 186.000 | 176.500 | 167.000 |

Tableau des coefficients moyens de dilatation linéique en 10^{-6} m/mK

| ENTRE 20°C et | 100°C | 200°C | 300°C | 400°C | 500°C | 600°C |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 11,1 | 12,1 | 12,9 | 13,5 | 13,9 | 14,1 |

Caractéristiques moyennes d'allongement et de rupture par fluage aciers I8.MD.4.05 et I5.MDV.4.05

| TEMPERATURE EN °C. | Charge provoquant un allongement de fluage de 1 % en | | Charge provoquant la rupture par fluage en | |
|--------------------|--|------------------------|--|------------------------|
| | I0 ⁴ heures | I0 ⁵ heures | I0 ⁴ heures | I0 ⁵ heures |
| | N/mm2 | N/mm2 | N/mm2 | N/mm2 |
| 425 | 392 | 314 | 421 | 343 |
| 450 | 333 | 240 | 353 | 265 |
| 475 | 255 | 162 | 279 | 181 |
| 500 | 177 | 103 | 196 | 118 |
| 525 | 118 | 54 | 132 | 69 |

Notre choix de l'acier de base idéal, normalisé et répondant aux critères de choix énumérés précédemment est l'acier :

I5.MDV.4.05, NF A 36 2 06/

Normalisation du métal de base des tuyauteries :

Le tableau donné par NF E 32.105, nous donne pour chaque type d'acier les familles d'aciers correspondantes dans notre cas on a :

| Tôles (selon NF A 36.206) | Tubes (selon NF A 49.213) |
|---|---------------------------|
| I8.MD.4.05 I5.MDV.4.05 I5.CD.2.05 | Tu. I5. CD. 2.05 |

Composition chimique en % selon NF A 49.213

| NUANCE | Traitement thermique de référence. | Produit | C | Mn | P max | S max | Si | Ni max. |
|---------------|---|--------------|--------------|--------------|-------|-------|--------------|---------|
| Tu I5.CD.2.05 | 875/925°C air plus revenu 625/700°C | Sur produit. | 0,08 0,20 | 0,40 1,00 | 0,035 | 0,035 | 0,05 0,40 | |
| | Cr | Mo | CU | | | | | |
| | 0,30 0,75 | 0,41 0,64 | | | | | | |

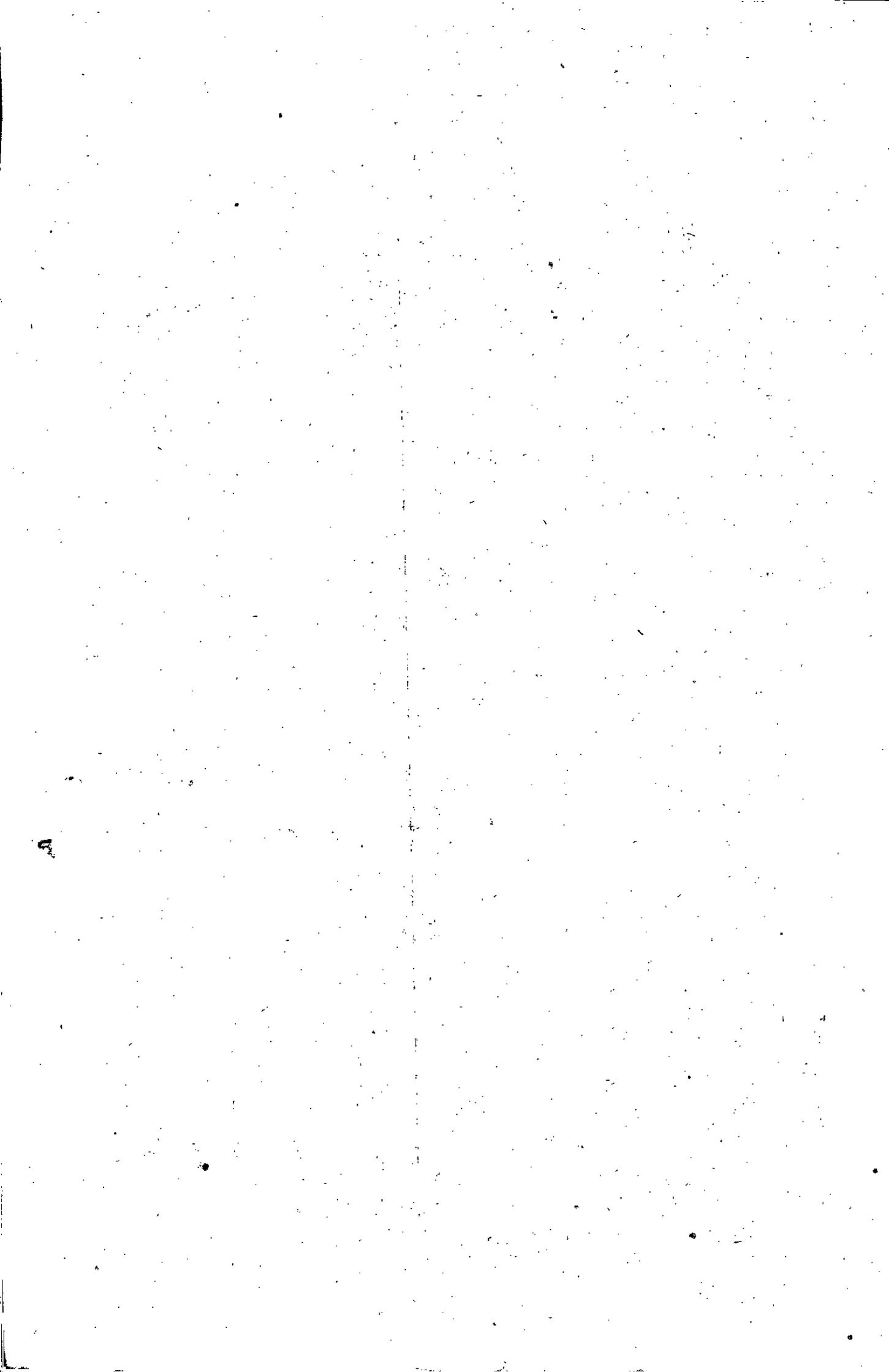
Caractéristiques mécaniques selon NF A 49.213

| NUANCE | CARACTERISTIQUES MECANIQUES EN N/MM2 | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------------------------------------|------------|------------|---------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| | A 20°C | | | Caractéristique indiquée. | à la température de référence 0°C | | | | | | | | | | |
| Tu I5.CD.2.05 | Rm | Rp0,2 min. | A % min. | | 250 | 300 | 350 | 400 | 425 | 450 | 475 | 500 | 525 | 550 | |
| | | | | | Rp 0,2 | 235 | 206 | 186 | 176 | 172 | 167 | 157 | 147 | | |
| | | | | σ_R | I0 ⁴ h | | | | | | 304 | 235 | 176 | 118 | 69 |
| | | | | | I0 ⁵ h | | | | | | 216 | 157 | 93 | 53 | 31 |
| | | | σ_I | | | | | | | 147 | 115 | 74 | 41 | 24 | |

Normalisation du métal de base des brides

Pour ce qui est de notre cas, la nuance d'acier utilisée sera un acier faiblement allié pour usage aux températures élevées, c'est-à-dire : I5.CD.2.05 d'après NF.E.29.204.

Pour ce qui est des caractéristiques de ces aciers, elles sont données par NF.E.29.204.



II I 8 SOLIDABILITE DE NOTRE ACIER

II I 8-I Etude métallurgique

Le chrome et le molybdène, éléments alphagène stabilisent les phases α et tendent à réduire le domaine austénitique ; le carbone élément gammagène, agit en sens inverse.

Etant donné qu'on a Cr = 0,3 % et Mo = 0,9 ÷ 0,6 % le diagramme fer-carbone n'est pas sensiblement modifié. Le point de transformation AcI remonte vers 760°C, au lieu de 720°C pour les alliages Fe-C et que le point de transformation Ac3 se situe vers 880°C, réduisant ainsi légèrement le domaine de l'austénité.

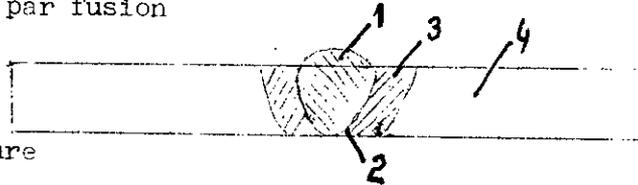
Le recuit de l'acier 0,5 Cr, 0,5 Mo est vers 900-925°C avec refroidissement lent dans le four fournit les caractéristiques mécaniques suivantes :

- R = 45 à 52 kg/mm²
- E = 30 à 35 kg/mm²
- A ($\ell_0 = 50$ mm) $\geq 30\%$

Influence des T T sur les structures et les caractéristiques mécaniques de l'acier Cr = 0,5, Mo = 0,5 (d'après les travaux de l'IRSID) (I) et (2)

II I 8-2 Zone thermiquement affectée par la chaleur

Définissons la zone affectée par la chaleur dans le cas de la soudure par fusion



- 1- soudure
- 2- zone de liaison
- 3- zone affectée par la chaleur
- 4- métal de base

A l'intérieur de la zone affectée par la chaleur d'un joint soudé sur l'acier à base de carbone, on distingue plusieurs régions :

- région de la fusion incomplète
- " de la surchauffe
- " de la normalisation
- " de la recristallisation incomplète
- " de la recristallisation
- " de la fragilité au bleu

Les températures atteintes dans les diverses zones de transformation sont accompagnées de vitesses de refroidissement beaucoup plus grandes, conduisant à des trempes plus énergiques. Pratiquement, les diverses zones se trouvent groupées dans un volume très faible, étalées sur 4 à 5 mm du bord du chanfrein, quelle que soit l'épaisseur des tôles. La structure de la soudure après solidification et la température au cours du soudage d'un acier est représentée par la figure

II I 8-3 Conditions de soudabilité

Les facteurs qui peuvent intervenir sur la soudabilité des aciers Cr-Mo 0,5 -0,5 sont :

- §
- Le pouvoir trempant de l'acier, d'où tendance à la fissuration du métal de base et de la soudure, ce risque peut être écarté par des mesures appropriées
 - Sensibilité des aciers au T T qui va conduire à des soudures de caractéristiques mécaniques différentes pour des faibles variations des facteurs de traitement : température d'auténisation, durée de séjour de cette température (gros grain d'austénité), température et temps de revenu et conditions de refroidissement
 - La composition chimique de l'acier, la teneur en carbone doit être voisine de 0,1 % et ne pas dépasser 0,15 % si la concentration de C $\nearrow \Rightarrow$ augmentation des risques de fissuration
Les teneurs en S et P doivent être réduites
 - Teneur en silicium du métal fondu dans le soudage à l'arc,
Si \leq 0,4 %, l'excès de Si est un facteur de fragilité en présence du Cr

II I 8-4 Vérification de la soudabilité de notre acier

- a) En fonction de la composition chimique, calcul de la teneur équivalent : (Ce)

$$(Ce) = C + \frac{Mn}{9} + \frac{Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7 Mo}{90}$$

On a l'acier I5 MDV 4.05 d'après NF

$$(Ce) = 0,15 + \frac{0,9}{9} + \frac{0,3}{9} + \frac{0,25}{18} + \frac{7 \cdot 0,5}{90}$$

On trouve $(Ce) = 0,337 \% \leq 0,40 \%$

Donc l'acier I5 MDV.4 05 a une bonne soudabilité du point de vue composition chimique

b) En fonction de l'épaisseur :

l'épaisseur influe sur la soudabilité l'augmentation de l'épaisseur influe négativement sur la soudabilité, car la répartition de la température dans une tôle de grande épaisseur est plus rapide que celle d'une tôle de faible épaisseur, pour vérifier ceci calcule

$$- (Ce)_{ep} = (Ce) (1 + 0,05 e)$$

$$(Ce) = 0,337 \quad e = 19,5 \text{ cm} = 13,5$$

$$\text{d'où } (Ce)_{ep} = 0,337 (1 + 0,05 \cdot 13,5) = 0,56 \%$$

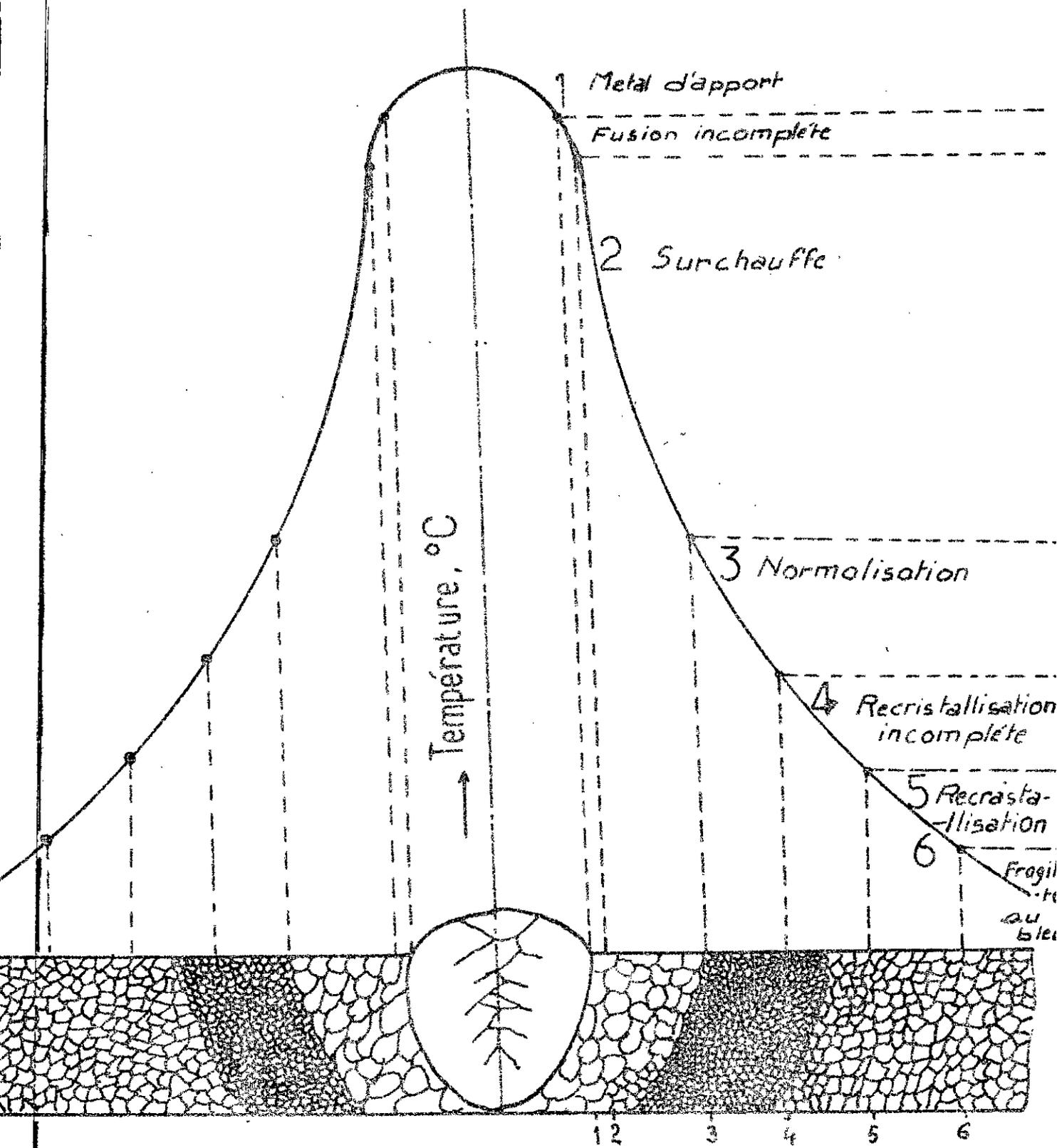
$$\text{Donc } (Ce)_{ep} \geq 0,40 \%$$

Pour cela on utilise un préchauffage, il est destiné à éviter une élévation brutale de température et ce qui est encore plus important à porter à température en plus grand volume de métal, afin de diminuer la vitesse de refroidissement, le but principal du préchauffage est de réduire les risques de fissuration

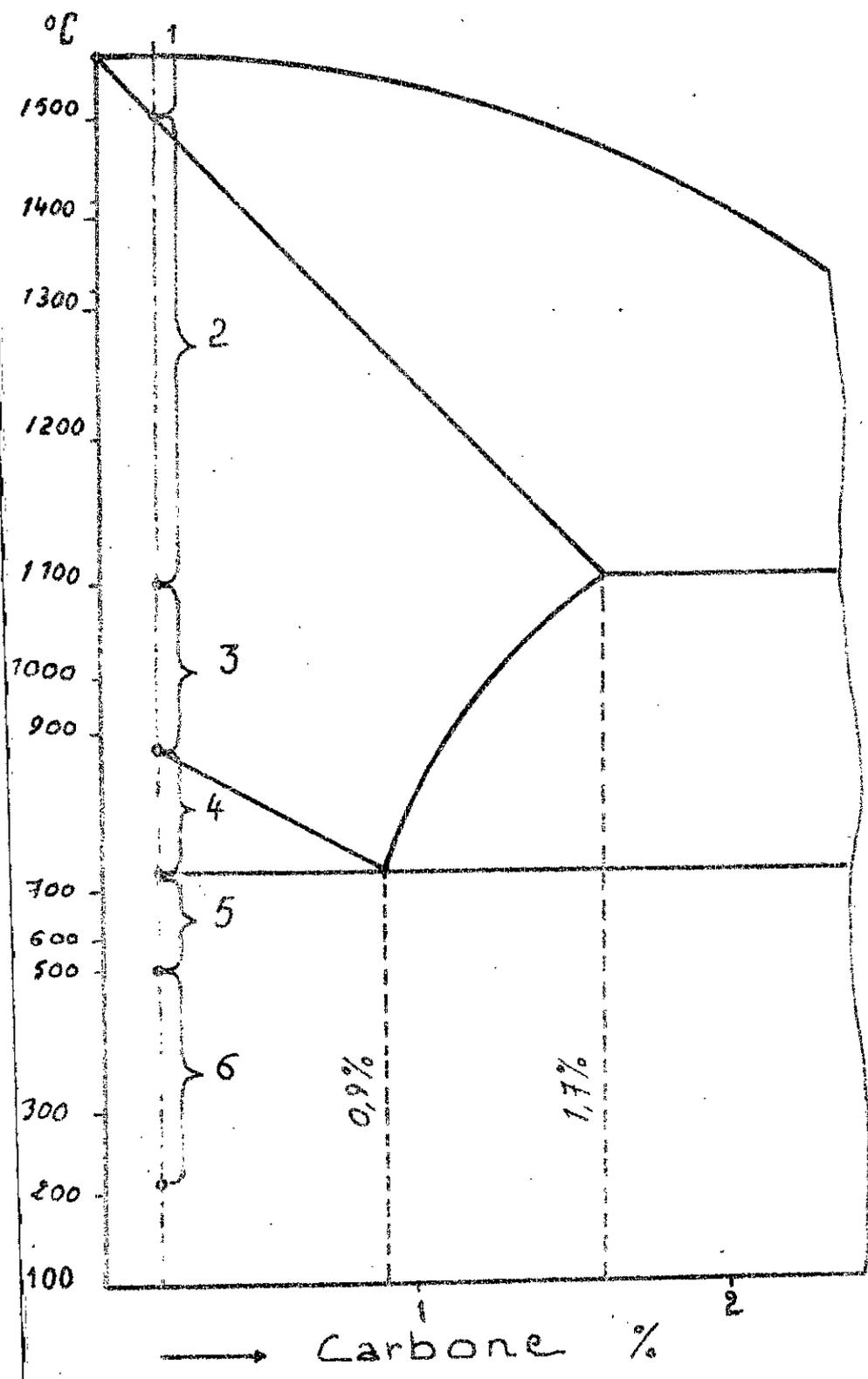
Calcul de la température de préchauffage :

$$T_{pr} = 350 \sqrt{(Ce)_{ep} - 0,25}$$

$$T_{pr} = 350 \sqrt{0,560 - 0,25} = 185^{\circ}\text{C}$$



constitution de la zone affectée par la chaleur



II.I.I-2 Contrôle du métal de base choisi

Pour ce qui est du contrôle de notre métal de base, on doit vérifier les caractéristiques mécaniques et faire une analyse de la composition chimique, pour cela, il est important de faire une série d'essais comprenant :

- un essai de traction à la température ambiante ;
- un essai de pliage à la température ambiante ;
- une détermination de la résilience sur éprouvette à entaille en U à + 20°C ;
- essai d'emboutissage ;
- essai de fluage.

Composition chimique :

Pour notre métal de base 15.MDV.4.05 on a d'après NF.A.36.206 :

| | | | | | |
|-------------|--------|-------------|-------------|------------|-------|
| 15.MDV.4.05 | Cmax % | Si % | Mn % | Pmax % | Ni % |
| | 0,20 % | 0,10 + 0,40 | 0,90 + 1,50 | 0,035 | 0,5 % |
| | Smax % | Cr % | Mo % | V % | Cu % |
| | P, P35 | 0,30 % | 0,40 + 0,60 | 0,04 + 0,1 | 0,25 |

Nous savons que les différents composants de l'acier sont susceptible de modifier la qualité de celui-ci, des études très poussées de spécialistes dans le domaine de la métallographie ont permis de déterminer l'influence des éléments d'addition sur l'acier, mais nous savons qu'au delà d'un certain pourcentage de ces éléments qui ont une influence utile, peuvent devenir nuisibles en modifiant sensiblement la propriété mécanique de l'acier, donc il est important de connaître le pourcentage exact de chacun de ces éléments, pour avoir un acier répondant à nos exigences. Pour cela le métal de base choisi qui a la nuance 15.MDV.4.05 NF.A.36.206 a la composition chimique suivante :

./.

La nuance d'acier 15.MDV.4.05 est un acier faiblement allié, car aucun élément d'addition ne dépasse la teneur de 5 %, cet acier a une teneur en carbone 20 % donc ceci augmente R_e et R_m et diminue A et K et la soudabilité.

- Le manganèse et le silicium augmentent R_e et R_m et diminuent A et K , Mn améliore la résistance aux corrosions.
- Le cuivre augmente R_e et R_m et diminue A et K , améliore la résistance à l'oxydation atmosphérique.
- Le chrome rend les aciers inoxydables à la température ambiante et aux hautes températures.
- Le nickel avec le chrome rendent les aciers inoxydables, améliorent R_e et R_m ainsi que A et K , augmentent la résistance aux basses températures, favorisent la structure austénétique.
- Le molybdène ajouté au chromé et au nickel augmente l'inoxidabilité et la résistance aux corrosions.

R_e : limite élastique.
 R_m ou R : charge de rupture.
 A % : allongement.
 K : résilience.

II.2. CHOIX DU PROCÉDE DE SOUDAGE

La soudure est l'un des nombreux procédés utilisés en construction pour l'assemblage des métaux en feuilles ou en profilés.

La soudure est l'opération de réunir en une seule, deux ou plusieurs pièces mécaniques de telle façon que la pièce résultante présente le plus de garanties possibles au point de vue de la solidité.

L'idéal serait d'obtenir un assemblage permanent et continu des pièces métalliques à assembler.

Notre but essentiel est d'avoir une soudure idéale assurant une continuité parfaite au point de vue des propriétés mécaniques, métallurgiques et physiques entre les pièces assemblées, pour cela il faudra faire un choix judicieux du procédé de soudage.

La soudabilité qui est une qualité intrinsèque de l'acier, est fonction d'une part de sa composition chimique et de ses qualités métallurgiques (absence de ségrégations, de défauts de doublage, etc.) et d'autre part de l'épaisseur de la tôle et de l'importance des tensions développées lors du soudage.

II.2.1. Soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée

Principe : le soudage manuel à l'arc est un soudage autogène par fusion, avec apport de métal, dans lequel la fusion est obtenue par la chaleur dégagée par un arc électrique. Une borne du circuit est reliée à la pièce, l'autre à l'électrode qui joue le rôle de métal d'apport, c'est-à-dire une électrode consommable et celle-ci est entourée d'une gaine appelée enrobage.

On fait jaillir entre la pièce et l'électrode un arc qui fond la pièce, au point d'impact et le fil d'apport qui se dépose dans le bain de fusion, la température de l'arc est de l'ordre de 4000°C et la fusion est pratiquement instantanée, quels que soient le métal et son épaisseur, ce qui est un gros avantage.

Pour ce qui est de notre cas, l'épaisseur de la tôle est grande et pour cela les protections du bain de fusion contre la contamination atmosphérique est indispensable et cette protection est assurée par des gaz provenant de la dissociation de l'enrobage dans l'arc. La protection du métal déposé est assurée par la formation d'un laitier ou flux fondu adhérent à la surface de ce métal.

II.2.1-I Choix du matériau de soudage

Le métal d'apport se présente sous forme d'une électrode enrobée, caractérisée par le diamètre de l'âme métallique et la nature chimique de l'enrobage. Les diamètres des électrodes varient entre 1,6 et 8 mm, tandis que leur longueur varie entre 40 cm et 1 m.

II.2.1-I-I L'enrobage

Les enrobages peuvent être de nature acide ou neutre, basique, cellulosique, oxydante ou rutile. Le rôle de l'enrobage est multiple :

- Rôle électrique : rendre l'air conducteur (ionisation de l'air) sans enrobage, il n'est pas possible d'amorcer l'arc et de le maintenir amorcé en courant alternatif.
- Rôle physique : guidage de l'arc par le retard à la fusion de l'enrobage, action sur la forme du dépôt qui peut être plat, semi-bombé ou bombé par l'action du volume, de la densité, de la viscosité et du laitier.
- Rôle chimique : protection contre l'action de l'air (oxydation et nitruration) pendant la fusion et pendant le refroidissement, par la gaine gazeuse et par le laitier.
- Rôle métallurgique : incorporation dans la soudure d'éléments d'addition pour en améliorer les propriétés et pour le soudage d'aciers spéciaux.

II.2.1-I-2 Types d'enrobage

Il existe un très grand nombre de types d'enrobage :

- Type oxydant : les éléments principaux sont l'oxyde de fer et oxydes métalliques, dépôt plat de bel aspect et laitier abondant, facile à utiliser à plat. Résistance faible.
- Type acide : éléments principaux sont la silice et l'alumine, dépôt plat ou semi-bombé, strié régulièrement, laitier abondant, pour soudure d'anglés à plat, très bonnes caractéristiques mécaniques.
- Type rutile : éléments principaux sont l'oxyde de titane et quelques matières organiques, dépôt semi-bombé, laitier visqueux qui n'est pas gênant, pour soudures en position. Bonnes caractéristiques mécaniques, très utilisé.
- Type cellulosique : les éléments principaux sont la cellulose, farine de bois, amiante etc. Produits volatils ne donnant que peu ou pas de laitier. Soudures très bombées avec striées très marquées, pour soudage en position. Caractéristiques mécaniques bonnes.
- Type basique (carbonate de chaux, spath-fluor), dépôt bombé ou semi-bombé, excellentes propriétés mécaniques, très bonne résilience. Pour soudure de haute résistance.
- Type haut rendement : poudre de fer ajoutée dans l'enrobage, augmente la quantité de métal déposé, par électrode.
- Type à forte pénétration : constituants appartiennent aux types rutile, acide ou cellulosique.
- Type pour aciers faiblement alliés ou fortement alliés : parfois l'âme est en acier non allié et c'est par l'enrobage que l'on apporte les éléments d'addition.

La plupart de ces électrodes fonctionnent indifféremment en courant alternatif ou continu (pôle - à l'électrode) sauf certains électrodes spéciales, du type basique en particulier, qui exigent du courant continu avec le pôle + à l'électrode ou du courant redressé.

II.2.I-2 Choix de l'électrode

Dans notre cas :

Notre construction étant soumise à une très grande pression et haute température, ainsi qu'une forte épaisseur, on est alors amené à choisir l'électrode à enrobage basique, car elle convient pour notre acier qui est acier faiblement allié et pour les pièces pouvant présenter une certaine sécurité et une bonne rigidité.

Vu l'importance de la grandeur des dimensions de notre cuve de chaudière et vu, la faible vitesse du soudage manuel, on est amené à choisir un soudage automatique.

Il est important de préciser aussi ; que vu la grande épaisseur de notre cuve de chaudière, l'opération de soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée nous donnera une grande zone thermiquement affectée, ce qui est un grand handicap pour nous, donc, il n'est pas important de choisir ce procédé.

II.2.2. Soudage automatique sous flux solide

Ce procédé de soudage se présente sous les formes suivantes :

- soudage avec fil électrode toronné imprégné de flux ;
- soudage avec fil fourré ;
- soudage à l'arc avec électrode en carbone ;
- soudage avec flux magnétique sous protection gazeuse ;
- soudage automatique sous flux

II 2 2-I Soudage avec fil électrode toronné et imprégné de flux

L'intensité du courant, dans le cas de ce procédé de soudage varie entre 200 A et 1000 A suivant le diamètre du fil, cette intensité est limitée par les risques d'échauffement excessif et de rupture du fil spirale, mais après une amélioration de ce procédé, il a été permis d'augmenter l'intensité, réduire les précautions nécessitées par l'élaboration de l'enrobage et augmenter la pénétration et la vitesse de soudage.

Ce procédé est utilisé qu'à plat, c'est-à-dire soudure bout à bout ou en angle, on l'emploie aussi pour le soudage de joints longitudinaux et pour les soudures d'angles, en raison de ses caractéristiques à arc visible et du fait qu'il s'accomode des conditions atmosphériques et de surfaces de tôle médiocres

II 2 2-2 Soudage avec fil fourré

On utilise ce procédé, avec une protection gazeuse supplémentaire, du CO₂ en particulier, dans ce cas il permet des applications semi-automatiques et donne une couche de laitier sur la soudure qui améliore la forme du cordon en soudage d'angle à plat et permet une protection plus sûre.

II 2 2-3 Soudage avec flux magnétique sous protection gazeuse

Ce procédé de soudage convient pour le soudage de l'acier doux à plat, dans le cas des soudures d'angle, le flux aide à maintenir la forme du cordon. L'intensité du cordon varie entre 250 A et 500 A

II 2 2-4 Soudage à l'arc avec électrode en carbone

Ce procédé est utilisé pour le soudage de l'acier et des alliages de cuivre, il est employé pour souder des tôles minces en acier, en cuivre et en aluminium, mais vu son ancienneté, ce procédé est rarement utilisé

II.2 2-5 Soudage automatique sous flux

Ce procédé utilise un fil nu, le flux étant apporté sous forme de poudre qui recouvre complètement ce bain de soudage et l'extrémité du fil électrode. Le grand avantage de ce procédé est l'utilisation possible de fortes intensités et cette intensité élevée permet d'avoir une forte pénétration et ce procédé a un rendement thermique élevé, l'intensité du courant varie entre 200 A et 2000 A, on pourra même atteindre 5000 A, mais on a été obligé de réduire celle-ci et revenir à notre intervalle de 200 A à 2000 A, pour avoir de meilleures caractéristiques métallurgiques dans les soudures. Le soudage multipasse permet d'obtenir un effet de traitement thermique d'une passe par la suivante. Les soudures sous flux sont particulièrement nettes et régulières du point de vue contour. Le flux non fondu pendant le soudage est récupéré, mais il convient de s'assurer qu'il n'a pas été altéré par l'opération. Il est très important de prévoir un support afin de retenir le flux, lors du soudage près des bords et des surfaces inclinées. Le métal d'apport se présente sous forme d'un fil électrode plein, dont le diamètre varie entre 2,5 et 6 mm, le flux fondu joue le rôle d'élément de protection, du fait qu'il recouvre le bain de fusion et le protège de la contamination atmosphérique.

Les flux utilisés en soudage automatique ont une granulométrie contrôlée et peuvent être du type fondu, aggloméré ou fritté, son comportement dépend à la fois de sa composition chimique et de sa granulométrie, le tableau suivant indique les proportions approximatives des principaux constituants de flux courants. Lors du processus de soudage une partie du flux fond pour recouvrir le bain et les particules métalliques quittant l'électrode et donne lieu à des réactions chimiques entre le métal et le flux, elles concernent surtout le silicium et le manganèse qui sont des éléments importants du point de vue résistance et qualité de la soudure. La composition chimique de la soudure dépend des conditions de soudage et de considérations thermodynamiques. L'apport du silicium par le flux permet une action désoxydante importante afin d'empêcher la porosité, mais conduit à une augmentation de la teneur en silicium de la soudure qui peut nuire aux propriétés mécaniques et provoquer des fissures en soudage multipasse. Le flux n° 20 est très utilisé

Donc la composition chimique du flux et sa granulométrie influent sur la tendance à la porosité. Lorsqu'il est nécessaire de souder avec une forte intensité, on emploie un flux à granulométrie plus finie, qui permet une protection plus efficace de l'arc. Dans ce procédé, le fil est utilisé en bobines et généralement recouvert d'une pellicule de cuivre qui le protège contre la corrosion superficielle. Le diamètre de fil utilisé dépend surtout de l'intensité nécessaire, varie de 2,4 mm pour $I : 150 \text{ A}$ à 9,5 mm pour $I = 3000 \text{ A}$, le diamètre le plus petit donnera la pénétration la plus grande, φ intensité égale, mais le cordon est généralement moins large. La composition chimique des fils de soudage automatique sous flux dépend du métal à souder. Ce procédé est utilisé pour l'assemblage des aciers doux, faiblement alliés et des aciers inoxydables et soude toutes les épaisseurs, on l'utilise surtout pour la fabrication des réservoirs sous pression, ce qui est notre cas, des tuyaux soudés aussi. Il représente un avantage qui est la vitesse élevée de dépôt des cordons, le bel aspect de leur surface et la profondeur de pénétration, mais la préparation des pièces à assembler doit être faite avec grande précision tout le long du joint, afin d'éviter l'apparition de défauts tels que des manques de fusion, des manques de pénétration et des effondrements.

Le système à arc régulé, dans lequel la vitesse de fil est modifiée pour corriger les variations de la longueur d'arc est de beaucoup le plus utilisé surtout pour le soudage de tôles épaisses et pour les intensités supérieures à 1000 A, avec de gros diamètres de fil; on ne peut pas avoir un bon effet auto-régulateur. On utilise les sources de courant alternatif ou continu, lorsque l'intensité est inférieure à 1000 A, du fait d'une bonne stabilité d'arc et d'une pénétration importante. Au dessus de 1000 A on utilise le courant alternatif, mais la pénétration est plus faible qu'en courant continu pôle positif à l'électrode.

Les paramètres importants en soudage automatique sous flux sont l'intensité, la tension, le diamètre du fil, la vitesse de soudage et la longueur libre du fil électrode. L'intensité influence sur le taux de fusion et la pénétration. La tension varie la forme de la pénétration de la soudure dans la pièce et le contour

du cordon. Si la tension est grande, le cordon devient large et plat et si elle est petite c'est le contraire. Une vitesse rapide donne un cordon plus étroit et plus saillant.

Une augmentation de la longueur libre du fil électrode conduit à un taux de fusion plus rapide.

$$TF_0 = \frac{158 + 0,712}{1000} I \quad (\text{g/mm}).$$

$d = \phi$ du fil en mm

$I =$ intensité en A.

Taux de fusion totale :

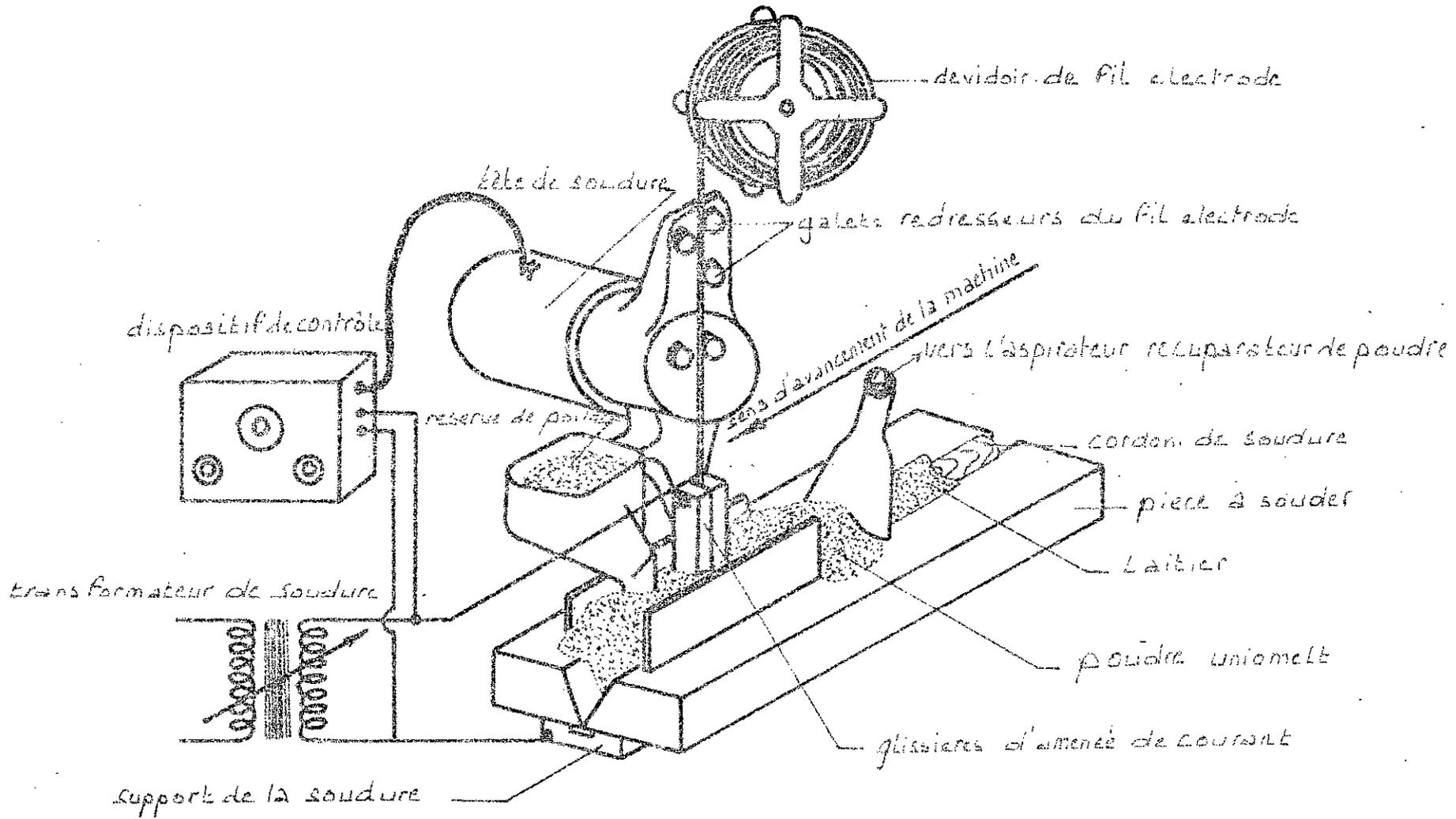
$$\frac{I}{1000} (0,35 + d^2 + 2,08 \times 10^{-7} \times \frac{(L_0)}{d^2} I,22)$$

en g/mm

$L_0 =$ longueur libre de l'électrode en mm.

Il existe le soudage automatique sous flux avec plusieurs fils, dont le but est d'augmenter la vitesse de soudage, on utilise le courant alternatif de préférence.

Donc en conclusion, vu la grande épaisseur de notre cuve de chaudière, on est obligé d'avoir un chanfrein en X et faire le soudage en 2 passes opposées. Mais cela devient difficile, vu les positions de soudage et même au point de vue zone thermique affectée, elle sera assez large et les contraintes résiduelles assez grandes, du fait de la grande épaisseur, donc j'opterai pour un autre procédé de soudage technologiquement supérieur.



Soudage automatique sous Flux

II.2.3. Soudage sous gaz inerte avec électrode de tungstène (T.I.G. : Tungstène Inert Gaz)

La source d'énergie est de type électrique, le courant peut être continu ou alternatif, son intensité varie entre 10 et 400 et l'énergie dissipée comprise entre 0,2 et 8 KW.

Le métal d'apport est sous forme d'un fil ou d'une baguette en dépendant de la torche.

Pour ce qui est de la protection du bain de fusion, elle est assurée par un gaz inerte, qui est en général soit de l'argon ou de l'hélium, mais dans certains cas on peut utiliser un mélange de ces deux gaz, avec de l'hydrogène en faible quantité.

L'alimentation en métal d'apport est assurée par un fil ou une baguette plongeant périodiquement dans le bain de fusion.

Les soudures sans métal d'apport peuvent être réalisées manuellement ou automatiquement, on exécute avec le soudage sans métal d'apport les soudures bout à bout, en joignant et en fondant les bords des pièces à assembler.

Pour ce qui est des soudures avec métal d'apport, on les exécute manuellement.

Les précautions spéciales à prendre pour assurer l'amorçage de l'arc qui s'effectue par une décharge à haute fréquence ou à haute tension, vu que l'arc devient instable pour les courants de faible intensité inférieure à 40 A, pour cela on utilise un arc pulsé pour le soudage des pièces minces.

On utilise des gaz inertes ou des mélanges de gaz inertes, du faite que le tungstène s'oxyde facilement, afin de ne pas détériorer l'électrode en tungstène. L'argon est le plus souvent utilisé et convient pour tous les métaux, tandis que pour le soudage des pièces épaisses, surtout celles qui ont le coefficient de diffusité thermique élevé, il est préférable d'utiliser l'hélium qui donne une tension d'arc et une pénétration supérieure.

Pour souder de fortes épaisseurs par le procédé T.I.G. on utilise de fortes intensités, mais le procédé T.I.G. est surtout destiné aux soudages des métaux en feuilles, ou de pièces de petites dimensions, ce qui est contraire à notre cas. Pour ce qui est de l'utilisation optimale qui consiste à souder bout à bout sur bords relevés et aussi en angle extérieur, le procédé est moins adapté au soudage en angle intérieur où l'on n'obtient pas toujours une fusion parfaite à la racine. Ce procédé est par contre utilisé pour les soudures circulaires à bords relevés, par exemple les fermetures de récipients étanches, se prêtent particulièrement bien à l'automatisation. On utilise parfois des systèmes de régulation de la longueur d'arc en soudage automatique : la tension d'arc fournit un signal qui déclenche le déplacement vertical de la tête de soudage, vers le haut, ou vers le bas, de sorte que l'arc peut suivre une surface courbe ou ondulée. Divers systèmes automatiques ont été mis au point pour le soudage de tubes sur plaques tubulaires, un de ces systèmes consiste en une torche miniaturisée qui tourne autour d'un centreur introduit dans le tube, mais quand la plaque est épaisse, l'acier se fait à l'arrière de la plaque. L'avantage de ce procédé au point de vue zone thermiquement affectée, est son étroitesse du faite de la forte concentration de la chaleur en un point de la pièce, il donne aussi une excellente pénétration, un cordon de bel aspect et de bonne qualité, pour notre cas on utilisera ce procédé pour le pointage des demi-cylindres (virole), quarts de sphère, des tubes sur la cuve et des brides sur les tubes et pour la soudure on utilisera un procédé à plus forte productivité.

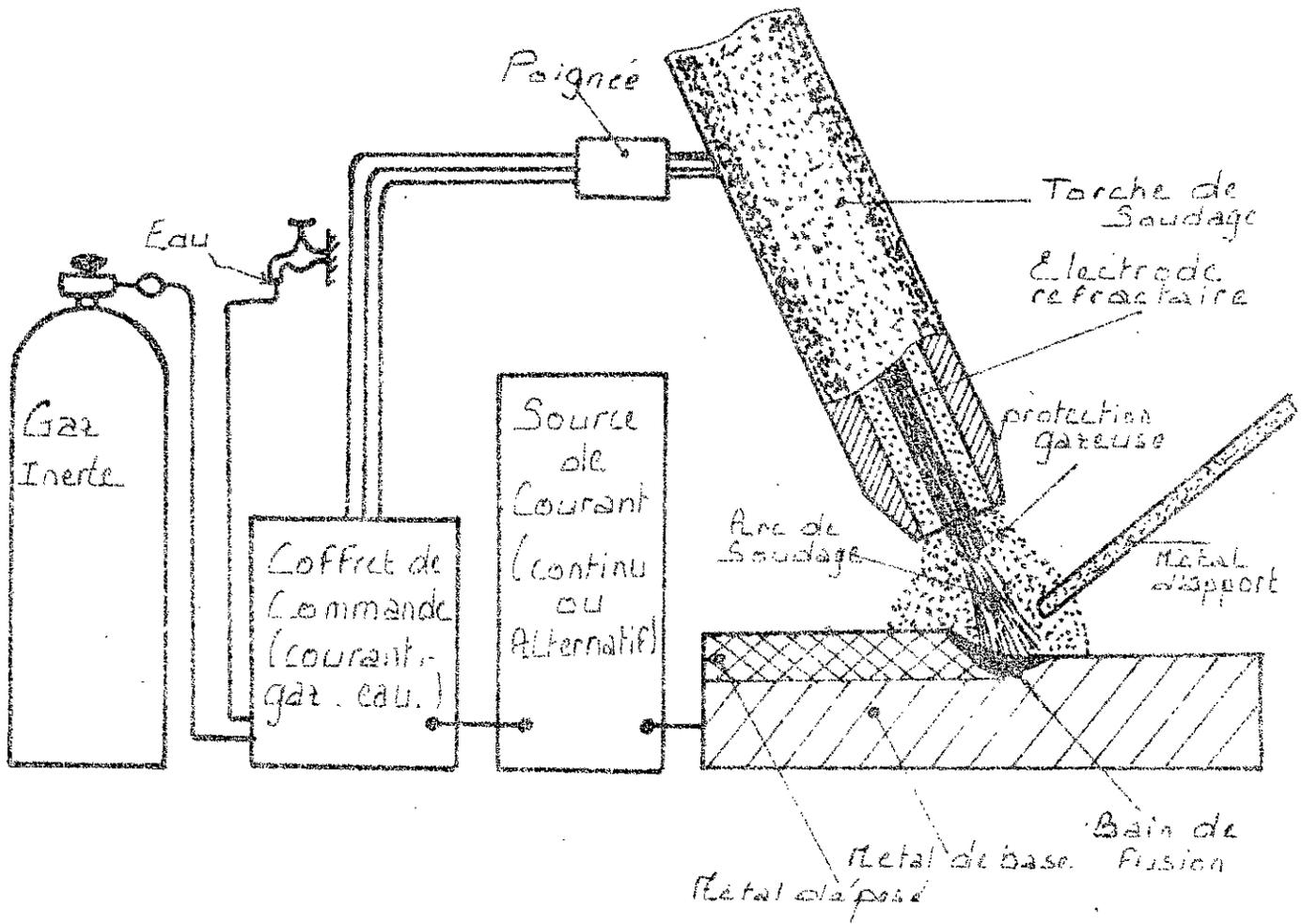
II.2.4. Soudage semi-automatique sous protection gazeuse (M.I.G. Métal Inert Gaz)

Dans le cas de ce procédé, la source d'énergie est de type électrique, le métal d'apport se présente sous forme d'un fil électrode plein ou fourré dont le diamètre varie entre 0,5 mm et 3,2 mm, il offre l'avantage d'une vitesse de dépôt du métal plus élevée et la possibilité d'opérer à de plus fortes intensités de courant, d'où une pénétration plus profonde. Le courant électrique auquel le fil est soumis produit un arc entre son extrémité et la pièce. L'arc engendre la fusion de l'extrémité du fil et la fusion locale des pièces à assembler.

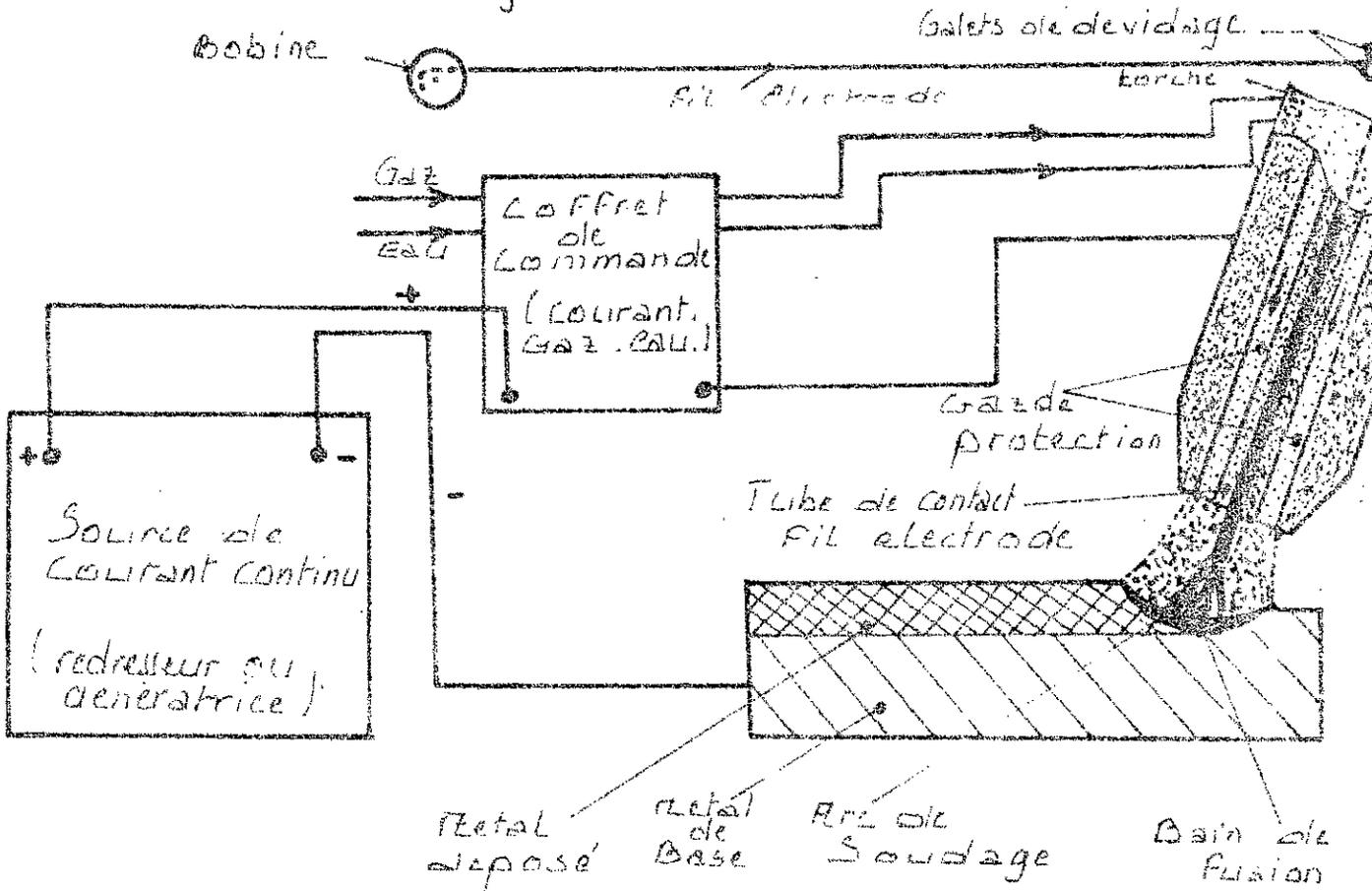
La protection du bain de fusion contre la contamination atmosphérique est assurée essentiellement soit par des gaz inertes ou actifs, soit par le flux continu dans un fil électrode fourré.

La protection est assurée par un gaz inerte, il s'agit le plus souvent de l'argon, tandis que si la protection est assurée par un gaz actif, c'est le plus souvent le dioxyde de carbone, dans le cas où la protection est assurée par ce flux dans un fil fourré, on doit prévoir une protection gazeuse supplémentaire qui est le dioxyde de carbone, on remarquera aussi les épaisseurs soudables en M.I.G. sont plus fortes qu'en T.I.G.

Il est intéressant de préciser que les avantages du soudage M.I.G. sont les mêmes que celles de T.I.G., mais un avantage primordial est que le procédé M.I.G. est un procédé semi-automatique ou automatique qui ne réclame pratiquement aucune opération de finition, donc présente une productivité nettement supérieure à celle du procédé T.I.G. et des autres tel que le soudage manuel à l'arc, ce procédé permet de souder tous les types de joints en toutes positions, grâce à la puissance de courant élevée applicable et à la forte pénétration obtenue, ce procédé permet de souder des joints de fortes épaisseurs sans préparation des bords, donc vu les dualités et les avantages de ce procédé, j'opterai pour son choix, dans la soudure des différents tubes sur la cuve et des différentes brides sur les tubes.



Soudage TIG



Soudage MIG

II.2.5. Soudage par bombardement électronique

C'est un procédé de soudage avec fusion, dans lequel l'énergie est produite par un faisceau d'électrons sur la pièce. Les parties principales de l'installation de soudage par bombardement électronique sont :

- Le canon à électrons dans lequel le faisceau d'électrons est produit et accéléré ;
- Le système de focalisation et de positionnement du faisceau ;
- La chambre de soudage où la pression doit être réduite dans le but de permettre le passage des électrons et d'éviter la détérioration de la cathode ou du filament à haute température.

Expliquons le principe de ce procédé ; le faisceau d'électrons est produit par un appareil fonctionnant sous vide et appelé canon à électrons, ce faisceau d'électrons est produit par un filament chauffé ou cathode, la direction et l'accélération des électrons étant obtenues par une différence de potentiel élevée entre la cathode et une anode située à une certaine distance, dans certaines machines la pièce constitue l'anode ; pour avoir une focalisation précise du faisceau, il faut que la pièce soit électriquement conductrice et que le canon ne soit pas trop éloigné de celle-ci, dont la forme et la surface affectent d'autre part la focalisation et le réglage du faisceau, mais ce type de canon est très peu utilisé, on préfère le canon avec anode, pour cela on utilisera une plaque percée comme anode, d'où peut passer le faisceau d'électrons par le trou de la plaque et dirigé sur la pièce. Le faisceau diverge à l'approche de la pièce, pour cela on y remédie par un système de lentilles entre l'anode et la pièce, pour focaliser le faisceau, c'est-à-dire une lentille électromagnétique, on règle la distance focale de la lentille en faisant varier l'intensité de la bobine.

Les types de canons couramment utilisés sont :

./.

- Ce canon de Pierce qui est conçu de façon que sa configuration, en particulier la distance anode-cathode puisse être modifiée pour faire varier l'intensité du faisceau.
- Canon de type triode avec Wehnelt polarisé, l'intensité du faisceau est réglée par le potentiel négatif auquel on porte une électrode placée autour de la cathode (Wehnelt polarisé), le potentiel négatif auquel est porté le Wehnelt peut varier de façon continue de 0 à 1000 V, ce qui permet de régler l'intensité du faisceau, c'est-à-dire influe sur la focalisation du faisceau.

Les canons utilisés pour le soudage par bombardement électronique et comportent un dispositif électromagnétique de focalisation ont une tension d'accélération comprise entre 15 et 150 KV, le détail du faisceau pouvant atteindre 0,5 A. La taille de la tache focale est un facteur important en soudage, car la largeur de la soudure en dépend directement, on peut difficilement obtenir une très petite tache focale, mais avec une tension élevée et une faible intensité du faisceau on peut obtenir une petite tache focale.

Dans ce procédé la chaleur est obtenue par la transformation de l'énergie cinétique des électrons frappant la pièce en énergie thermique.

Pour ce qui est des tensions de soudage, on a deux types de canons : canons à haute tension c'est-à-dire de 70 à 150 KV et canons à basse tension c'est-à-dire de 15 à 30 KV, les canons à haute tension permettent d'obtenir des taches focales plus petites et une plus grande pénétration, il est souhaitable d'avoir dans ce cas le canon fixe et la pièce qui se déplace.

Pour ce qui est de notre cas, on utilisera un canon de haute tension, vu la grande épaisseur à souder. En soudage par bombardement électronique, on obtient une pénétration très pointue.

Donc en conclusion, j'opterai pour ce soudage par bombardement électronique pour l'assemblage des demi-cylindres (virole) et des quarts de sphère (fonds hémisphériques) du faite des grands avantages technologiques, telles que la qualité de la soudure, la très faible zone thermique affectée, la forte pénétration qui améliorent les propriétés mécaniques des joints.

II.2.6. Cycles thermiques de soudage

Pendant que la source de chaleur se déplace le long des bords à souder, le matériau environnant s'échauffe, atteint une température maximale, puis se refroidit.

La loi suivant laquelle la température varie, en un point de la pièce en fonction du temps s'appelle "cycle thermique de soudage" ; pour étudier ce phénomène expérimentalement on perce un trou à l'endroit voulu et on y introduit, convenablement isolée, l'extrémité sensible d'un thermocouple relié à un groupe amplificateur-enregistreur ; l'allure générale de ce cycle thermique est représentée par la fig. de la page suivante, nous distinguons dans ce cycle thermique :

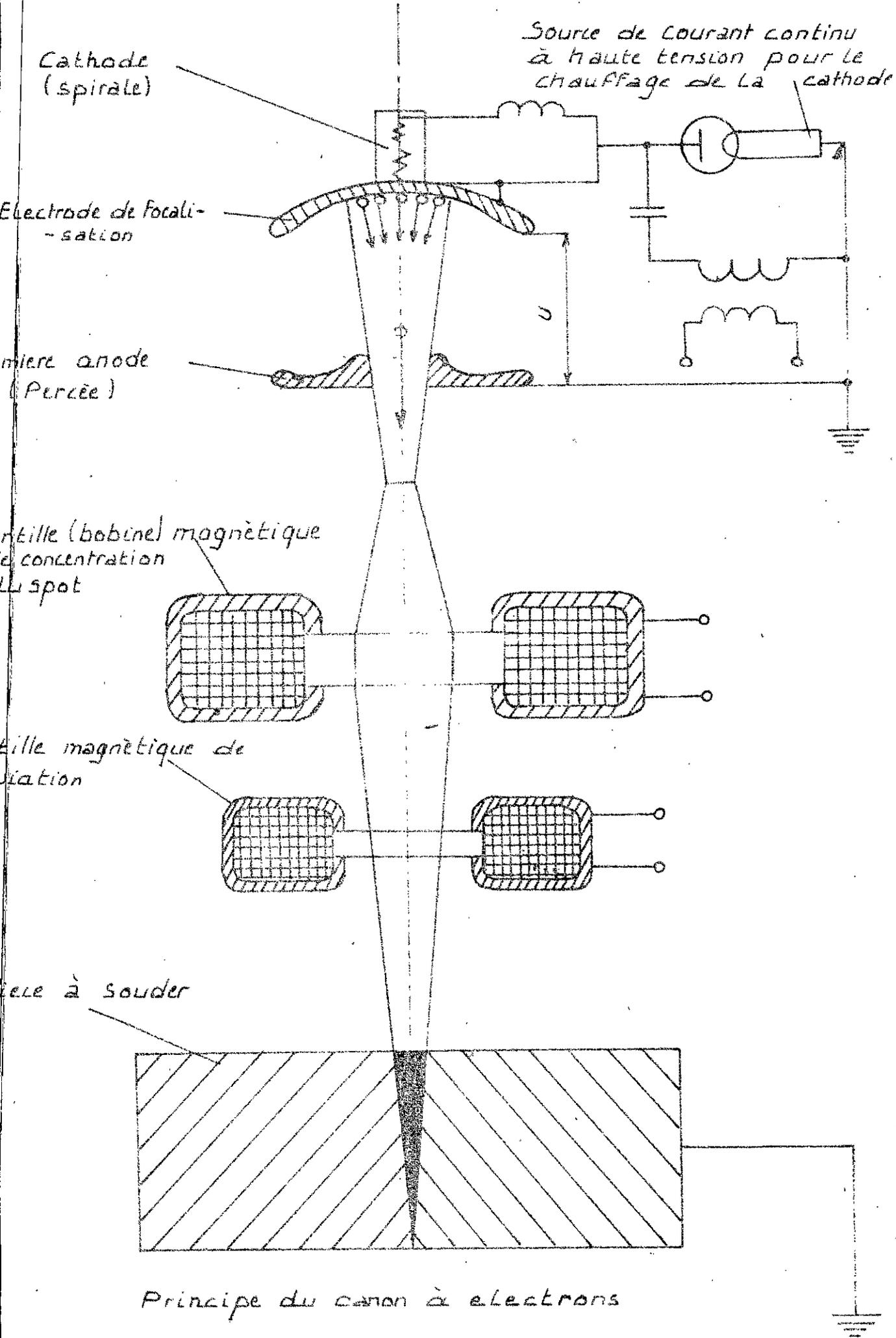
- une phase de réchauffage ;
- un maximum de température atteinte ;
- un temps de maintien à haute température ;
- une phase de refroidissement.

Les cycles thermiques dépendent des variables suivantes :

- position et distance du point considéré par rapport à la ligne de soudure ;
- procédé de soudage et ses paramètres ;
- épaisseur des pièces et types de joints ;
- température initiale de la pièce.

a/ Influence de la position du point :

La distribution de la température aux différents points de la pièce en un instant donné est donnée par les isothermes de la fig. suivante. Chaque isotherme est une ellipse dont le petit axe est d'autant plus déplacé vers l'arrière, que la température à laquelle correspond



l'isotherme est plus faible. Les points qui ; à un certain moment se trouvent en avant du petit axe de l'ellipse correspondante sont dans la phase de reheuffage, tandis que ceux qui se trouvent en arrière sont en train de se refroidir. La ligne en trait interrompu, divise la tôle en deux zones :

- une zone antérieure qui est le siège des points se trouvant encore dans la phase de réchauffage ;
- une zone postérieure dont les points sont en cours de refroidissement.

b/ Influence du procédé :

La variable qui du point de vue des cycles thermiques, distingue les différents procédés de soudage est la quantité de chaleur introduite par centimètre de joint.

c/ Influence de l'épaisseur et du type de joint :

La chaleur introduite dans le joint par l'opération de soudage s'élimine principalement par conduction à travers le matériau, donc doubler l'épaisseur de la pièce revient à doubler la vitesse de refroidissement ; on doit tenir compte aussi de la géométrie du joint.

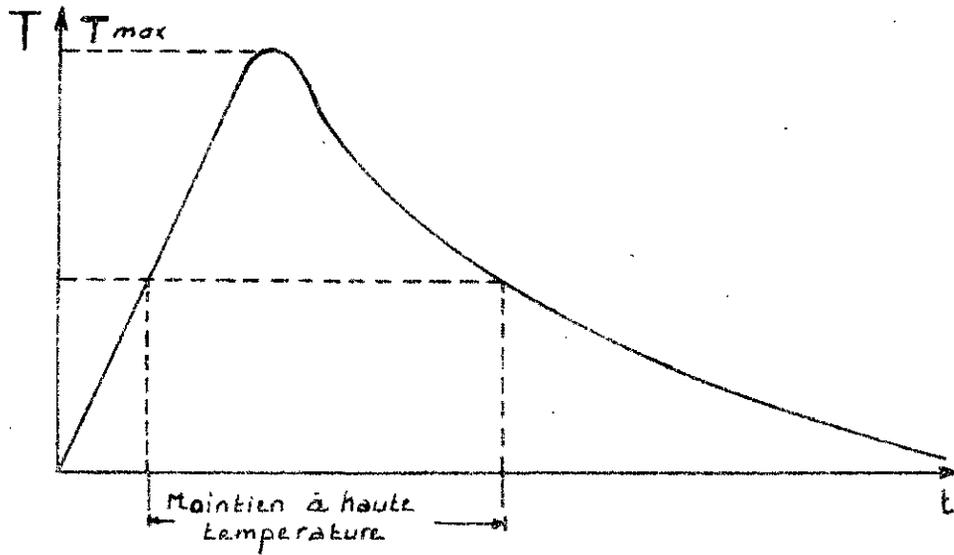
d/ Influence du matériau de base :

Les propriétés physiques du métal qui influencent le plus les cycles thermiques pour la conductibilité thermique et la chaleur spécifique.

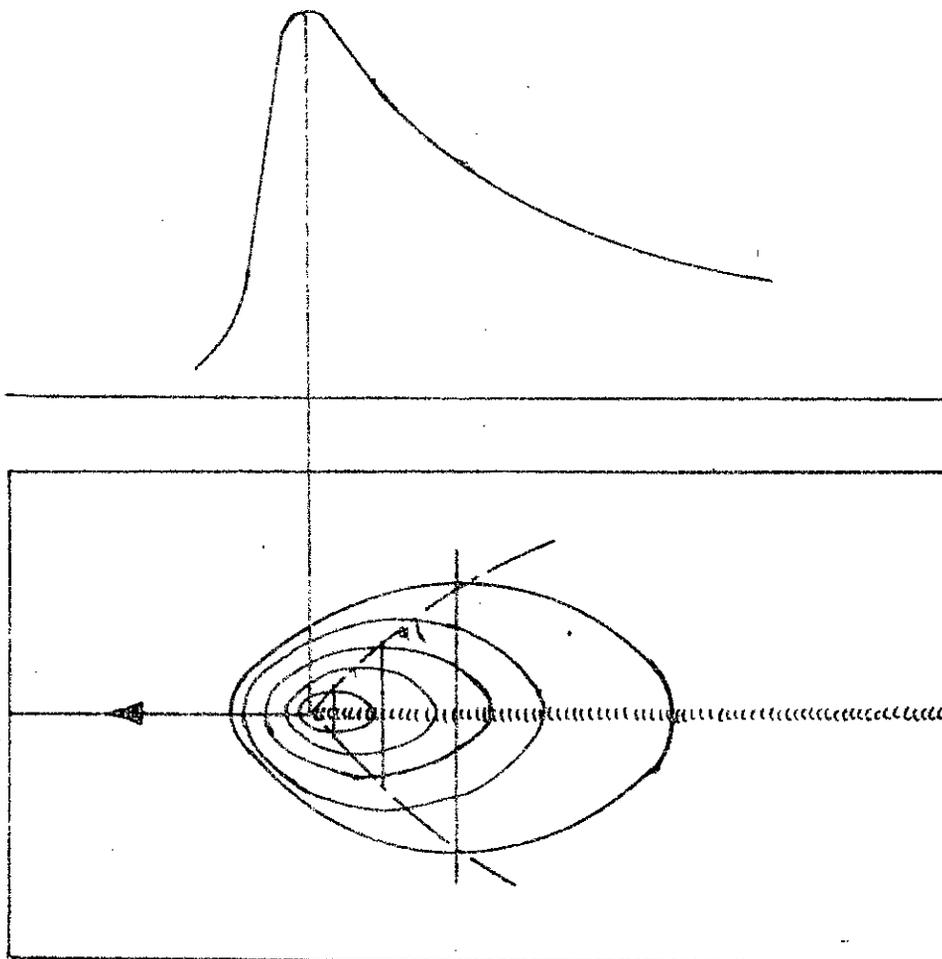
En ce qui concerne les aciers, on peut dire que l'influence des éléments d'alliage par la conductibilité thermique est très modeste.

e/ Influence de la température des pièces :

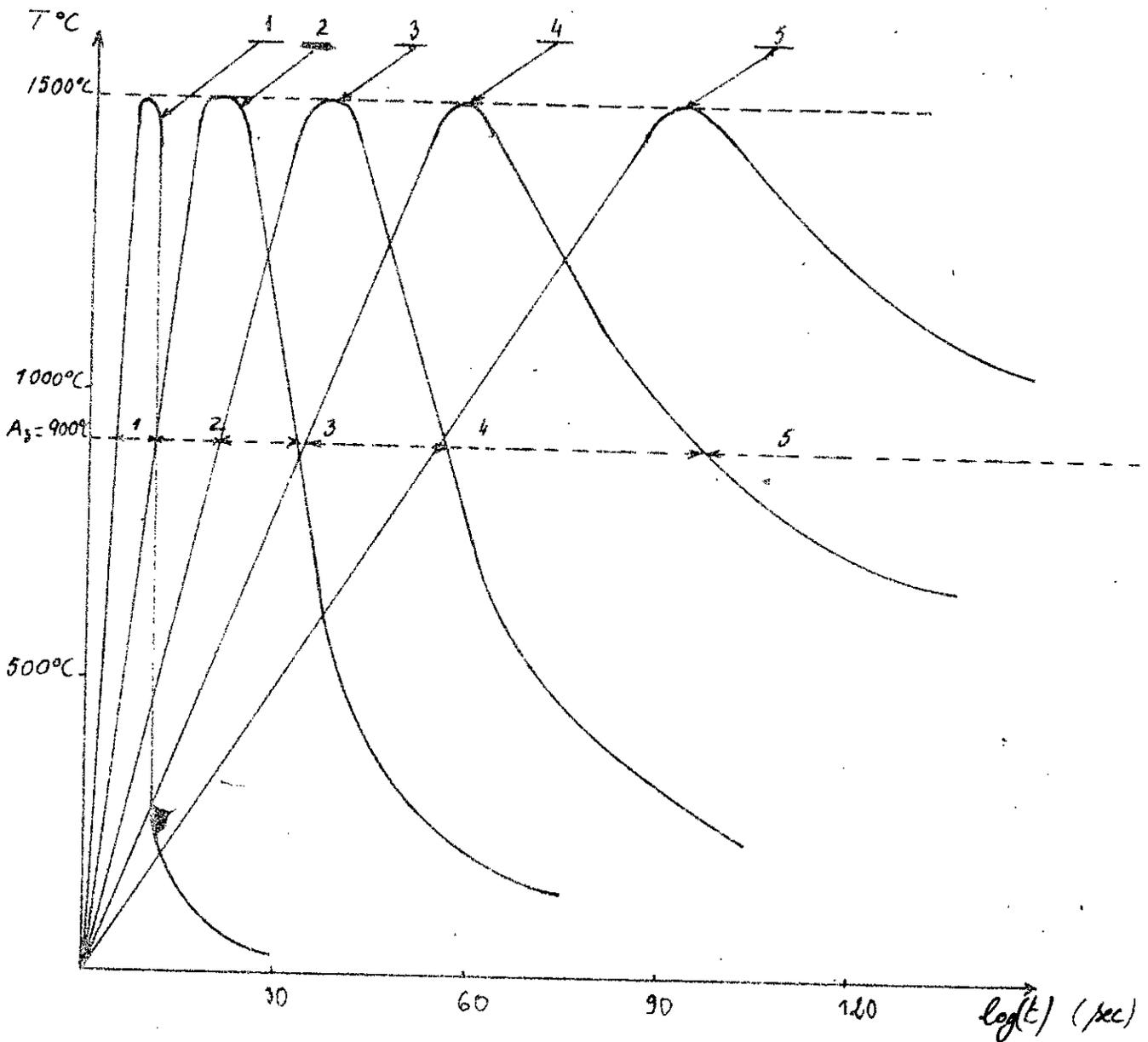
Plus la température initiale des pièces est élevée et plus le refroidissement est lent.



Cycle thermique de soudage et ses différentes phases



Distribution de la température au cours du soudage. Isothermes elliptiques et cycle thermique des points situés sur la ligne de Fusion



- 1 - cycle thermique de soudage par bombardement électronique
- 2 - cycle thermique de soudage TIG et MIG
- 3 - cycle thermique du soudage à l'arc
- 4 - cycle thermique du soudage sous flux solide
- 5 - cycle thermique du soudage sous laitier conducteur

[6]

II.2.7. Tensions résiduelles de soudage

Comme toute opération de soudage peut être assimilée du point de vue thermique, à un processus de chauffage non uniforme, dont le joint sera le siège de tensions internes.

a/ Contraintes longitudinales :

Pendant que la source de chaleur se déplace, le métal chauffé tend à s'allonger, mais le matériau froid adjacent agit par auto-bridage en s'opposant aux dilata-tions. La bande chaude subit d'abord une compression élastique et ensuite plastique. Les fibres longitu-dinales, refoulées à chaud, exerceront, au cours du re-froidissement, une traction sur le métal de base adja-cent. Le joint terminé se trouvera entièrement tendu dans le sens longitudinal, la tension ne s'annulant qu'aux extrémités.

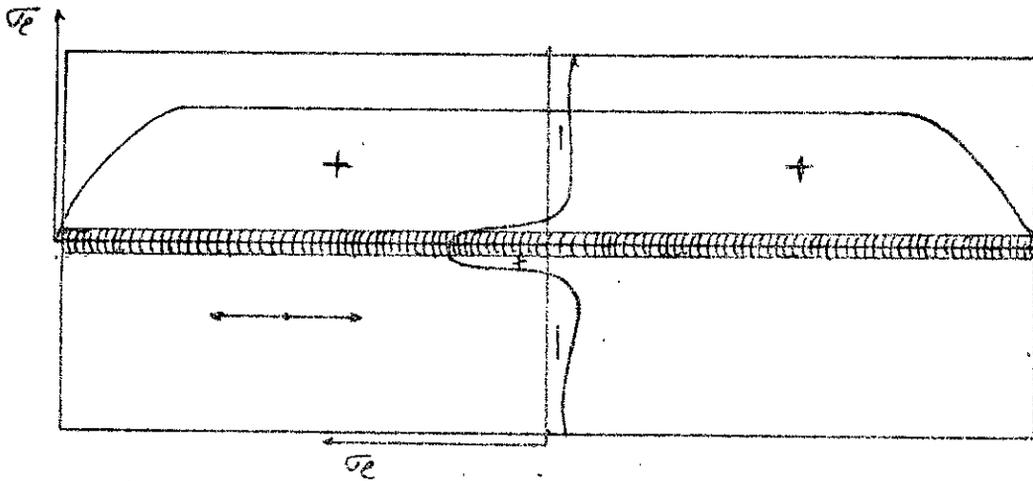
La fig. de la page suivante montre l'allure des ten-sions résiduelles longitudinales.

b/ Contraintes transversales :

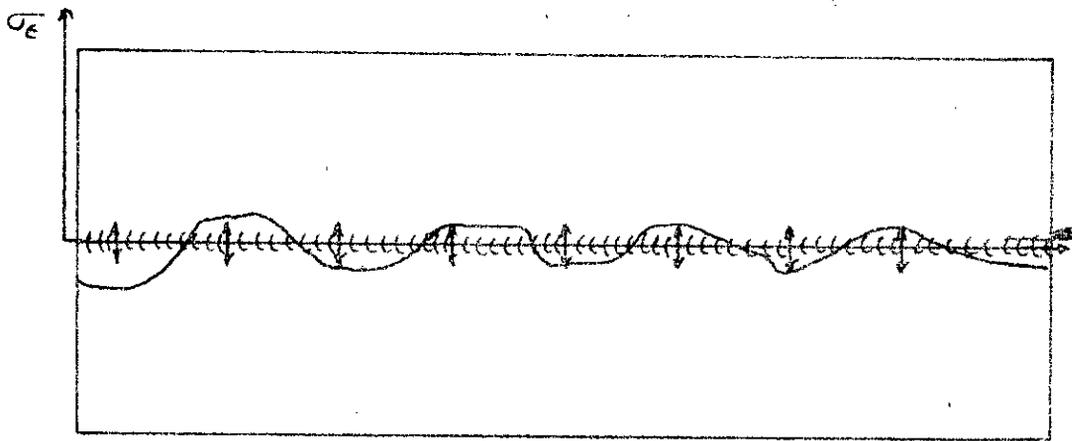
Pendant l'exécution de la soudure dans le sens trans-versal, on assiste entre un état de traction et un état de compression, ce dernier réduit le premier jus-qu'à l'annuler ou même l'inverser totalement. Le dérou-lement du phénomène est sensiblement influencé par le nombre des passes, par le pointage des bords, par ce procédé de soudage utilisé, par l'épaisseur des tôles, par la vitesse d'avancement, etc.

La fig. de la page suivante représente schématiquement une distribution possible des tensions résiduelles transversales.

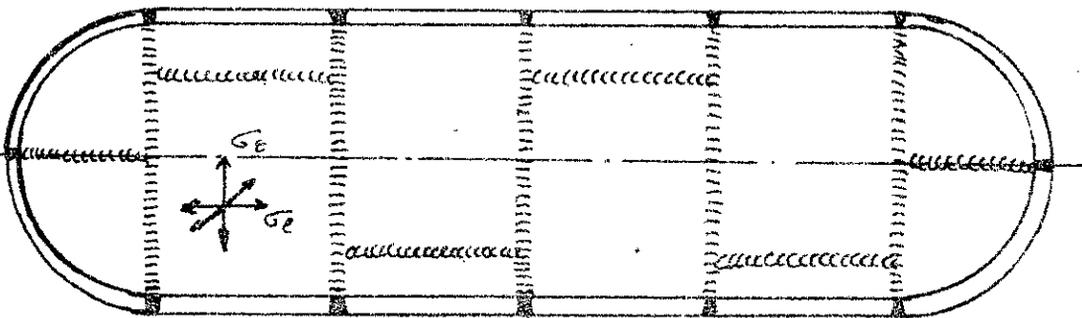
- Contraintes dues à l'épaisseur.



Tensions résiduelles longitudinales le long de l'axe et sur une section transversale du joint



Allure irrégulière des tensions résiduelles transversales sur l'axe du joint



Les contraintes longitudinales et transversales dans un récipient à pression

II.2.8. Précautions à prendre pour réaliser de bonnes soudures

- Choisir un métal de base parfaitement soudable.
- N'utiliser que de bonnes électrodes.
- N'employer que des soudeurs ayant de sérieuses qualités professionnelles.
- Contrôler la valeur professionnelle des soudeurs par vérification des soudures aux rayons X.

Un soudage défectueux peut produire plusieurs défauts dont les principaux sont les inclusions de laitier et d'oxyde qui se disposent en points, en chaîne ou en bande, les entailles de pénétration et les manques de pénétration.

Les défauts réduisent la résistance d'une soudure, surtout à des charges alternatives dont l'effet de concentration des contraintes est particulièrement important.

Dans les opérations de soudage, le chauffage n'intéresse qu'une partie de la pièce, il est fortement localisé, surtout en soudage électrique.

Au cours du chauffage, la partie chauffée se dilate et le plus souvent au cours de ce chauffage, elle peut se dilater librement, car les deux pièces à assembler ne sont pas encore fixées rigidement l'une à l'autre. Mais au cours du refroidissement, la concentration n'est pas aussi facile, elle entraîne, si les parties voisines de la soudure sont suffisamment chaudes ou si elles peuvent se déplacer, des déformations plus ou moins importantes.

Au contraire, ces parties sont froides ou bien bridées, c'est-à-dire sont rigides par elles-mêmes (par leur masse, par leur forme) soit fixées à un support rigide, il se produit des tensions susceptibles lorsqu'elles sont importantes, de conduire à des fissures ou à des ruptures. Parmi ces dangers on peut citer les criques à chaud et les criques à froid.

- Crique à chaud :

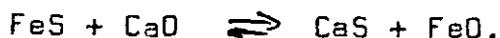
Dans les aciers, il existe des impuretés qui peuvent former de l'eutectique dont la température de fusion est

./.

toujours plus basse que celle de l'acier. Pendant la solidification, les cristallités chassent le liquide au centre jusqu'à la température de fusion, le centre de cordon de soudure reste liquide, et en même temps à partir de la ligne de solidus dans l'assemblage soudé, se présentent des contraintes internes. A la température 1000 et 1100°C elles deviennent très fortes et la soudure peut rompre là où le métal est liquide. Pour y remédier :

- utiliser pour les assemblages soudés des aciers dont la teneur en élément d'addition C, S, P est le plus faible possible.

- utiliser des électrodes à enrobage basique dont le laitier à l'action désulfurante :



- Crique à froid :

Elles proviennent du fait qu'au cours du soudage, le métal fondu absorbe beaucoup d'hydrogène, jusqu'à la sur-saturation.

Les sources d'hydrogène sont :

- l'humidité de l'enrobage ;
- l'humidité de l'air ;
- la présence sur les bords à souder de l'huile, de la calamine (Fer O3).

Pour y remédier :

- sécher les électrodes pour éviter l'eau (H₂) ;
- bien nettoyer les bords à souder ;
- utiliser des électrodes basiques ;
- utiliser les électrodes austénétiques ;
- utiliser le régime correcte de soudage ou un préchauffage.

II.2.9. Défauts des joints soudés

Les principaux défauts rencontrés en pratique sont dûs à une exécution défectueuse des joints soudés. Parmi ces défauts on trouve :

- 1°/ Les inclusions gazeuses : dues aux gaz résultant des réactions chimiques dans le métal de base, dans le métal d'apport et dans le flux et à l'humidité des pièces, pour remédier, il faut avoir comme métal de base, un acier calme et séché.
 - 2°/ Les manques de pénétrations : dus à l'absence de métal à la racine du chanfrein, pour remédier à cela, il faut prévoir une mise en oeuvre correcte des procédés de soudage adoptés, un accostage soigneux des pièces à assembler.
 - 3°/ Manque de fusion : du au mauvais choix des paramètres de soudage (intensité, vitesse de soudage).
 - 4°/ Défauts de surfaces : dus à une mauvaise appréciation des conditions de soudage et lorsque l'exécution des cordons est difficile.
 - 5°/ Fissuration à froid.
 - 6°/ Fissuration à chaud.
 - 7°/ Forme des cordons :
 - cordons trop bombés : intensité du courant de soudage trop faible ;
 - cordons trop étalés : intensité du courant de soudage trop importante ou ces pièces sont surchauffées ;
 - cordons irréguliers : mauvais choix des paramètres de soudage.
- Pour y remédier :
- bon choix des paramètres de soudage.

II.3. CONTROLE DES JOINTS SOUDES

Le but du contrôle réside dans la garantie d'obtenir des joints soudés de qualité supérieure.

Dans le contrôle on distingue trois phases :

- contrôle avant le soudage ;
- contrôle pendant le soudage ;
- contrôle après le soudage.

1.- Contrôle avant le soudage :

Pour le contrôle avant le soudage on doit prévoir :

- choix idéal du procédé de soudage ;
- la préparation des bords ;
- la position et l'accessibilité des joints ;
- les matériaux à employer ;
- les traitements thermiques éventuels.

2.- Contrôle pendant le soudage :

Durant le soudage : on doit prévoir un service de surveillance à la construction.

3.- Contrôle après le soudage :

Les nombreuses erreurs qui interviennent en soudage, dûes essentiellement à des causes technologiques tel qu'un mauvais choix des paramètres du procédé de soudage et dûes essentiellement à une main-d'oeuvre non qualifiée : apportent quelques défauts d'exécution. Pour cela il est obligatoire de détecter ces défauts, on doit prévoir :

a) Contrôle externe du joint :

Ces défauts externes sont caractérisés par :

- irrégularités du cordon ;
- incisions marginales ;
- manque de pénétration ;
- etc.

Ce contrôle se fait en deux phases : l'une permet d'observer à l'oeil nu le joint, l'autre par l'introduction d'un endoscope qui permet l'examen de la pénétration.

./.

b) Contrôle interne au moyen de dispositifs spéciaux :
Afin de déterminer les défauts internes caractérisés par :

- l'inclusion de laitier ;
- soufflures ;
- manque de pénétration ;
- etc.

On devra utiliser des techniques sophistiquées adéquates, qui portent le nom de "contrôles non destructifs".

Ces méthodes de contrôle non destructifs les plus employées sont :

- le contrôle radiographique par les rayons ou gamma ;
- le contrôle ultra sonique ;
- le contrôle magnétique.

La méthode la plus efficace et la plus utilisée est celle de la radiographie.

Méthode des rayons X :

Principe : les rayons X sont des ondes électromagnétiques qui ont une longueur d'onde sensiblement inférieure à la lumière, leur très faible longueur d'onde donne aux rayons X la propriété de traverser les corps qui sont opaques à la lumière ordinaire, elles ont la propriété d'impressionner (noircir les émulsions photographiques).

Les rayons X sont produits par un appareil électrique, par arrêt brutal, sur une plaque convenablement placée, d'un courant d'électrons accélérés par une différence de potentiel élevée. En réglant la différence du potentiel, on agit sur l'énergie cinétique des électrons. Le faisceau de rayons émis par la source est caractérisé par son intensité (dont dépend le pouvoir de pénétration), c'est-à-dire la quantité d'énergie qui passe en une seconde au travers d'un tuyau de 1 cm² perpendiculaire au faisceau.

Les rayons X permettent d'obtenir des résultats de haute qualité.

Méthode des rayons gamma :

Les rayons gamma sont des radiations électromagnétiques de très courte longueur d'onde, susceptibles comme les rayons X de traverser les corps opaques à la lumière ordinaire. Les isotopes radioactifs artificiels ont fait leur preuve dans le domaine de la gammagraphie industrielle qui sont :

- l'iridium 192 ;
- le césium 137 ;
- le cobalt 60.

Avec les rayons gamma, on a le choix de la source radioactive : on préférera l'iridium pour les épaisseurs les plus faibles (de 10 à 60 mm), le césium pour les épaisseurs moyennes (de 30 à 70 mm) et le cobalt pour les épaisseurs les plus importantes (de 60 à 160 mm). Une propriété intéressante des rayons gamma est la sphéricité de l'émission à partir de l'isotope qui offre la possibilité d'effectuer des radiographies circumférentielles en une seule exposition.

Pour que le contrôle radiographique soit possible, il faut disposer :

- d'un accès pour l'appareil émetteur de rayons X ou pour la source de rayons gamma ;
- d'une vue dégagée de la soudure à partir de la source ;
- d'un emplacement disponible pour les films et les écrans renforçateurs en dessous de la soudure.

Méthode des ultra-son :

Dans le contrôle par ultra-son, on fait passer à travers les joints soudés un rayon étroit d'énergie ultrasonore, émis à partir d'un palper ; les ondes ultrasonores sont produites par le passage de pulsations électriques dans un cristal qui aux fréquences de résonance le font vibrer à sa fréquence naturelle, le domaine des fréquences utilisées pour le contrôle des soudures est de l'ordre de 1 à 5 MC/sec.

Dans le contrôle par ultrason, il faut que le palpeur puisse être déplacé sur une surface régulière, accessible au droit du joint ou bien de chaque côté de celui-ci, donc notre cas, la méthode de contrôle par ultrason ne convient pas aux exigences géométriques.

Comparaison des avantages et des inconvénients des différentes méthodes de contrôle.

RAYONS X

Avantages

Inconvénients

-
- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">- Radiographies contrastées et de haute sensibilité.- Adaptation aisée des tensions d'alimentation aux différentes épaisseurs.- Facilité d'interruption du rayonnement. | <ul style="list-style-type: none">- Coûts d'investissement et de remplacement élevés.- Difficultés de transport, fragilité, encombrement important poids croissant avec les épaisseurs à radiographier.- Nécessité d'une source d'énergie électrique. |
|---|---|
-

RAYONS GAMMA

-
- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">- Poids et encombrements relativement faibles.- Robustesse.- Bon pouvoir de pénétration.- Possibilité d'introduction de la source à travers des orifices de faibles dimensions.- Coûts d'investissement de fonctionnement et d'entretien modérés.- Fonctionnement sans source d'énergie complémentaire. | <ul style="list-style-type: none">- Sensibilité moindre que celle des rayons X.- Impossible d'adapter le pouvoir de pénétration.- Rayonnement continu avec les risques qui en découlent.- Diminution continue du pouvoir émissif de la source, nécessitant l'ajustement des temps de pose.- Durées d'exposition plus longues qu'avec les rayons X |
|--|---|
-

ULTRASONS

-
- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">- Equipement compact et portatif.- Absence d'interruption des autres travaux pendant le contrôle.- Disponibilité immédiate des résultats des essais. | <ul style="list-style-type: none">- Haute qualification et expérience de l'opérateur pour l'interprétation des résultats d'essai.- Absence d'enregistrement des résultats d'essai. |
|--|---|
-

II.4. ESSAIS HYDRAULIQUES

L'essai hydraulique d'une cuve de chaudière doit être réalisé une fois terminée la construction de toutes les parties de la cuve de chaudière, c'est-à-dire après la réalisation de toutes les soudures.

Pour cela on doit prendre toutes les précautions nécessaires pour assurer la sécurité du personnel pendant l'essai, on veillera en particulier à bien évacuer tout l'air contenu dans la cuve de chaudière. La température du métal pendant l'essai doit être suffisante pour éviter les accidents par rupture fragile sans être cependant supérieure à 70°C pour permettre l'examen des parties de la cuve sous pression pendant l'essai.

La pression d'essai hydraulique est égale à 1,5 fois la pression de service de la cuve de chaudière.

Après avoir rempli d'eau la cuve de chaudière, essayé et purgé les poches d'air, on doit élever lentement la pression jusqu'à la valeur requise et on maintient cette pression pendant 10 mn, ensuite il est recommandé alors de réduire la pression à la valeur de la pression de service avant de s'approcher de la cuve de chaudière essayé, cette pression de service est alors maintenue pendant tout le temps nécessaire à l'examen des parois, en particulier, tous les joints soudés doivent être soumis à un examen visuel attentif. Dans le cas où il ne produit aucune fuite au cours de l'essai et on ne constate ni fissure ni déformation remanente notable, alors on pourra dire que l'essai hydraulique est satisfaisant.

II.5. CHOIX DES EQUIPEMENTS DE LA GAMME DE FABRICATION

II.5.1. Réception des tôles

Vu les grandes dimensions de notre cuve de chaudière, dont la construction doit faire appel à des tôles de grandes dimensions qui à notre connaissance exige des moyens de fabrication très chères et complexes donc on a été obligé, de faire un assemblage soudé répondant aux exigences de travail et de fonctionnement de la cuve de chaudière, pour cela on a opté pour l'assemblage de 8 demi-cylindres pour former la virole cylindrique de la cuve et de 4 quarts de sphère pour former les 2 fonds hémisphériques, donc on a été obligé de commander des tôles répondant aux exigences dimensionnelles et technologiques.

Donc pour la réalisation d'une cuve de chaudière, on doit avoir : 8 tôles de dimensions chacune : 3000 x 2500 x 135mm pour la conception des 8 demi-cylindres après bien sûr plusieurs opérations qui seront citées par la suite, 4 tôles de dimensions chacune : 3000 x 2000 x 135 mm pour la conception de 4 quarts de sphère.

Réception des tubes

Pour les diverses tuyauteries de liaison, on a des tubes qui sont fabriqués par un procédé sans soudure, d'après NF A 49.213.

Les dimensions et masse linéique pour les tubes laminés à chaud dans notre cas, on a :

- un tube : une rampe percée d'orifices et placées sous le niveau normal du plan d'eau qui est relié par une tuyauterie d'alimentation en eau, venant de l'économiseur -
- avec nos dimensions de conception et d'après NF A 49 213 nous donne :
- . \varnothing extérieur : 273 mm
 - . épaisseur : 50 mm
 - . masse linéique : 275 kg/m
 - . longueur : 12 m.

./.

- 4 tubes pour les tuyauteries de descente d'eau :
 - Ø d'après AFNOR NF A 49 213
 - . Ø extérieur : 368 mm
 - . épaisseur : 50 mm
 - . masse linéique : 392 kg/m
 - . longueur : 1 m.
- 2 tubes pour les tuyauteries de départ de la vapeur d'après AFNOR NF A 49 213
 - . Ø extérieur : 273 mm
 - . épaisseur : 50 mm
 - . masse linéique : 275 kg/m
 - . longueur : 1 m.
- 60 tubes de dégagement du vaporisateur dont les raccordements sont répartis sur la virole, ils seront soudés, d'après AFNOR NF A 49 213
 - . Ø extérieur : 139,7 mm
 - . épaisseur : 25 mm
 - . masse linéique : 70,7 kg/m
 - . longueur : 0,5 m.

Réception des brides

Pour la réception des brides, pour les différents tubes, nous faisons le choix des brides à souder, plates d'après NF A 29 281 à E 29 283. La nuance d'acier de ces différentes brides sera la même que celle des tubes, c'est-à-dire 15 CD 2 05 après réception les brides doivent subir un contrôle.

II.5.2. Contrôle des tôles

Il est très important de contrôler les tôles réceptionnées, du faite de leur grande dimension et de leur forte épaisseur, afin de détecter les défauts, vu l'important travail qui va être effectué durant la fabrication de la cuve de chaudière, tel que l'emboutissage, le soudage et autres, donc nous devons faire appel à une méthode de détection de défauts non destructive et précise, pour cela on a opté pour le contrôle aux ultrasons dont le principe est le

./.

suyvant : le contrôle aux ultrasons est un contrôle non destructif. Chaque signal est transmis à la pièce à examiner au moyen d'un palper émetteur et recueilli à la sortie par un palper récepteur. Les ultrasons se propagent dans le métal à la vitesse du son (5000 m/s dans l'acier), s'il se trouve un défaut sur le trajet des ultrasons, ce défaut donne lieu à une réflexion, qui atteint le palper dans un temps intermédiaire, il occupe également une position intermédiaire sur l'écran, cette position permet de déterminer la profondeur à laquelle se trouve le défaut dans la tôle. La méthode ultrasonore contrôle des tôles d'épaisseur très grande et capable de révéler les défauts les plus fins.

Choix de l'appareil de contrôle

Le contrôle sera effectué aux ultrasons, l'appareil retenu à cet effet est du type réflectoscope 190 caractérisé par :

- . dimension oscilloscope 80 x 100 mm
- . poids 17 kg
- . visualisation : vidéo et RF
- . émetteur : 1000 V/grand pouvoir de pénétration
- . gamme de fréquence étendue : 0,4 à 2FMHz
- . conception modulaire
- . récurrence automatiquement réglable de 62 à 2000 Hz.

II.5.3. Traçage préliminaire des tôles réceptionnées

Pour déterminer le contour, le traceur dispose des dessins établis par la gamme de fabrication qui définissent les formes et les dimensions de la tôle. Dans notre cas on a effectué un traçage préliminaire du faite que les tôles vont être coupées par oxycoupage au plasma, du faite de la forte épaisseur des tôles et on aura des zones thermiquement affectées donc on doit les supprimer par usinage, une autre cause du traçage préliminaire, qui est dû à l'emboutissage, car la préparation des flans n'est pas très précise et on opère en flan approché et ensuite on corrige les tôles par usinage. Vu le grand poids des tôles à tracer, il est important de prévoir des tables spéciales, qui sup-

./.

portent ce poids pour tracer des contours rectangulaires on utilise une table trusquin. Pour tracer des contours circulaires on utilise un compas à verge qui sont montés sur des règles de 1 à 4 m de longueur.

II.5.4. Découpage des tôles

Le coupage des tôles, vu leur forte épaisseur, se fera par plasma coupage et le coupage se fera suivant le tracé préliminaire des tôles.

Les plasmas sont des milieux gazeux portés à un taux d'ionisation élevé, de ce fait ils sont conducteurs bien que globalement neutres. Si on soumet une colonne de plasma à une convection forcée (en l'entourant par un tube annulaire refroidi à l'eau) elle subit un étranglement et un accroissement de température, l'arc est alors confiné ou étranglé, sa température atteint 30.000°K pour les applications industrielles.

Le principe du plasma coupage repose sur le fait qu'en faisant jaillir un arc confiné entre la pièce et l'électrode, on obtient des températures élevées on peut ainsi fondre une zone très localisée de la pièce. Le jet de plasma qui est projeté à une grande vitesse chasse le métal fondu, la saignée est obtenue par déplacement continu de l'arc.

Les avantages du plasma coupage résident dans le fait que ce procédé permet de découper tous les métaux même les plus réfractaires, il permet ainsi une grande augmentation de la productivité en agissant sur les paramètres du régime, un autre avantages est que la zone thermiquement affectée est faible.

Pour le découpage des aciers doux, le procédé ne peut pas concurrencer l'oxycoupage dans les épaisseurs découpées, celles-ci peuvent atteindre 1500 mm et plus pour l'oxycoupage, alors qu'elles ne sont que de 300 mm pour le plasma coupage. L'inconvénient est que l'appareillage est complexe Le choix du plasma coupage réside dans le faite que le procédé est plus économique que l'oxycoupage, on a une

bonne qualité de coupe et les effets métallurgiques, zones thermiquement affectées.

Choix de la machine

Le choix de la machine est AMP 402, elle est conçue pour le plasma coupage à air des métaux ferreux et non ferreux ainsi que leurs alliages. L'épaisseur maximum coupée est de 160 mm pour l'acier alors que nos tôles ont une épaisseur de 135 mm, les opérations suivantes peuvent être exécutées :

- . coupage des tôles
- . coupage des tubes
- . chanfreinage jusqu'à des angles de 45°.

Cette machine est constituée d'une armoire dans laquelle se trouve la source d'alimentation et tout l'appareillage électrique et d'un plasmatron.

Le plasmatron peut être monté sur une machine pour oxycoupage ou n'importe quel équipement capable de donner un mouvement continu au plasmatron avec les vitesses voulues.

Spécification

- L'alimentation principale :
 - 3 phases 50 Hz : 380 V, 400 V, 415 V
 - 3 phases 60 Hz : 330 V, 440 V.
- Courant de fonctionnement : 400 A.
- Tension à vide : 300 V.
- Tension d'arc : 250 V.
- Gamme de courant 150 ÷ 450 A
- Gaz plasmagène : air.
- Pression d'air : $4 \cdot 10^5$ Pa.
- Débit d'air : 0,42 ÷ 1,12 l/s (1,5 ÷ 8,0 m3/h).
- Refroidissement de plasmatron : air.
- Pression d'eau : supérieure à $1,5 \cdot 10^5$ Pa.
- Débit d'eau : supérieur à 0,5 m3/h.
- Dimensions 850 x 1124 x 1800 mm.
- Masse : 1000 kg.

./.

Vitesses optimales de coupe à 400 A
(m/min).

| METAL | EPAISSEUR (MM) | | | | | | | | |
|-------|----------------|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|------|
| | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 60 | 80 | 100 | 160 |
| Acier | 6,0 | 4,9 | 2,5 | 1,56 | 0,8 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | 0,05 |
| Cu | 5,0 | 3,0 | 1,6 | 0,7 | 0,6 | 0,3 | 0,1 | 0,05 | - |
| Al | 10,0 | 7,2 | 4,0 | 2,5 | 1,6 | 0,7 | 0,5 | 0,2 | 0,1 |

Remarque

Tout le dispositif de déplacement du plasmatron (y compris le support fixe) peut être monté sur un chariot ce qui permettra le découpage de tôles de grandes dimensions.

Le guidage se fera suivant le tracé sur tôle, par des chariots automoteurs porte chalumeau, guidés par une règle ou par un compas.

II.5.5. Mise en forme des tôles

Du faite de la grande épaisseur de nos tôles et des formes à obtenir, on a été obligé de faire un emboutissage à chaud. L'emboutissage à chaud diffère de l'emboutissage à froid par le fait que les tôles et parfois aussi les outillages sont portés à haute température.

Le choix de l'opération à chaud est dû aux considérations suivantes :

- L'élévation de température diminue la résistance du métal à la déformation et annule son élasticité.
- L'élévation de température peut entraîner des transformations favorables à la déformation.
- On peut opérer au dessus de la température de recristallisation et éviter ainsi l'écrouissage et ses conséquences.

L'emboutissage à chaud est réalisé exclusivement sur presse hydraulique, il est réservé aux tôles fortes, comme c'est le cas de nos tôles.

./.

Avant d'emboutir les tôles on doit chauffer celles-ci dans un four, le type de four idéal est bien le four à sole mobile qui est adapté au chauffage des grosses pièces, le chargement et le déchargement sont faits lorsque la sole est à l'extérieur du four, le four est chauffé au gaz naturel.

Il comporte deux rangées de brûleurs superposées en vue de répartir la chaleur la plus uniformément possible.

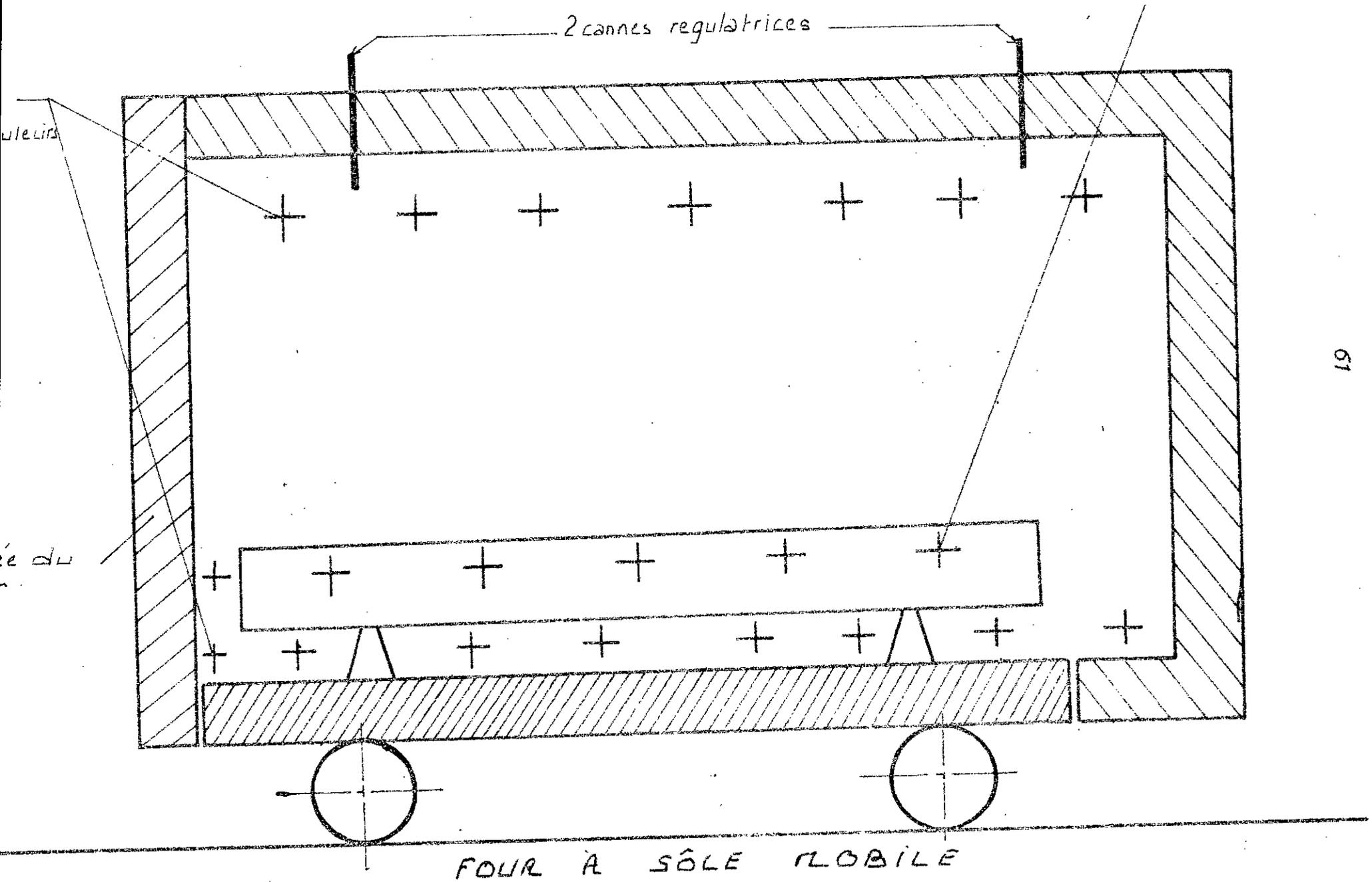
Pour mesurer la température on utilise des cannes pyrométriques réparties dans la voute et dans les parois latérales. Les températures peuvent être lues dans un cadran et enregistrées sur une bande de papier. Des dispositifs permettent d'assurer la régulation automatique du four à partir des températures enregistrées.

Il est surtout très important d'obtenir une température des tôles homogène sur toute la surface, pour obtenir une déformation uniforme.

La température à atteindre dans le cas de notre acier, étant donné que celui-ci est un acier hypocutectoïde est $T = T_{AC_3} + 30 + 50^{\circ}C$, le but de ceci est d'éliminer la structure grossière et de produire des structures perlitiques à grains fins régulièrement répartis, ce qui correspond pour un acier perlitique aux propriétés mécaniques optimales.

Pour ce qui est de l'outillages pour emboutissage à chaud des tôles d'acier, sont généralement en fonte Ft 26, matériel suffisant pour résister aux faibles pressions uniaxiales, mises en jeu.

- . Préparation des plans : il est pratiquement impossible d'opérer en flan juste, dans l'emboutissage à chaud, pour cela on opère en flan approché et ensuite on corrige la tôle par différents procédés.
- . Choix de la machine à emboutir : l'emboutissage à chaud est réalisé exclusivement sur presse hydraulique et ce choix dépend surtout du cycle de travail et de la pression maximale à atteindre, dans notre cas on a des tôles



fortes et les seules presses qui répondent à ces exigences sont les presses hydrauliques.

Calculons l'effort d'emboutissage dans le cas des tôles rectangulaires, découpées suivant le traçage préliminaire

$$F = L \cdot e \cdot R_r$$

L : périmètre de la tôle à emboutir en mm.

e : épaisseur de la tôle à emboutir en mm.

R_r : résistance à la rupture de la matière à emboutir en hbar

pour notre acier 15 MDV 4.05 d'après AFNOR NF A 36 206 :

R_r = 610 N/mm² = 61 hbar à température ambiante.

e = 135 mm.

L = (2380 + 2880) · 2 = 10.520 mm.

R_r à T = 900°C est de l'ordre de $\frac{1}{5}$ R_r à T° ambiante
c'est-à-dire :

$$R_r = \frac{61}{5} = 12,2 \text{ hb.}$$

d'où F = 12,2 · 10.520 · 135 = 17326440 daN

F = 17326 t.

On doit avoir une presse hydraulique de 20.000 tonnes (effort d'emboutissage).

Calculons maintenant l'effort d'emboutissage dans le cas des tôles demi-circulaires, découpe suivant le traçage préliminaire :

$$F = \frac{\pi \cdot d \cdot e \cdot R_r \cdot K}{2}$$

d : Ø de l'embouti à mi épaisseur en mm.

e : épaisseur à emboutir en mm.

R_r : résistance à la rupture de la matière à emboutir en hbars.

K : facteur de correction qui dépend du rapport d'emboutissage $\frac{d}{D}$.

D : étant le diamètre du flan, K est donné par le tableau suivant la formule de Scheiler :

./.

| | | | | | | | | | | | | |
|---------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| K | 1 | 0,930 | 0,860 | 0,790 | 0,720 | 0,660 | 0,600 | 0,500 | 0,500 | 0,450 | 0,400 | |
| $\frac{d}{D}$ | | 0,550 | 0,575 | 0,600 | 0,625 | 0,650 | 0,675 | 0,700 | 0,725 | 0,750 | 0,775 | 0,800 |

$$d = 2.770 + 135 = 1.675 \text{ mm.}$$

$$e = 135 \text{ mm.}$$

$$D = \frac{6000}{2} = 3.000 \text{ mm.}$$

$$Rr = \frac{61}{5} = 12,2 \text{ hb.}$$

$$\frac{d}{D} = 0,56 \quad K = 0,940$$

$$\text{d'où } F = \frac{\pi \cdot 1.675 \cdot 135 \cdot 12,2 \cdot 0,94}{2} =$$

$$F = 4.071.326,35 \text{ daN} = 4071 \text{ t.}$$

II.5.6. Elimination des zones métallurgiquement affectées et de l'excès de matière.

Etant donné qu'on a opté pour un découpage des tôles préliminaire au plasma-coupage, pour des raisons qu'on a expliqué dans le traçage préliminaire pour avoir les dimensions et les formes idéales demandées pour la construction de cette cuve de chaudière, nous devons pour cela éliminer les zones métallurgiquement affectées et l'excès de matière par une méthode d'usinage appropriée.

Pour ce qui est des 8 demi-cylindres qui constituent après assemblage la virole de la cuve de chaudière et les 4 quarts de sphère qui constituent les 2 fonds hémisphériques de cette cuve de chaudière, on devra usiner toutes les zones transversales et verticales vu la qualité exigée des surfaces à usiner, nous devons utiliser une méthode d'usinage qui répond à cette exigence, pour cela on a opté pour le fraisage qui nous donne une très bonne qualité de la surface usiné.

Choix de la machine :

Vu la grande dimension des pièces à usiner et leur très grande masse, on devra opter pour une machine à grande capacité, c'est-à-dire, nous devons avoir les dimensions de

la table assez grande et qui puisse aussi supporter le poids des pièces à usiner. Pour cela on devra avoir une dimension de la table de l'ordre de 2.200 x 2.600 mm et pour ce qui est de l'usinage, la machine doit répondre à une course verticale de 1.500 mm, une course transversale de 2.000 mm, une course longitudinale de 2.300 mm et une puissance de la broche de 25 KW pour usiner les surfaces transversales verticales, on doit avoir une tête de la machine réglable, donc on opte pour une fraiseuse de grande capacité à tête universelle, répondant aux exigences technologiques d'usinage de ces pièces.

II.5.7. Pointage des centres des trous à percer et traçage de ces trous.

Etant donné que le cylindre est percé de nombreux orifices dans lesquels viennent s'adapter les diverses tuyauteries de liaison, nous avons opté pour la méthode de pointage et traçage de ces trous après avoir déterminé leur disposition géométrique, donc il est facile de faire les différentes opérations de pointage et traçage sur chaque demi-cylindre et quart de sphère qui comporte des orifices.

La méthode suivie est la suivante, ayant fait un dessin de l'ensemble virole fonds hémisphériques, on détermine par une méthode géométrique appropriée, les dispositions géométriques de chaque orifice sur chaque demi-cylindre et quart de sphère, ayant fait ce calcul géométrique, à l'aide d'un pointeau, on pointe les centres des orifices repère et on trace à l'aide d'un compas à vis de rappel les cercles correspondant à ces trous et il sera plus facile et précis de percer ces trous.

II.5.9. Perçage des trous

Après avoir percé les avant-trous, il est maintenant facile et plus précis de percer ceux-ci par la même machine mais avec un outil spécial appelé trepan à couteaux obliques réglables qui est un outil centré à l'aide d'un pilote dans un avant-trou, cet outil est utilisé pour le perçage de trous de grand diamètre.

II.5.10. Appareils de levage et de manutention

Les grandes dimension et les grandes masses des tôles et des pièces, exigent des installations de levage et de manutention nombreuses et parfaitement étudiées afin de transférer les pièces entre les différents postes de travail.

Pour cela on a opté pour des ponts roulants pour grosses charges de 70 t, couvrant la surface de l'atelier et parfois des magasins, commande d'une cabine sous le pont ou avec une planchette à boutons poussoirs, manoeuvres au sol.

II.5.11. Choix du vireur à galet

Pour ce qui est du pointage et de la soudure circulaire pour l'assemblage, on utilise un système approprié qui est le vireur à galet, étant donné la grande masse de notre cuve de chaudière et de ses grandes dimensions, on doit avoir un vireur à galet qui répond aux exigences technologiques, c'est-à-dire un diamètre de la pièce à souder, doit être en accord avec les caractéristiques de cette machine, c'est-à-dire diamètre possible qui peut être soudé sur le vireur à galet doit être environ entre 2.000 à 3.000 mm.

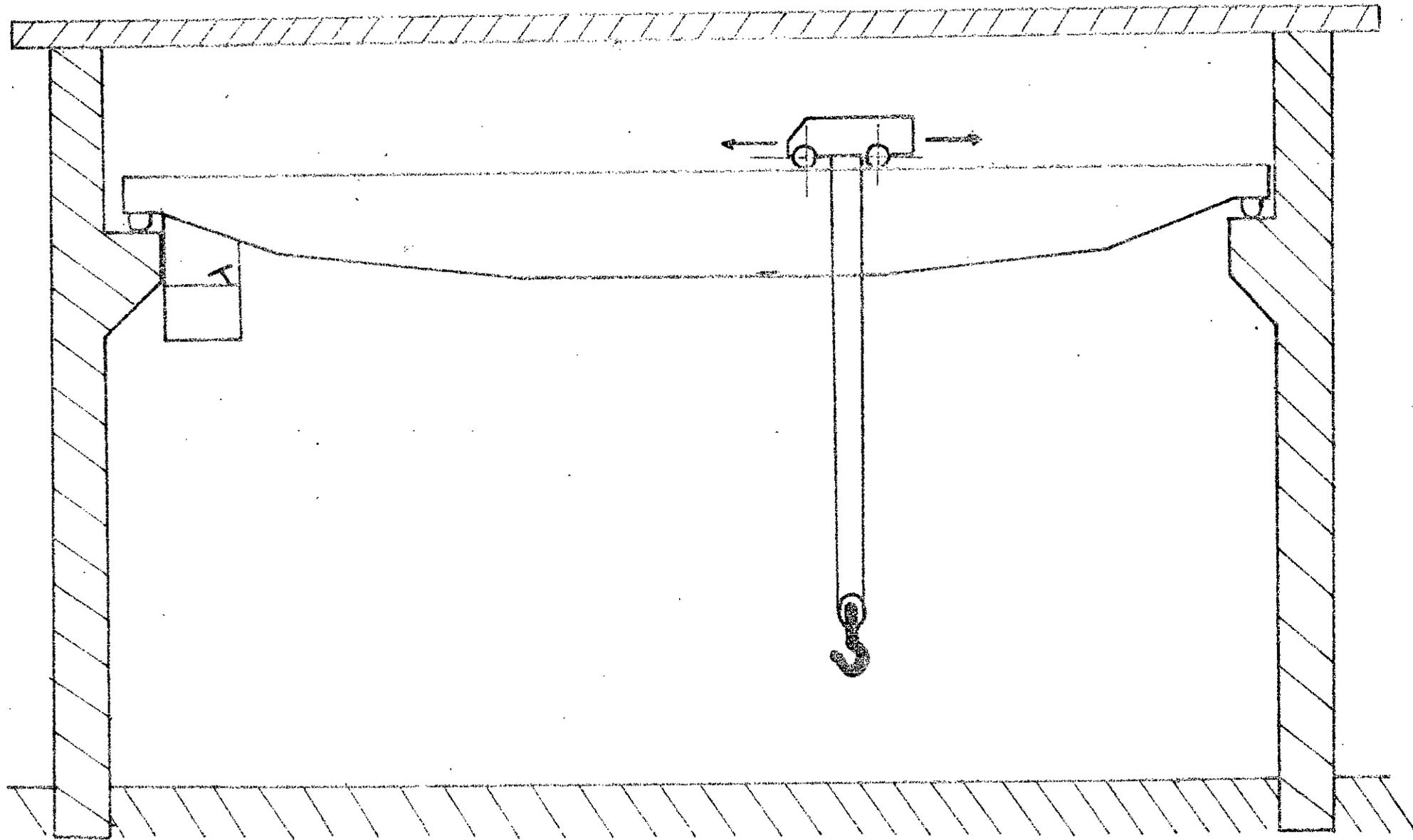
Il faut surtout que les dimensions de celui-ci soit assez suffisantes pour souder la cuve de chaudière sur toute sa longueur et il doit supporter une grande charge d'environ 100 t.

Le vireur à galet doit être monté sur un wagon à commande automatique pour souder la cuve sur sa longueur.

II.5.12. Choix d'un poste de soudage en général

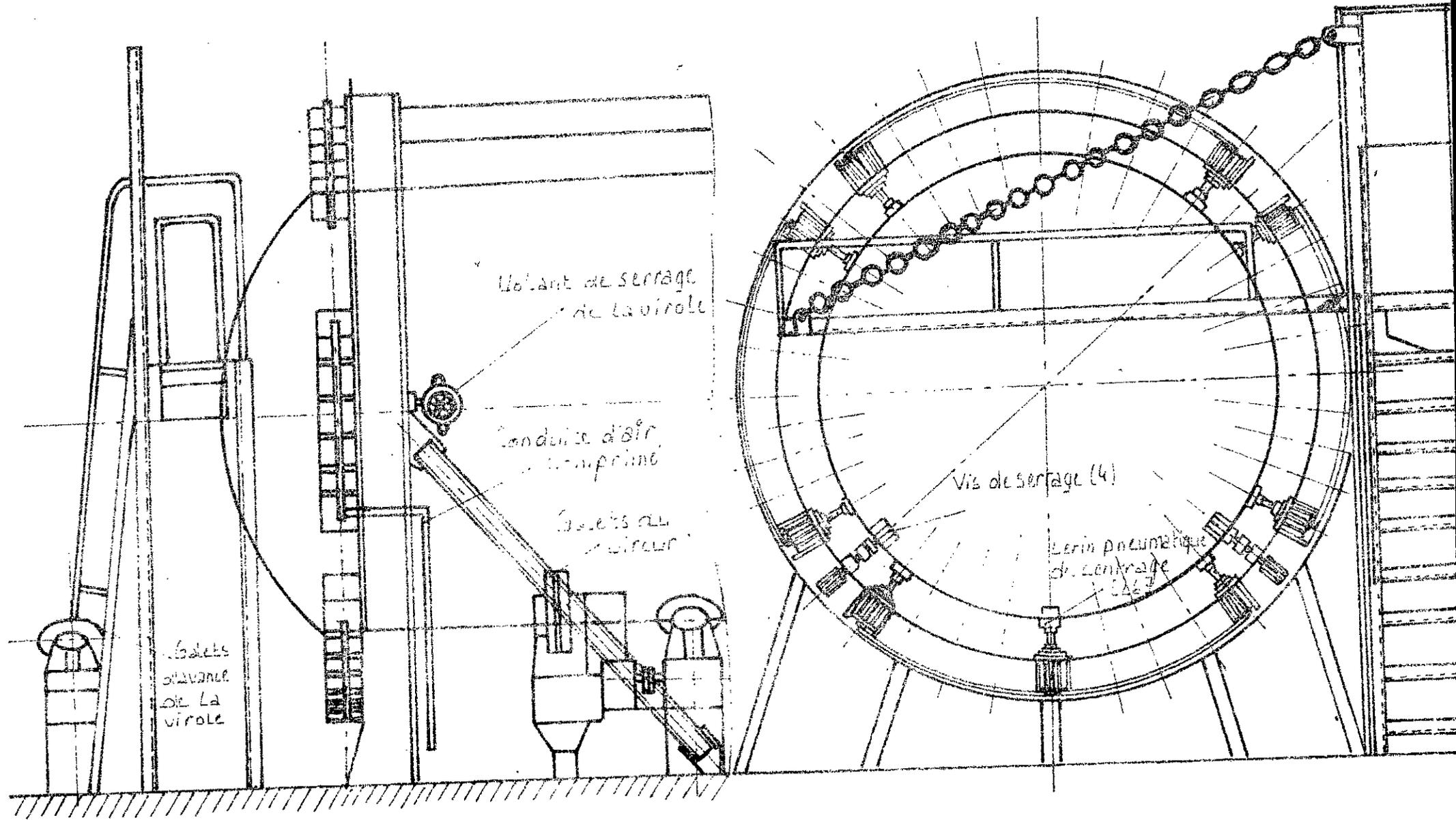
Le choix d'un poste de soudage est déterminé par les facteurs suivants :

- la puissance électrique nécessaire ;
- la nature de la force motrice dont on dispose ;



Pont roulant

67



Schema du positionneur

- les conditions d'utilisation ;
- les exigences de la compagnie distributrice d'électricité ;
- le mode de réglage du courant de soudage.

a) La puissance électrique nécessaire

On peut rencontrer trois types de postes :

- les postes légers pouvant souder avec des électrodes ayant un diamètre allant jusqu'à 3,25 mm (I 150 A), la puissance nécessaire est de 5 KW.
- les postes normaux : pouvant souder avec des électrodes allant jusqu'à 5 mm et parfois pour un travail de moins d'une heure consécutivement, avec des électrodes de 6 mm (I 250 ou 300 A). La puissance nécessaire minimum 8 à 10 KW.
- les postes à grande puissance : peuvent souder avec des électrodes de 8 mm et peuvent alimenter deux ou plusieurs soudeurs (I peut atteindre 600 A), la puissance minimum nécessaire 18 KW.

b) La nature de la force électromotrice : dont on dispose les travaux envisagés exigent l'emploi courant de soudage alternatif, on rencontre les appareils suivants :

- appareils rotatifs : leur type est le convertisseur de fréquence, il consiste en un ensemble généralement monobloc d'un moteur triphasé, entraînant un alternateur monophasé à fréquence augmentée, on peut passer d'une fréquence de 50 Hz à 150 Hz, ce qui permet d'augmenter la stabilité de l'arc.
- appareils statiques : ce sont des transformateurs statiques, appareils les plus répandus, on rencontre :
 - . des transformateurs monophasés simples : ce sont des appareils légers et très simples d'un très bon rendement, ne comportant aucun organe fragile et ne demandant que peu d'entretien, leur facteur de puissance est assez faible. Ils peuvent se

brancher : soit sur une distribution monophasée (à deux conducteurs), soit sur trois conducteurs, c'est-à-dire sur une phase d'une distribution triphasée.

. les transformateurs monophasés compensés : ils comportent en plus des organes des appareils précédents, une batterie de condensateurs qui en réduisant le déphasage, permet d'augmenter le facteur de puissance.

- des transformateurs statiques trimonophasés, leur but est de transformer le courant triphasé du réseau en un courant monophasé approprié au soudage.
- des transformateurs statiques trimonophasés compensés, ils comportent en plus une batterie de condensateurs qui joue le même rôle que dans les monophasés compensés.

c) Les conditions d'utilisation : les appareils de soudage peuvent être portatifs, transportables ou fixes. Les appareils rotatifs sont destinés à des travaux légers, ils possèdent des poignées ou des brancards et des crochets d'élingage. Leur poids varie de 60 à 100 kg.

Les appareils transportables les plus courants sont montés sur des chariots et trainés par un ou deux brancards. Leur poids varie de 100 kg pour les transformateurs statiques monophasés normaux et 500 à 600 kg pour les postes statiques à grandes puissances.

Suivant le poids de ces appareils, les chariots qui les portent sont : à 2 roues avec une ou deux béquilles, à trois roues dont une généralement pivotante à quatre roues, soit avec un essieu fixe et un essieu pivotant, soit avec deux essieux fixes.

Les appareils fixes sont ceux où le poids dépasse 700 kg, ils sont installés dans un atelier soit monté sur un wagon.

d) Les exigences de la compagnie distributrice d'électricité : celles-ci ne concernent que les distributions en courant alternatif et portent sur deux points :

- le facteur de puissance ;
- l'équilibrage des phases du réseau triphasé.

On donnera ci-après à titre indicatif les facteurs de puissance habituels.

Les principaux types de poste alimentés en alternatif pour le courant correspondant aux régime maximam, l'équilibrage des phases est obtenu avec les groupes convertisseurs triphasés continus, les convestisseurs triphasés et convertisseurs de fréquence.

| Types d'appareils | Facteurs de puissance. |
|--|------------------------|
| Groupes convertisseurs. | 0,70 à 0,90 |
| Redresseurs. | 0,70 à 0,95 |
| Convertisseur de fréquence. | 0,70 à 0,75 |
| Transformateurs monophasés simples. | 0,30 + 0,55 |
| Transformateurs monophasés compensés | 0,70 + 0,90 |
| Transformateurs trimonophasés simples | 0,25 + 0,60 |
| Transformateurs trimonophasés compensés. | 0,70 à 0,90 |

e) Mode de réglage du courant de soudage : on peut rencontrer, suivant la construction du poste et de ses accessoires, deux catégories d'appareils qui diffèrent par leur mode de réglage du courant.

- Appareils à réglage, par échelon, par bornes ou par douilles. Ils portent un certain nombre de bornes ou de douilles à chacune desquelles correspond une intensité bien déterminée.

./.

Le système par douille est plus pratique car il suffit d'enfoncer une broche dans la douille choisie pour obtenir l'intensité correspondante au soudage envisagé.

- Des appareils à réglage continu : par volant ou manivelle, système toujours utilisé pour les transformateurs statiques shunt magnétique, les variations de l'intensité sont obtenues par les manoeuvres d'un volant ou d'une manivelle et s'indiquent en un tambour ou un cadran.

II.5.12-1 Choix du poste de soudage, pour le pointage des demi-cylindres, des quarts de sphère, des tubes, etc.

Pour les opérations de pointage des différents éléments qui composent notre cuve de chaudière, on a fait un choix convenant à notre étude, pour cela on a opté pour une installation de soudage TIG qui se compose :

- d'un générateur de courant ;
- d'un coffret de commande ;
- d'une torche de soudage ;

On a fait plus particulièrement le choix du type TG 405 qui est un coffret de commande qui assure toutes les fonctions de soudage TIG :

- amorçage de l'arc ;
- maintien du courant de soudage ;
- protection gazeuse ;
- refroidissement de la torche.

Il s'adapte aussi bien sur une source de courant continu que sur une source de courant alternatif, ses caractéristiques sont :

- alimentation : 220 V ;
- courant de soudage : alternatif ou continu ;
- coefficient d'utilisation multihoraire : 400 à 100 % ;
- refroidissement torche : par eau ;
- encombrement : 500 x 350 x 290 ;
- poids : 32 kg.

II.5.13. Choix de la machine à souder par bombardement électronique.

On peut classer les machines à souder par bombardement électronique, en deux catégories suivant leur mode de fonctionnement.

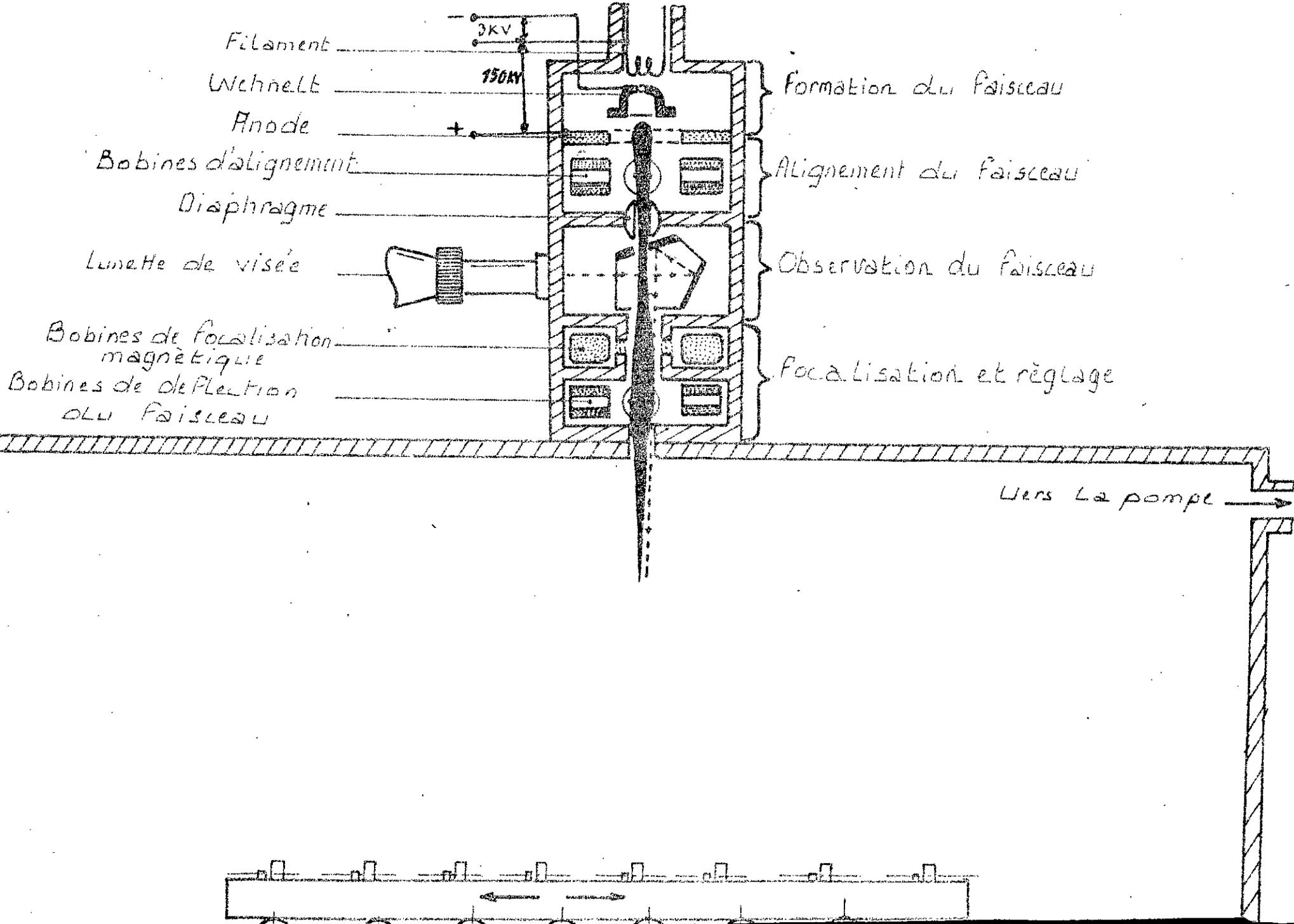
- a.- Machine à canon interne mobile dans l'enceinte de soudage placée sous vide secondaire.
- b.- Machine à canon externe fixe à enceinte de soudage sous vide primaire ou secondaire . Vu les grandes dimensions de notre cuve de chaudière, on est obligé de choisir une machine à canon interne mobile dans l'enceinte de soudage placée sous vide secondaire, car cette machine est destinée à l'assemblage de grands éléments.

Caractéristiques de la machine de type SCIAKY :

- machine géante de volume 160 m3 ;
- déplacement du canon : axe X : 12.000 mm
axe Y : 2.000 mm
axe Z : 2.000 mm.

On fera aussi le choix d'une machine de soudage par bombardement électronique de marque soviétique :

- classe du canon : haute tension c'est-à-dire 100 KV ;
- type de canon : Y - 670 (soviétique)
(voir tableaux pour ses caractéristiques).



Caracteristiques des canons du soudage par bombardement electronique Sovietiques

| classe de canon | Type de Canon | Voltage de l'accélérateur en KV | Intensité maximale du courant en mA | Diamètre maximal du faisceau d'électrons mm | Caracteristiques Constructives | Destination |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--|--|---|
| Basse-tension jusqu'à 30 KV | A.852.04 | 25 | 200 | 0,4 | La triode du canon anodique en Labs ; prechauffage par rayonnement spirale ; Diamètre de bride 150 mm, et longueur du canon 273 mm | Soudage de précision, de produit de petits dimensions. Utilisé en premier lieu dans l'industrie Electronique |
| | A.852.19 (30002) | 25 | 200 | 0,4 | | |
| | Y-250A | 30 | 450 | 0,9 ± 0,0 | Triode du canon cathodique en Labs ; prechauffage électronique | Pour les installations universelles et spécialisées. Canon fixe ou déplaçable |
| | Y-530M | 30 | 50 | 0,2 (Intensité jusqu'à 50 mA) 0,8 (I _z jusqu'à 500 mA) | Triode du canon cathodique en Labs ou Ta prechauffage Electronique | |
| Moyenne tension 40 = 80 KV | 37T-60 | 60 | 35 ± 45 | 0,7 ± 0,8 | Triode du canon cathodique métallique ; chauffage directe par courant électrique | Pour les installations spécialisées et universelles à un ou plusieurs canons. Travaille en régime de choc non prévu |
| | 37T-60M/20 37T-60M/100 | | | | | |
| Haute-tension > 100 KV | Y-670 Y-670M | 60/120 | 1000/500 | 0,5 | Cascade du canon cathodique en Labs ou Ta prechauffage Electronique | Pour les installations de soudage des métaux de grandes épaisseurs |

par bombardement électronique

| Paramètres | A306.13 | Y-212M | ЭПЧРД | Y-496 | Y-50 | ЭПЧ-4 | ЭПЧ-9A | ЭПЧ-13 | Y-570 | Y-538 | Y-670 |
|--|----------------|----------------|---------|-------|--------|----------------|----------------|-----------------|--|---|-----------------|
| épaisseur du métal soudé en mm (L) | | | | | | | | | | | |
| - Acier et Alliages..... | 12 | 35 | 15 | — | 5 | 15 | 15 | 30 | 40 | 40 | |
| - Metaux refractaires, cuivre et ses alliages..... | 6 | 15÷20 | 6 | — | 5 | 5 | 5 | 10 | 20 | 20 | |
| Dimensions maximales du produit en mm: | | | | | | | | | | | |
| - En soudage circulaire (diamètre x longueur)..... | 120x120 | — | — | — | 60 | 200x400 | 200x250 | 300x450 | 400x300 | 2000x3000 | 3000x2000 |
| - En soudage longitudinal dans un plan horizontal (diamètre x hauteur x longueur)..... | 240x160x160 | 250x250 | 150x150 | — | — | 250x150x400 | 800x500x1400 | 300x300 | 2000x7000 | | |
| Vitesse de soudage en mlh... | — | 10÷100 | — | — | — | 5÷150 | 5÷100 | 5÷100 | 10÷100 | — | 5÷100 |
| En radiation électronique..... | A.85L.19 | Y-250A | ЭПЧРД | — | Y-530M | ЭПЧ-60 | ЭПЧ-60/25 | ЭПЧ-60/100 | Y-530M | Y-530M | Y-670 |
| Voltage de l'accélérateur en kV | 25 | 50 | 100 | 50 | 30 | 60 | 60 | 60 | 30 | 30 | 60/120 |
| Puissance maximale en kBT... | 5 | 13.5 | 1 | 0.5 | 15 | 2.0 | 2.5 | 10 | 15 | 15 | 50 |
| Nombre de canons dans l'installation..... | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| Nombre de sites pour l'installation des canons..... | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 6 | de placement à l'intérieur de la chambre | 4, de placement à l'intérieur de la chambre | 3 |
| Trois sources d'alimentation... | — | Y.250A | ЭПЧРД | — | Y-250A | УС-50/4-1 | УС-60/4-2 | УС-60/15 | Y-250A | Y-250A | |
| Puissance de l'installation en kBT. | 15 | 25 | 5 | 5 | 30 | 15 | 16 | 160 | 25 | 25 | 180 |
| Débit d'eau de refroidissement en l/h | 250 | 250 | 100 | 100 | 250 | 400 | 1400 | 16000 | — | — | |
| Caractéristiques de dimension de la chambre à vide (diamètre - intérieur x longueur) en mm | 500x500x500 | 600x600x600 | — | — | — | 700x1100 | 1150x1400 | 2000x1400x1900 | 1250x1200x1200 | 2800x4000 | 3500x1500 |
| - Longueur x hauteur x largeur en mm | | | | | | | | | | | |
| - principales..... | | | | | | | | | | | |
| - complètement..... | | | | | | | | | | | |
| Caractéristiques de dimension de l'installation | 1130x1500x2000 | 3050x1800x2300 | — | — | — | 3000x3000x2200 | 3100x1500x2200 | 22000x2150x3000 | — | — | 21000x9100x1000 |
| Groupe auxquelles se rapporte l'installation | 5 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 | |

75

C O N C L U S I O N

En conclusion, je dirai que tout au long de ce travail j'ai beaucoup insisté sur l'aspect qualitatif du produit à obtenir, en utilisant des méthodes technologiques de pointe que sur l'aspect économique. Pour cela j'ai voulu montrer qu'il est très important de considérer l'évolution de la technologie tout en oubliant les méthodes de choix de matériels moins chers et qui n'a rien à avoir avec la performance de l'industrie moderne, donc ce travail peut être réalisé en collaboration avec une société nationale possédant un matériel adéquat qui est dans les normes du développement technologique.

=====

B I B L I O G R A P H I E

- (I) - P. LORAIN : les chaudières à vapeur tome II
édition EYROLLES - 1950.
- (2) - D. SEFERIAN : métallurgie de la soudure
édition DUNOD - 1965.
- (3) - A. VALLINI : joints soudés ; contrôle métallurgique,
résistance ; édition DUNOD - 1968.
- (4) - P.T. HOULDCROFT : les procédés de soudage
édition DUNOD - 1971.
- (5) - V. RYBAKOV : le soudage et le coupage des métaux
édition MIR MOSCOU - 1977.
- (6) - BARODKINE Evgueni : procédé du soudage
FEN I45 "TE III" - 1982.
- (7) - W. CHAPEAU ; R. BAUS : application du soudage aux
constructions ; édition EYROLLES - 1979.
- (8) - Recueil des normes françaises de la construction des
générateurs de vapeur ; édition 1978.
- (9) - Revue générale de thermique N° II4 juin 1971.
- (10) - G.A. NICOLAEV : calculs, projets et réalisations des
constructions soudées ; édition MOSCOU 1971.
- (II) - H. DE LEIRIS : matériaux et alliages - tome II - 1971.

